

INGENIERÍA CONSCIENTE: **CIENCIA, TECNOLOGÍA Y SOCIEDAD** **HACIA UN FUTURO SOSTENIBLE**

COLOQUIO
19°
POSGRADO



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE QUERÉTARO
FACULTAD DE INGENIERÍA



CONTENIDO

Predicción de zonas críticas mediante análisis numérico en muro de contención reforzado y beneficios ecológicos	7
Miranda Sánchez Betsie, Chávez Alegría Omar	
Películas delgadas de Co_3O_4: un semiconductor clave para diversas aplicaciones	17
Barragán-Méndez, Haalf Irving, Acosta-Silva, Yuliana de Jesús, Méndez-López, Arturo	
Análisis comparativo de las propiedades físicas y mecánicas de una mezcla de concreto con material fino reciclado del banco REURBA	31
Sanchez Barrera David, Reyes Araiza José Luis, Saul Antonio Obregón Biosca, Alejandro Manzano Ramírez, José de Jesús Pérez Bueno	
Análisis comparativo mediante Inteligencia de Enjambre para la Identificación Paramétrica aplicada a motores de inducción	43
Medina Vega, Gustavo y Morales Velázquez, Luis	
Proposal for improving dimensional accuracy for an open-source 3D bioprinter	53
Peña Solache, Jaime, Hernández Rosas, Fabiola, Iturralde Carrera, Luis, Gutiérrez, Araceli, García Avila, Josué	
Diseño y optimización de un biosistema urbano con microalgas e hidroponía en un techo de vivienda multifamiliar	70
J. R. Uvera, Lara-Montaña Oscar Daniel, Guzmán-Martínez Carlos Eduardo, Martínez-Guido Sergio Iván	
Estudio comparativo de algoritmos de desdoblamiento de fase espacial y aplicación en reconstrucción 3D	80
Villafuerte Ruiz, Karla Lizeth, Espinosa Bernal, Osmar Antonio Pedraza Ortega, Jesús Carlos Ramos Arreguín, Juan Manuel Sotomayor Olmedo, Artemio Aceves Fernández, Marco Antonio	
Articulaciones críticas entre teoría queer, espacialidad y enfoques interseccionales-decoloniales en la arquitectura	93
Hernández Montes, Luis Daniel y Loredó Cansino, Reina	

Microbiological evaluation of polyvinyl alcohol nanofibers with urea for controlled nitrogen release	105
Margarita G., Garcia-Barajas, Juan de Dios, Galindo-De-La-Rosa, Claudia E. Perez-Garcia, Angélica, Feregrino-Perez, Alejandra, Álvarez-López, Vanesa, Vallejo-Becerra	
Estudio DFT de complejos prepoliméricos en polímeros molecularmente impresos para piocianina	115
M. G. Magallón-Méndez, Álvarez-López Alejandra, M. A. Cortés-Cuán, Carlos Saldaña, Carlos M. Cortés-Romero, Beatriz Liliana España-Sánchez y María de los Ángeles Cuán Hernández	
Revisión prismática del modelo de valuación multicriterio aplicado a inmueble histórico en Querétaro: enfoque técnico, económico y patrimonial	125
Olaff de Jesús Aguilar Gasca, Verónica Leyva Picazo, Ma. Sandra Hernández López	
Arquitectura CSWin-Transformer con muestreo espacial piramidal para clasificación de Degeneración Macular Asociada a la Edad	136
Castillo-Rocha, Oliverio	
Ciencia ciudadana y recolección de datos comunitaria: una revisión académica	146
González Martínez, Roxana y Escudero Nahón, Alexandro	
Actualización de la curva EAC de la presa Santa Catarina mediante LiDAR-VANT y batimetría-VSNT	161
Mercado Jaraba, Manuel E., Fuentes, Sebastian y Chávez, Carlos	
Diseño de domo desplegable frente a vientos regionales de México	170
Constante Torres, Xochitl, Pérez-Moreno, L. Francisco, Yáñez-Godoy, Humberto, Horta Rangel, Jaime Moisés, López Domínguez, Guillermo Iván y Arjona Catzim, Iván Fermín	
Comportamiento mecánico de un concreto con adición de fibras textiles de algodón desechado	180
Navarro Rubio, Cesar Augusto, Martínez Ángeles, Hugo, Trejo Perea, Mario, Ríos Moreno, José Gabriel, Carrillo-Serrano, Roberto Valentín	

Mercado y Productos Identitarios del Bajío: Narrativa Patrimonial desde San Miguel de Allende	194
Murillo Cuevas, Damarix Sarai, Escobedo Navarrete, David, Flores Gutiérrez Avatar	
Lenguaje de Patrones; oportunidades metodológicas en arquitectura	203
Alvarado Zambrano, Erick Daniel y Flores Gutiérrez, Avatar	
Reconstrucción de dibujo paramétrico CAD, sketch, desde imágenes usando redes neuronales	213
Valencia Gonzalez, Jonatan; Takacs, Andras; Pedraza Ortega, Jesus Carlos; Ramos-Arreguin, Juan-Manuel	
Análisis Estadístico de Puentes de la Red Federal de Carreteras en México	225
Pérez Dávila José, Arjona Catzim Iván, Amézquita Sánchez Juan Pablo, Pérez Moreno L. Francisco	
Esponja mesoporosa de sílice funcionalizada con grupos mercapto para adsorción de iones de mercurio (II)	235
Laura A. Ruelas, Nava Mendoza Rufino, Cuán Hernández María de los Ángeles, Peza Ledesma Carmen Leticia	
Detección De Concentraciones de Agua en Caminos Usando YOLO	246
Trujillo Lopez, Miguel; Ramos Arreguin, Juan Manuel; Pedraza Ortega, Jesús Carlos; Tovar Arriaga, Saul; Aceves Fernández, Marco Antonio; Ramírez Arriaga, Karen Andrea	
Detección e identificación de personas de imágenes obtenidas con drones utilizando aprendizaje profundo	255
Reyes Cerón, Mitzi Jocelyn, Ramos Arreguin, Juan Manuel, Galván Guerra, Rosalba, Pedraza Ortega, Jesús Carlos, Takács, Andrés y Rivas Araiza, Edgar Alejandro	
Hacia una valuación integral de startups: propuesta de un modelo híbrido que incorpora factores cualitativos	265
Arroyo Navarro, Rosa Hilda	
Análisis del Comportamiento del Algoritmo de Optimización de Crecimiento de Plantas	276
Martínez Ángeles, Hugo,t, Navarro Rubio, Cesar Augusto,t, Ríos Moreno, José Gabriel, Trejo Perea Mario, Velázquez Castillo, Rodrigo Rafael, Carrillo-Serrano, Roberto Valentín	

Salas de espera en entornos hospitalarios: análisis isovista y orientación de los pacientes	286
Esteban Orlando Zavala Chávez, María Esther Magos Carrillo	
Mejora en la perfilometría por transformada de Fourier 2D utilizando filtrado con distintas formas de máscara	296
García Echevarría, Mercy Yureymi; Aguayo Serrano, Francisco Emiliano; Pedraza Ortega, Jesús Carlos; Espinosa Bernal, Osmar Antonio; Ramos Arreguin, Juan Manuel; Arriaga Tovar, Saul	
Análisis numérico para estimar el daño por fatiga en pilotes marinos durante el proceso de hincado	311
Soto Chávez Andrés, Ocaña Espinosa de los Monteros Karina Griselda, Arjona Catzim Iván Fermín y Pérez-Moreno L. Francisco	
Revisión sistemática del aprovechamiento de la pulpa de café para obtener productos de valor agregado	319
Escudero-Enríquez, Eliud, Caltzontzin-Rabell, Valeria, Carrillo-Parra, Artemio y Gutiérrez-Antonio, Claudia	
Indicadores generales de evaluación de proyectos de innovación de la UAQ en materia LGBTIQ+	330
Tinoco-Navarro, Omar	
Articulaciones críticas entre teoría queer, espacialidad y enfoques interseccionales-decoloniales en la arquitectura	341
Hernández Montes, Luis Daniel y Loredó Cansino, Reina	
Aproximación metodológica para el diseño del hábitat desde la Sympoiesis Humana	352
Fortuna Martínez, Luis Rodrigo, Padilla Herrera, Diana Karina y Pérez Coeto, Marysol Uribe	
Síntesis de Membrana de Quitosano /Quitosano-GMA por Electrohilado como soporte de Neomicina	362
Luna-Solache, Luisa F., Guerra Balcázar, Minerva., Mora-Muñoz, Moroni y Pérez-Moreno, T.	

Análisis de Factores Influyentes en la Comercialización de Videojuegos Mediante Técnicas de Aprendizaje Automático	369
Jaramillo Caro del Castillo Julio, Sandoval Valencia Tania Elizabeth, Huerta Manzanilla Eric Leonardo, Vergara Ayala Edwin Geovanny	
Articulaciones críticas entre teoría queer, espacialidad y enfoques interseccionales-decoloniales en la arquitectura	382
Hernández Montes, Luis Daniel y Loredó Cansino, Reina	
Evolución de la manufactura digital: del control numérico a la fábrica inteligente	394
Aguirre-Banda Pedro, Carillo-Mercado Jesús, Morales-Paquot Enrique y Fibela-Esparza Martín	
Determinación del Precio Adecuado para la Negociación en Compra y Venta de Inmuebles	406
Candelas García Juan Pedro	
Conceptualización arquitectónica de vivienda urbana con criterios acústicos: modelo aplicado y mapa de decisiones	417
Moreno Almaraz Rogelio, Nivón Pellón Alejandra y Gómez Guzmán Marco Antonio	
Evaluación sustentable de residuos de construcción como material para bases de pavimentos	432
Miranda Sánchez Cristofer, Chávez Alegría Omar y Miranda Sánchez Betsie	
Influencia de la rugosidad del terreno en la presión de viento sobre cubiertas de arco circular	442
Maldonado-Fajardo, Misael	
Metodología para el análisis espacial: estrategias y tácticas de vida cotidiana para el proyecto arquitectónico	453
Flores Montero, Jorge Andrés, Loredó Cansino, Reina	
Optimización de sistemas fotovoltaicos en terrenos irregulares mediante modelado computacional y algoritmos heurísticos	462
Iturralde Carrera, Luis Angel, Cruz Reyes, Gabriel Alejandro, Rodríguez Resendiz, Juvenal, Valdivia Nodal, Yarelis, Constantino Robles, Carlos y Díaz Tato, Leonel	

“Predicción de zonas críticas mediante análisis numérico en muro de contención reforzado y beneficios ecológicos”

Prediction of critical zones through numerical analysis in reinforced retaining wall and ecological benefits

Miranda Sánchez Betsie y Chávez Alegría Omar

Facultad de ingeniería

Universidad Autónoma de Querétaro

Santiago de Querétaro, México

betsiemiranda.2509@gmail.com y omar.chavez@uaq.mx.

Resumen: Las geomallas biaxiales se emplean por su alta resistencia y rigidez en dos direcciones, optimizando la distribución de cargas, confinamiento del suelo y mejorando la estabilidad de estructuras geotécnicas, además, su diseño facilita la permeabilidad, favoreciendo el drenaje y evitando la erosión del suelo, lo que contribuye a la sustentabilidad de las obras. Estos sistemas reducen significativamente el uso de materiales tradicionales como concreto y acero, disminuyendo la huella de carbono y permitiendo el aprovechamiento de los suelos locales que normalmente serían desechados, así como la incorporación de los suelos reciclados, minimizando la extracción de materiales y el transporte de los mismos. Con base a la literatura las fallas en terraplenes han provocado colapsos, daños a vialidades, obras civiles e incluso pérdidas humanas. En esta investigación se realizó una modelación numérica para analizar el comportamiento mecánico, de muros de contención reforzados con geomallas sometidos a cargas cíclicas, representativas de vibraciones, tráfico y sismos, con el propósito de anticipar y localizar zonas críticas. Se compararon los resultados con ensayos previos, simulando las condiciones físicas, geométricas y geomecánicas reportadas en estudios preliminares. Los resultados mostraron fallas locales en la base del muro en todos los escenarios, asociadas a la falta de confinamiento, lo que coincide con las deformaciones observadas en el modelo físico y contradice la hipótesis inicial de la investigación base. Se emplearon tres métodos de estabilidad de talud, confirmando que la modelación numérica es una herramienta eficaz para predecir fallas, mejorar el diseño de estructuras y fomentar la construcción sustentable.

Palabras clave: VTM; Geomallas Biaxiales; Muro de Contención; Estabilidad de Taludes; Erosión del Suelo; Ingeniería Sostenible.

Abstract: Biaxial geogrids are used for their high strength and stiffness in both directions, optimizing load distribution, soil confinement, and improving the stability of geotechnical structures. Furthermore, their design facilitates permeability, favoring drainage and preventing soil erosion, which contributes to the sustainability of the works. These systems significantly reduce the use of traditional materials such as concrete and steel, reducing the carbon footprint and allowing the use of local soils that would normally be discarded, as well as the incorporation of recycled soils, minimizing material extraction and transportation. Based on the literature, embankment failures have caused collapses, damage to roads, civil works, and even human losses. In this research, numerical modeling was performed to analyze the mechanical behavior of retaining walls reinforced with geogrids subjected to cyclic loads, representative of vibrations, traffic, and earthquakes, with the purpose of anticipating and locating critical areas. The results were compared with previous tests, simulating the physical, geometric, and geomechanical conditions reported in preliminary studies. The results showed local failures at the base of the wall in all scenarios, associated with the lack of confinement. This coincides with the deformations observed in the physical model and contradicts the initial hypothesis of the baseline investigation. Three slope stability methods were employed, confirming that numerical modeling is an effective tool for predicting failures, improving structural design, and promoting sustainable construction.

Keywords: VTM; Biaxial Geogrids; Retaining Walls; Slope Stability; Soil Erosion; Sustainable Engineering.

1. Introducción

Hasta la fecha, el uso de materiales geosintéticos, en particular las geomallas biaxiales, ha revolucionado el diseño y la construcción de estructuras de suelo debido a su capacidad para reforzar, estabilizar y mejorar la distribución de cargas en muros de contención y presas. Estos materiales proporcionan rigidez bidireccional, mejorando la interacción suelo-estructura y potenciando la permeabilidad del material, facilitando el drenaje del agua y reduciendo la erosión del suelo [2], [8].

La incorporación de geomallas también tiene un impacto sostenible al permitir el uso de suelo local, incluso suelo de baja calidad, y la reutilización de suelo reciclado. Esto reduce la necesidad de explotación de canteras y el uso de recursos de alto consumo energético, como el hormigón y el acero, lo que reduce la huella de carbono de los proyectos de infraestructura, según [7], [4]. Además, al aumentar la durabilidad y reducir la necesidad de mantenimiento, promueve una economía circular y la conservación de los recursos naturales.

Con base en la literatura reciente que ha profundizado la comprensión del comportamiento de la interacción entre el suelo y las geomallas, [10] realizó un estudio experimental sobre muros de contención contruidos a partir de adobe arcilloso estabilizado reforzado con geomalla, demostrando que la combinación de estabilización química y refuerzo físico aumenta la capacidad de carga y reduce las deformaciones. Además, [11] investigó el comportamiento de materiales granulares no adheridos reforzados con geomalla mediante ensayos triaxiales con rigidez radial constante, concluyendo que el refuerzo mejora significativamente la resistencia al corte y la rigidez de la mezcla. Por otro lado, [12] caracterizó la interacción de la geomalla con el suelo mediante ensayos de extracción, destacando la influencia de la fricción, la rigidez de la malla y las propiedades del relleno en la eficiencia del refuerzo.

Sin embargo, el comportamiento de los muros reforzados bajo cargas cíclicas (de tráfico, maquinaria o actividad sísmica) sigue siendo un desafío, ya que las deformaciones acumulativas pueden comprometer la estabilidad e integridad de

las estructuras [3], [9]. Sin embargo, el modelado numérico mediante software especializado como Slide proporciona una herramienta eficaz para simular diversos escenarios, lo que permite predecir fallas e identificar áreas críticas, con el fin de mejorar el diseño estructural y reducir riesgos [1].

Los objetivos de este trabajo de investigación son: (i) analizar el comportamiento mecánico de muros de contención soportados por geomallas en diversos escenarios y bajo diferentes cargas cíclicas; (ii) verificar la eficacia de los modelos numéricos para la predicción de fallas; y (iii) destacar los beneficios ambientales y estructurales del uso de geomallas, aunque estos beneficios no se reflejen directamente. El trabajo consta de cinco secciones: introducción, metodología, resultados, análisis y conclusiones. Este estudio contribuye al avance del conocimiento en el campo de la geotecnia sostenible al proporcionar estrategias para una construcción más segura y respetuosa con el medio ambiente.

2. Materiales y métodos

Las características detalladas de los materiales utilizados son (arena de Fujian), el diseño experimental y los procedimientos completos, véase: Ying Liu, Yongzi Zhao, Ding Zhang y Zhiyong Liu (2022): *"The long-term mechanical performance of geogrid-reinforced soil retaining walls under cyclic footing loading"*, Estudios de caso en materiales de construcción, e01642, Elsevier ouci.dntb.gov.ua.

Se utilizó arena estándar de Fujian como material de relleno, con una gravedad específica de 2,64 un peso unitario de 16,5 kN/m³ y un ángulo de fricción interna de 44° a una densidad relativa del 65 %. Este suelo se seleccionó debido a su amplio uso en investigaciones previas, lo que proporcionó la base para la información de referencia, sus propiedades que se aplicarán en el modelo numérico y la comparabilidad de los resultados numéricos y experimentales. Se utilizó una geomalla biaxial de polipropileno como refuerzo, con una resistencia máxima de 9 kN/m y un módulo de elasticidad de 210 kN/m. Este material no solo mejora la distribución de la carga y el confinamiento del suelo, sino que también reduce el uso de hormigón y acero, aprovecha el suelo local de baja calidad y lo recicla, contribuyendo así a la sostenibilidad de la infraestructura.

2.1 Métodos de Análisis, Geometría y Condiciones de Modelado

El análisis numérico se realizó con Slide versión 6.0 (licencia de la Universidad Autónoma de Querétaro, número de versión: 7929A). Se reprodujo la geometría de 1.10 m x 1.05 m mencionada en el artículo de referencia, con el refuerzo colocado a 0.22 m de la base de la presa y a intervalos de 0.15 m hasta la coronación. Se incluyeron escenarios con y sin confinamiento lateral utilizando cubos de hormigón (0,15 m x 0,15 m, $\gamma = 24 \text{ kN/m}^3$).

Se aplicaron cargas cíclicas verticales de 25 a 690 kPa, representativas de tráfico, vibración y sismo, a diferentes distancias de la cimentación (1B, 2B y 3B), con B = 16 cm.

El comportamiento mecánico y la predicción de fallos se evaluaron mediante tres métodos de equilibrio límite: Fellenius, Bishop simplificado y Janbu simplificado, comparando los factores de seguridad (FS) en diferentes escenarios de carga, arriostramiento y confinamiento. Estos métodos permitieron verificar la sensibilidad del sistema a las condiciones dinámicas y estimar las zonas críticas de fallo.

2.2 Identificación de zonas críticas

Se representaron gráficamente los círculos de deslizamiento más probables, identificando las zonas críticas de fallo dentro del muro de contención reforzado con geomalla. Esta herramienta facilitó la identificación de áreas vulnerables.

2.3 Comportamiento bajo cargas cíclicas

Estas cargas generan deformaciones acumulativas en el suelo y el sistema de refuerzo, lo que podría comprometer la estabilidad general de la estructura. Para fines analíticos, se realizaron simulaciones en Slide, aplicando incrementos de carga repetidos para monitorear la evolución del factor de seguridad y la propagación de posibles superficies de falla. Los resultados identificarán cambios en los mecanismos de desplazamiento e identificarán zonas críticas de inestabilidad, lo que proporcionará información esencial para predecir fallas y mejorar el diseño estructural.

3. Resultados

Los resultados del análisis numérico de muros de contención reforzados con geomalla biaxial bajo cargas cíclicas se organizaron según los objetivos especificados.

3.1 Factores de Seguridad (FS) en Diferentes Escenarios

Se evaluaron nueve escenarios representativos, variando la presencia de refuerzo, el confinamiento lateral y la magnitud de las cargas cíclicas. Los FS se calcularon mediante los métodos de Fellenius, Bishop Simplificado y Janbu Simplificado, y se muestran en la *Cuadro 1*.

Cuadro 1. Factores de Seguridad obtenidos en diferentes escenarios de modelado numérico.

ANÁLISIS DE MODELOS NUMÉRICOS EN SLIDE							
N	Escenario del Modelo Numérico	Carga	Distancia (Cm)	FS (Factor de Seguridad)			Observaciones
				Fellenius	Bishop	Janbu	
1	Modelo sin confinamiento y sin refuerzo			0.126	0.268	0.241	Falla general y local
2	sin refuerzo, sin confinamiento y con una sobrecarga	690 KPa	3B es decir 48 cm	0.126	0.268	0.210	Falla general
3	Con refuerzo de geomalla y Con confinamiento.	Gravedad		0.593			Falla local de base
4	Con refuerzo de geomalla y Con confinamiento de cubos de concreto	Gravedad y coeficiente sísmico Vertical de 0.1		0.031			Falla local de base
5	sin refuerzo, sin confinamiento y con una sobrecarga	0.25 KPa	1B = 16	0.126	0.268	0.241	Falla local
6	sin refuerzo, sin confinamiento y con una sobrecarga	0.25 KPa	2B = 32	0.126	0.268	0.241	Falla local
7	sin refuerzo, sin confinamiento y con una sobrecarga	0.25 KPa	3B = 48	0.126	0.268	0.241	Falla local
8	Con refuerzo, Con confinamiento y con sobrecarga	690 KPa	3B = 48	0.0445	0.679	0.590	sobrecarga paralela al refuerzo
9	Con refuerzo, Con confinamiento y con sobrecarga	690 KPa	3B = 48	0.0445	0.679	0.590	sobrecarga tangente al refuerzo

En general, los modelos con y sin refuerzo y con y sin contención mostraron valores de FS mayores a 1 en todos los métodos utilizados.

3.2 Identificación de Zonas Críticas

En todos los escenarios, se observó una falla localizada en la base de la presa. La Fig. 1 muestra un diagrama representativo de la ubicación de esta zona crítica.

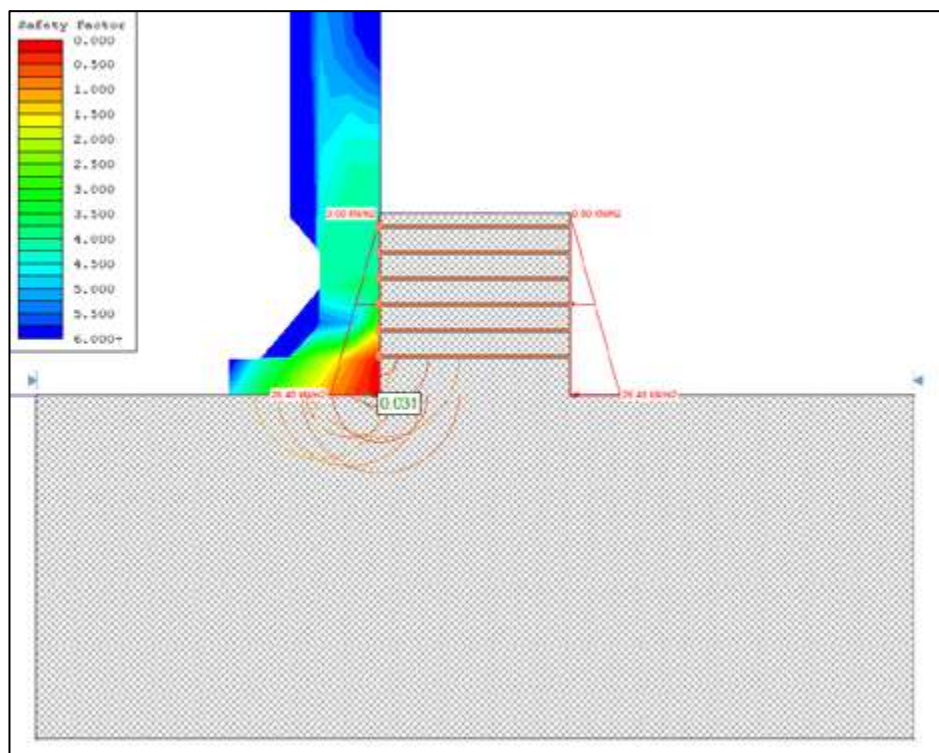


Figura 1. Esquema del terraplén con refuerzo de geomallas, confinamiento y zona crítica en la base.

• 3.3 Comportamiento bajo cargas cíclicas

Se aplicaron cargas verticales de entre 25 y 690 kPa, distribuidas a las distancias 1b, 2b y 3b ($b = 16$ cm) de la cimentación. Los resultados mostraron que el aumento de las cargas redujo gradualmente el módulo de rigidez, especialmente en el método Janbu, donde el valor mínimo fue de 0,210 a 690 kPa (como se muestra en la Fig. 2)

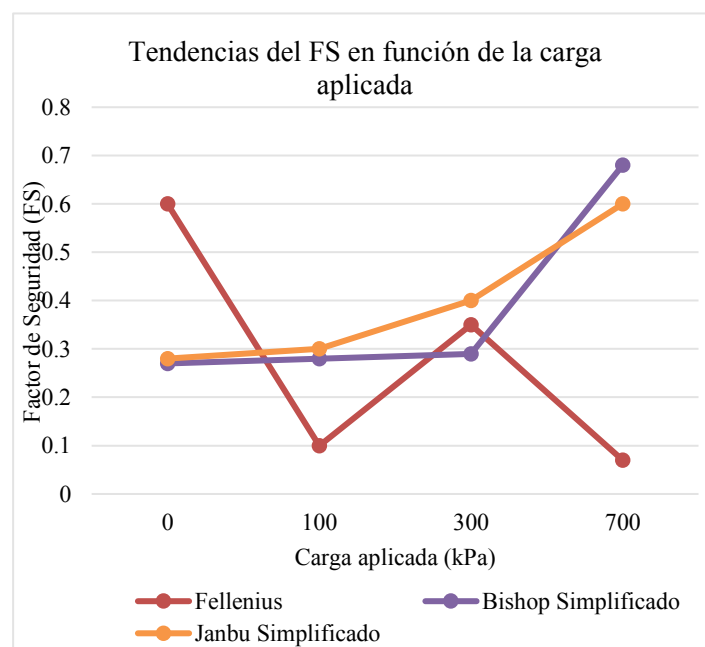


Figura 2. Variación del FS en función de la carga aplicada y método de análisis.

4. Discusión

Una fortaleza notable de este trabajo es la integración de un enfoque sostenible. El uso de geomallas ofrece beneficios no solo mecánicos sino también ambientales, reduciendo la necesidad de materiales tradicionales con alto impacto ambiental, como el hormigón y el acero, y promoviendo el uso de suelo local o reciclado [4], [7]. Este enfoque coincide con el de [11], quienes demostraron que la combinación de estabilización química y refuerzo físico mediante geomallas en muros de contención de arcilla limosa estabilizados mejora significativamente la capacidad portante, reduce el colapso y el empuje lateral del terreno, a la vez que promueve la sostenibilidad y el uso racional de materiales in situ.

En este estudio, la simulación numérica desarrollada por Slide permitió analizar el comportamiento del sistema reforzado bajo diversos escenarios de carga, con y sin geomallas, e identificar zonas críticas y modos de fallo. Si bien los datos se obtuvieron de un modelo físico a pequeña escala (1 g), esta metodología es práctica y económica para comprender los mecanismos de interacción suelo-estructura, aunque no refleja completamente los efectos de inercia y escala que pueden ocurrir en condiciones reales. No se emplearon métodos centrífugos ni de gravedad mejorada, por lo que la precisión cuantitativa del análisis fue limitada. Sin embargo, la herramienta numérica proporcionó un marco fiable para la interpretación de los resultados mediante análisis de sensibilidad, fiabilidad ($IR \geq 3$) y pérdida de resistencia, lo que mejoró la fiabilidad del enfoque de diseño preliminar.

Además, estudios recientes confirman la importancia del efecto de la restricción lateral en la eficacia del refuerzo con geomallas. Los investigadores [10] al evaluar el comportamiento de materiales granulares no ligados (UGM) reforzados con geomallas mediante ensayos de rigidez estática radial triaxial (CRST), descubrieron que la inclusión de geomallas aumentó el módulo elástico en 21-25 MPa y redujo la deformación residual bajo carga cíclica. Estos resultados confirman que la mejora estructural se debe principalmente a la adhesión de los áridos en los huecos de la geomalla, lo que aumenta la rigidez y la capacidad portante de la base. Sin embargo, los investigadores también observaron que,

con tensiones verticales bajas ($\sigma_{\text{vmin}} = 5 \text{ kPa}$), la pérdida de contacto entre el refuerzo y el agregado puede tener consecuencias negativas, lo que resalta la importancia de una restricción lateral efectiva, una variable que también fue muy relevante en las simulaciones desarrolladas en este trabajo.

El comportamiento de la interfaz geomalla-suelo es otro factor importante que determina el rendimiento general del sistema reforzado. Según los resultados experimentales de [10], obtenidos a partir de ensayos de extracción, el contenido de agua y el grado de compactación tienen un impacto significativo en la resistencia de la interfaz. El aumento del contenido de humedad reduce significativamente la resistencia a la extracción y la cohesión de la interfaz debido a una adhesión más débil y una menor fricción entre las partículas de suelo y la geomalla. Por el contrario, a medida que aumenta el grado de compactación de la masilla, tanto la adhesión como el ángulo de fricción interfacial aumentan, lo que indica que la compactación del suelo y el control de la humedad son factores de diseño que pueden mejorar significativamente la transferencia de tensiones. Este comportamiento explica las diferencias observadas en el modelo numérico, donde la pérdida de retención lateral se asocia con una menor eficiencia del refuerzo, especialmente en condiciones de saturación.

Además, los resultados de [10], complementan estos resultados al demostrar que la combinación de estabilización química (mediante aditivos espesantes, estabilizadores líquidos y cemento Portland) con refuerzo físico mediante geomallas biaxiales permite una redistribución más uniforme de las tensiones en las estructuras de soporte, reduciendo las deformaciones diferenciales y aumentando la resistencia general. Este enfoque híbrido no solo mejora el rendimiento de la estructura, sino que también aumenta la sostenibilidad al permitir el uso de suelos locales de baja calidad, lo cual concuerda con el objetivo ambiental de este trabajo.

El comportamiento de la interfaz geomalla-suelo es otro factor crucial para el rendimiento general de un sistema de refuerzo. Según los resultados experimentales de [11], obtenidos a partir de ensayos de extracción, el contenido de agua y la relación de compactación influyen decisivamente en la resistencia entre las capas. Un aumento del contenido de humedad reduce significativamente la resistencia a la extracción y la

cohesión entre las capas, ya que la unión se debilita y la fricción entre las partículas de suelo y la geomalla se reduce. Por el contrario, al aumentar la relación de compactación del relleno, aumentan tanto la cohesión como el ángulo de fricción entre las capas. Esto sugiere que la compactación del suelo y el control de la humedad son factores de diseño que pueden optimizar significativamente la transferencia de tensiones. Este comportamiento explica los cambios observados en el modelo numérico, donde la pérdida de retención lateral se acompaña de una reducción en la eficiencia del refuerzo, especialmente en condiciones de saturación.

De igual manera [10], complementan estos resultados al demostrar que la combinación de estabilización química (con aditivos densificantes, estabilizadores líquidos y cemento Portland) y reforzamiento físico con geomallas biaxiales permite una redistribución más uniforme de tensiones en las estructuras, reduce las deformaciones diferenciales y aumenta la resistencia general. Este enfoque híbrido no solo mejora el rendimiento de las estructuras, sino que también promueve la sostenibilidad al permitir el uso de suelos locales de baja calidad, lo cual es coherente con el objetivo ambiental de este trabajo.

5. Conclusión

5.1 El análisis numérico del comportamiento mecánico de muros de contención reforzados con geomalla biaxial bajo cargas cíclicas reveló que la falla se concentra consistentemente en el frente de la presa, independientemente de las condiciones de contención o del tipo de carga aplicada. Este resultado confirma que la estabilidad de la estructura depende en gran medida de la continuidad del refuerzo desde el frente y de una contención lateral adecuada.

En vista de los objetivos planteados, la simulación numérica ha demostrado ser una herramienta eficaz para predecir fallas, identificar zonas críticas y complementar los resultados de las pruebas físicas, proporcionando información importante para optimizar el diseño de los muros de contención. Además, se ha demostrado que los factores de seguridad (FS) se mantuvieron por debajo de la unidad en todos los escenarios analizados, lo que pone de

relieve la necesidad de refuerzo adicional y estrategias de diseño más detalladas.

Como limitación del estudio, se reconoce que los modelos utilizados corresponden a condiciones simplificadas y materiales específicos, por lo que no cubren todos los escenarios reales. En este sentido, estudios futuros deberían considerar diferentes tipos de geosintéticos, pruebas a gran escala y variaciones en las frecuencias de carga para reflejar mejor el tráfico y la actividad sísmica.

Antes de diseñar un sistema para mediciones directas en modelos experimentales, se deben verificar las siguientes condiciones:

- a) Asegurar que la capa de protección lateral estabilice todo el sistema y garantice la continuidad del suelo tratado. Antes de iniciar la campaña de medición directa, verificar en los modelos físicos que no se produzcan desplazamientos característicos de la estabilidad de taludes.
- b) El estado de tensión asociado a fuerzas externas y cargas cíclicas o sísmicas debe representarse de forma que visualice los fenómenos relacionados con los cambios internos del material: presión de poro, comparabilidad y licuefacción.

5.2 Contribución a la sostenibilidad

Además de los resultados estructurales, el uso de geomallas también ha mostrado beneficios ambientales y de eficiencia:

- Reducción del consumo de hormigón y acero en comparación con muros convencionales. Se ha reportado una reducción del 30-50% en el consumo de hormigón y acero a la misma altura [14] y [17].
- Posibilidad de utilizar tierra local o reciclada como material de relleno. Los proyectos de muros de GRS de gran altura (por ejemplo, de 42 m en China) han utilizado material de relleno de borde 100 % local, eliminando la necesidad de materiales de cantera importados [18].
- En proyectos de refuerzo de carreteras se han

documentado mezclas con hasta un 40 % de material reciclado en el relleno, manteniendo al mismo tiempo los factores de seguridad adecuados [16].

- Permeabilidad del refuerzo, que promueve el drenaje y reduce los procesos de erosión. En este caso, no se suele cuantificar como una "reducción porcentual" de hormigón o acero, sino que se basa en las propiedades hidráulicas:

Las pruebas en muros reforzados muestran que el uso de geomallas puede reducir la presión de poro en el área de relleno en un 50 % en comparación con los muros de hormigón impermeables [15].

También se ha observado que la erosión superficial se reduce en más de un 35 % cuando el diseño permite la infiltración controlada de agua [14].

Aunque no se puede proporcionar una cifra exacta, se pueden utilizar los siguientes valores mostrados en el Cuadro 2.

- 30-50 % menos de hormigón/acero.
- Reducción de la huella de carbono entre un 7 % y un 24 %.
- Hasta un 100 % de relleno in situ o un 40 % de reciclaje.
- Reducción de la erosión y la presión del agua intersticial entre un 35 % y un 50 %.

Cuadro 2. Beneficios sustentables asociados al uso de geomallas biaxiales en muros de contención.

Contribución	Beneficio Sustentable	Datos numéricos / estudio
Reducción del uso de concreto y acero	Disminución del uso de materiales convencionales, así como de emisiones de CO ₂ .	En pavimentos reforzados con geomalla, los estudios muestran reducciones del 7 % al 24 % en carbono incorporado (embodied carbón) comparado con pavimentos no reforzados. (TRID)
Posibilidad de emplear suelos locales o reciclados	Posibilita emplear suelos marginales o reciclados que normalmente serían desechados.	En el caso de un muro GRS de 42 m de altura se utilizó relleno marginal proveniente de excavaciones cercanas, reduciendo la necesidad de transporte y materiales

importados.
(SpringerLink)

Permeabilidad del refuerzo, favoreciendo el drenaje y reduciendo procesos erosivos	Favorece la filtración de agua, evitando acumulación de presión intersticial y erosión.	Ensayos pullout en arena limosa muestran que después de ciclos, la resistencia se reduce menos si hay buen drenaje efectivo; además, los desplazamientos laterales se reducen apreciablemente con refuerzo adecuado. (MCEJ)

En este contexto, se confirman las propuestas de [5] y [6], que destacan los geosintéticos como una solución prometedora para reducir la huella de carbono y promover la construcción sostenible. El uso de geomallas representa una alternativa que contribuye a reducir el consumo de materiales convencionales como el hormigón y el acero, disminuyendo la huella de carbono y permitiendo el uso de suelos locales o reciclados. Estas ventajas subrayan la importancia de considerar criterios ambientales en el diseño y la construcción de infraestructura geotécnica.

Los resultados de este estudio muestran que las propiedades mecánicas de los muros de contención reforzados con geomallas bajo cargas cíclicas dependen en gran medida de la posición del refuerzo entre la base y la corona del talud, considerando especialmente la restricción del material y la carga adicional a la que estarán sometidos. Variables como la posición de la cimentación con respecto al muro, el estado de la geomalla y la distribución de tensiones en el suelo también influyen en las propiedades del muro.

En resumen, el trabajo contribuye al conocimiento en el campo de la ingeniería geotécnica sustentable al demostrar que la integración de geomallas en muros de contención no sólo mejora el desempeño de las estructuras, sino que también promueve el desarrollo de infraestructura más amigable con el medio ambiente.

6. Patentes

Los autores declaran que no existen patentes válidas, derivadas, en trámite ni infringidas para los resultados, procedimientos o métodos descritos en este manuscrito. Todo

el contenido se basa en los principios de la ingeniería geotécnica y civil, así como en los análisis e interpretaciones de los autores. Este trabajo se elaboró en colaboración con académicos y científicos de renombre con intereses comerciales en los materiales, procedimientos y tecnologías presentados.

Fuentes de financiamiento

Este estudio no recibió apoyo financiero externo de organizaciones públicas o privadas, ni de instituciones internacionales. Los recursos utilizados fueron recursos propios de los autores y equipo proporcionado por la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Querétaro (UAQ) dentro de su Programa de Investigación en Infraestructura y Materiales Geotécnicos.

Sin embargo, agradecemos a MacaFerri México por su apoyo técnico, que proporcionó información detallada sobre las características mecánicas, geométricas y de desempeño de las geomallas utilizadas en los modelos analizados. Esta colaboración no implicó ninguna compensación económica, no influyó en los resultados ni en las conclusiones del estudio y se limitó estrictamente a proporcionar datos técnicos y materiales de referencia necesarios para la mejora metodológica.

Agradecimientos

Los autores expresan su más sincero agradecimiento a la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Querétaro, cuyo respaldo académico, logístico y técnico fue esencial para la ejecución de las etapas experimentales, analíticas y de validación del estudio. Asimismo, se extiende el reconocimiento a MacaFerri México, por su colaboración al compartir información técnica sobre las propiedades de las geomallas biaxiales y uniaxiales utilizadas en el proyecto, lo cual permitió una mejor comprensión del comportamiento de estos materiales dentro de los sistemas de suelo reforzado analizados.

Durante la preparación y revisión del manuscrito, los autores emplearon la herramienta de inteligencia artificial ChatGPT (GPT-5, OpenAI), con el propósito de apoyo en la redacción académica, estructuración del texto y revisión de estilo. Todo el contenido generado fue cuidadosamente revisado, editado y validado por los autores, quienes asumen plena responsabilidad sobre la precisión, interpretación y originalidad del material presentado en esta publicación.

Conflictos de interés

Los autores declaran no tener ningún conflicto de intereses personal, académico, financiero o institucional que pudiera haber influido en los resultados, el análisis o las conclusiones de este estudio. Los financiadores, colaboradores o instituciones participantes no participaron en el diseño metodológico del estudio, ni en la recopilación, el procesamiento ni la interpretación de los datos, ni en la preparación del manuscrito, ni en la decisión de enviarlo para su publicación.

Abreviaturas

Para facilitar la lectura y comprensión de los términos técnicos utilizados, a continuación, se presentan las abreviaturas más importantes del manuscrito:

GRS: Suelo Reforzado con Geosintéticos. Sistema de suelo y materiales sintéticos utilizado para mejorar la estabilidad de una estructura.

MSE: Suelo Mecánicamente Estabilizado. Estructura portante con elementos de refuerzo horizontales distribuidos en un suelo compactado.

PP: Polipropileno. Material termoplástico utilizado frecuentemente en geomallas debido a su alta resistencia química y durabilidad.

HDPE: Polietileno de Alta Densidad. Polímero utilizado en geosintéticos por su rigidez y resistencia a la deformación.

kPa: Kilopascal. Unidad de tensión o presión utilizada para expresar la tensión del suelo.

kN/m: Kilonewton por metro. Unidad utilizada para cuantificar la resistencia o rigidez de los elementos de refuerzo geosintéticos.

CSR: Relación de Tensiones Cíclicas. Parámetro que indica la relación entre la tensión cortante inducida por la carga cíclica y la tensión vertical efectiva.

PGA: Aceleración Máxima del Suelo. El valor máximo de aceleración durante un evento sísmico, utilizado para análisis dinámicos.

ϕ (phi): Ángulo de fricción interna del suelo, parámetro que define su resistencia a los esfuerzos cortantes.

c: Cohesión del suelo, componente independiente de la fricción de la resistencia al corte.

B: Ancho de la base, parámetro utilizado en ensayos de carga cíclica (configuraciones 1B, 2B y 3B).

FSR: Factor de Seguridad Reducido. Factor ajustado a condiciones dinámicas o sísmicas en el análisis de estabilidad.

L/H: Relación entre la longitud del refuerzo y la altura del muro. Indicador de la relación relativa de refuerzo que afecta la estabilidad general del sistema.

UGM: Material Granular No Ligado. Un agregado de base y de capa base caracterizado por comportamiento friccional sin cohesión aparente.

CRST: Ensayo de Rigidez Radial Cíclica. Ensayo de laboratorio diseñado para evaluar la elasticidad y la deformación residual de materiales granulares reforzados bajo carga cíclica.

Estas abreviaturas se utilizan en todo el manuscrito para garantizar la claridad técnica, la precisión terminológica y la coherencia conceptual en la presentación de los resultados y la discusión técnica.

7. Referencias bibliográficas

[1] H. Ahmadi and M. Hajjalilue-Bonab, "Experimental and analytical investigations on bearing capacity of strip footing in reinforced sand backfills and flexible retaining wall," *Acta Geotechnica*, vol. 7, pp. 357–373, 2012.

[2] R. M. Koerner and G. R. Koerner, "Analysis of 320 failed MSE walls reinforced with geosynthetics," *Geotextiles and Geomembranes*, vol. 46, no. 6, pp. 904–912, 2018.

[3] H. Rahmaninezhad and J. Han, "Study of lateral deflection in reinforced soil retaining walls and safety factors," *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, vol. 125, art. 105741, 2019.

[4] G. O. M. Pedroso, G. Ramos, and J. L. da Silva, "Evaluating geosynthetic base stabilization on lateritic gravel and granular material under cyclic moving wheel loads," *Case Studies in Construction Materials*, vol. 17, art. e00880, 2022.

[5] P. Rimoldi, F. Rimoldi, G. Gottardi, and G. Cazzuffi, "Sustainable use of geosynthetics in dykes," *Sustainability*, vol. 13, no. 8, art. 4445, 2021.

[6] A. Cislighi, P. Rimoldi, G. Gottardi, and G. Cazzuffi, "Towards more sustainable materials for geo-environmental engineering: The case of geogrids," *Sustainability*, vol. 13, no. 5, art. 2585,

2021.

[7] N. Shukla, *Geosynthetics and their applications*. Boca Raton: CRC Press, 2017.

[8] Y. Liu, Y. Zhao, D. Zhang, and Z. Liu, "The long-term mechanical performance of geogrid-reinforced soil retaining walls under cyclic footing loading," *Case Studies in Construction Materials*, vol. 16, art. e01642, 2022.

[9] M. S. Alam, B. Fatahi, and H. Khabbaz, "Studies on accumulation of vertical strain in surface soil layers under cyclic loading," *Geomechanics and Geoengineering*, vol. 16, no. 3, pp. 215–229, 2021.

[10] Wen, H., Gou, Y., Yin, L., Najafzadeh, M., & Wu, J. (2025). Experimental study on reinforced retaining walls using stabilized silty clay with geogrid reinforcement. *Case Studies in Construction Materials*, 22, e04682. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2025.e04682>

[11] Wang, Z., Chen, Y., Xie, Y., & Xue, J. (2023). Investigation of geogrid-reinforced unbound granular material behavior using constant radial stiffness triaxial tests. *Construction and Building Materials*, 406, 133347. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.133347>

[12] Wang, Z., Zhang, G., Yang, G., Qin, Y., & Zhou, S. (2022). Experimental study on geogrid–soil interface properties based on pullout tests: A case study. *Geotextiles and Geomembranes*, 50(3), 437–448. <https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2022.03.004>.

[13] Goud, G. N., & Umashankar, B. (2021). Assessment of embodied carbon for geogrid-reinforced flexible pavements. *International Journal of Pavement Engineering*, 24(8), 1620–1632. <https://doi.org/10.1080/10298436.2021.1873241>

[14] Koerner, R. M., & Koerner, G. R. (2018). Geosynthetic-reinforced segmental retaining walls: Case histories and lessons learned. *Geotextiles and Geomembranes*, 46(6), 725–739. <https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2018.07.007>

[15] Liu, C., Yang, G., & Zhang, G. (2022). Experimental study on drainage and filtration performance of geogrid-reinforced soil retaining walls. *Case Studies in Construction Materials*, 16, e00987. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e00987>

[16] Pedroso, D. M., Ferreira, R., & Costa, C. (2022). Sustainable use of recycled soils in geogrid-reinforced retaining walls: Experimental and numerical assessment. *Case Studies in Construction Materials*, 17, e01103. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01103>

[17] Rimoldi, P., Rimoldi, M., & Lima, R. (2021). Geosynthetics for sustainable construction: Reducing carbon footprint in geotechnical applications. *Sustainability*, 13(15), 8274. <https://doi.org/10.3390/su13158274>

[18] Zhang, Y., Wu, J., & Gou, Y. (2024). Case study

on the construction of a 42 m high geogrid-reinforced
soil retaining wall with marginal fill. *Soils and
Foundations*, 64(2), 123–136.
<https://doi.org/10.1016/j.sandf.2024>

Películas delgadas de Co_3O_4 : un semiconductor clave para diversas aplicaciones

Co_3O_4 Thin Films: A Key semiconductor for Various Applications

Barragán-Méndez, Haalf Irving*, Acosta-Silva, Yuliana de Jesús** y Méndez-López, Arturo**.

*Afiliación: Maestría en Nanotecnología, Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Querétaro, Centro Universitario, Santiago de Querétaro 76010, QRO, Mexico **

*Cuerpo Académico de Nanotecnología y su aplicación (UAQ-CA-160), Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Querétaro, Cerro de las Campanas s/n, Las Campanas, Querétaro 76010, México ***

yuliana.dejesus.acosta@uaq.mx; <https://orcid.org/0000-0003-0744-1290>

arturo.mendez@uaq.mx; <https://orcid.org/0000-0003-0621-6681>

Resumen:

En este estudio, se sintetizaron películas delgadas de óxido de cobalto (Co_3O_4) utilizando una técnica sencilla de recubrimiento por inmersión seguida de un tratamiento térmico. Las propiedades estructurales y ópticas de las películas se caracterizaron mediante difracción de rayos X (XRD) y espectroscopia UV-Visible. Los resultados de la XRD confirmaron la formación de una fase espinela cúbica con alta cristalinidad y un tamaño medio de cristalito de aproximadamente 14 nm. Las mediciones ópticas revelaron bandas de absorción distintas asociadas con las transiciones electrónicas $\text{O}^{2-} \rightarrow \text{Co}^{2+}$ y $\text{O}^{2-} \rightarrow \text{Co}^{3+}$, y la banda prohibida óptica estimada osciló entre 1,4 y 3,6 eV, dependiendo del tipo de transición electrónica. El rendimiento fotocatalítico de las películas de Co_3O_4 se evaluó mediante la degradación del azul de metileno bajo luz visible, logrando una tasa de degradación del 79.38 % después de 120 minutos. Estos hallazgos indican que las películas delgadas de Co_3O_4 poseen características estructurales y ópticas favorables para aplicaciones fotocatalíticas y pueden considerarse materiales respetuosos con el medio ambiente para el tratamiento de aguas residuales y los sistemas de conversión de energía.

Palabras clave: Óxido de cobalto; Películas finas; Fotocatálisis; Banda prohibida; Degradación del azul de metileno

Abstract:

In this study, thin films of cobalt oxide (Co_3O_4) were synthesized using a simple dip-coating technique followed by thermal treatment. The structural and optical properties of the films were characterized by X-ray diffraction (XRD) and UV-Visible spectroscopy. The XRD results confirmed the formation of a cubic spinel phase with high crystallinity and an average crystallite size of approximately 14 nm. Optical measurements revealed distinct absorption bands associated with the electronic transitions $\text{O}^{2-} \rightarrow \text{Co}^{2+}$ and $\text{O}^{2-} \rightarrow \text{Co}^{3+}$, and the estimated optical band gap ranged between 1.4 and 3.6 eV, depending on the type of electronic transition. The photocatalytic performance of the Co_3O_4 films was evaluated through the degradation of methylene blue under visible light, achieving a degradation rate of 79.38% after 120 minutes. These findings indicate that Co_3O_4 thin films possess favorable structural and optical characteristics for photocatalytic applications and can be considered as environmentally friendly materials for wastewater treatment and energy conversion systems.

Keywords: Cobalt oxide; Thin films; Photocatalysis; Band gap; Methylene blue degradation

1. Introducción

La creciente disminución de los combustibles

fósiles y el agravamiento de los problemas asociados con la contaminación ambiental han impulsado la necesidad de construir sistemas energéticos más limpios y sostenibles. Este desafío global ha motivado a la

comunidad científica a buscar alternativas que permitan reducir la dependencia de los recursos no renovables y, al mismo tiempo, mitigar el impacto ambiental de las actividades industriales. En este contexto, el hidrógeno se ha consolidado como uno de los vectores energéticos más prometedores para alcanzar la neutralidad de carbono, debido a su alta densidad energética y a que sus productos de combustión son completamente inocuos para el medio ambiente [1–4]. Sin embargo, el uso masivo de tecnologías basadas en hidrógeno aún enfrenta importantes limitaciones, particularmente en los procesos de almacenamiento y conversión, donde la seguridad y la eficiencia representan cuellos de botella tecnológicos [5,6]. Entre los diferentes materiales propuestos para el almacenamiento de hidrógeno, el amoníaco borano (NH_3BH_3 , AB) ha despertado gran interés por su notable capacidad de almacenamiento (19.6 % en peso de H_2) y las condiciones moderadas necesarias para su hidrólisis. Aun así, su aplicación práctica exige el desarrollo de sistemas catalíticos más activos y estables, especialmente catalizadores avanzados capaces de superar la lentitud cinética que caracteriza la reacción de liberación de hidrógeno [7,8].

De manera paralela a los retos energéticos, la acelerada industrialización y la contaminación derivada de los procesos productivos han incrementado la presencia de compuestos orgánicos tóxicos en el medio ambiente. Entre los principales contaminantes liberados por la industria se encuentran los fenoles, amoníaco, compuestos orgánicos volátiles, sustancias cloradas, compuestos nitroaromáticos, fertilizantes y colorantes [9–12]. En particular, los colorantes y los fenoles nitroaromáticos representan un riesgo elevado debido a su gran solubilidad en agua y su notable estabilidad química, lo que dificulta su eliminación mediante tratamientos convencionales [13,14]. Un ejemplo emblemático es el 4-nitrofenol (NP), compuesto capaz de provocar efectos adversos como náuseas, cefaleas, somnolencia e incluso cianosis; su exposición prolongada puede afectar seriamente el sistema nervioso [15–17]. En muchas plantas industriales las descargas de agua residual arrastran cantidades importantes de compuestos fenólicos. Estas sustancias, entre ellas el fenol y derivados nitro aromáticos, son nocivas para los organismos acuáticos y pueden afectar también la salud de las personas [18–20]. El tratamiento de estas sustancias resulta difícil y continúa siendo uno de los retos más atendidos.

Diversas estrategias se han desarrollado para

abordar este problema, incluyendo procesos de oxidación foto-Fenton [21], degradación electroquímica [22], métodos biológicos [23] y, más recientemente, la fotocatalisis heterogénea [24–27]. La fotocatalisis heterogénea ha ido ganando importancia en los últimos años por su eficacia y su bajo costo, además de aprovechar de forma directa la luz solar. Gracias a ello, se ha consolidado como una alternativa para eliminar compuestos orgánicos. La búsqueda de materiales semiconductores que traten la degradación ha ido en aumento.

Entre los distintos óxidos metálicos de transición que se han explorado para aplicaciones energéticas y ambientales, el óxido de cobalto (Co_3O_4) ha despertado un creciente interés debido a su combinación de propiedades físicas y químicas sobresalientes. Este material, de aspecto negro y naturaleza cristalina, es un semiconductor tipo p con elevada estabilidad y una notable capacidad de absorción en el rango visible, lo que lo convierte en un candidato atractivo para procesos fotocatalíticos [28–31]. Su estructura espinela cúbica se basa en un empaquetamiento compacto de iones óxido con una constante de red cercana a 0.808 nm, donde los iones Co^{2+} y Co^{3+} ocupan posiciones tetraédricas (8A) y octaédricas (16B), respectivamente [32]. Esta configuración estructural facilita múltiples transiciones redox ($\text{Co}^{2+}/\text{Co}^{3+}/\text{Co}^{4+}$) que promueven una transferencia eficiente de carga y la generación de vacancias de oxígeno, fenómenos estrechamente relacionados con su alta actividad fotocatalítica [30,42,43].

Co_3O_4 es reconocido como un semiconductor de tipo p con una banda prohibida amplia, en el rango de 1.29 a 5 eV, que le permite responder tanto a radiación ultravioleta como visible [33]. Además de su potencial fotocatalítico, este material ha demostrado un desempeño sobresaliente en aplicaciones electroquímicas, incluyendo supercapacitores [34], baterías [35] y sensores de gases [36], donde su estabilidad frente a la corrosión y su versatilidad redox resultan altamente ventajosas.

Diversos estudios han evidenciado que la presencia de vacancias de oxígeno (V_O) en la red de Co_3O_4 mejora la separación de los portadores de carga fotoinducidos y reduce la recombinación de pares electrón-hueco, incrementando así su eficiencia fotocatalítica [37–41].

La actividad fotocatalítica del Co_3O_4 se encuentra estrechamente ligada a parámetros como la energía de banda prohibida, la cristalinidad, la morfología y la densidad de vacancias de oxígeno. En este contexto, la degradación del colorante azul de metileno (AM) se utiliza con frecuencia como reacción modelo para evaluar el desempeño fotocatalítico de películas delgadas y

nanopartículas. El AM es un colorante catiónico de alta estabilidad y baja biodegradabilidad, lo que lo convierte en un contaminante representativo de los efluentes industriales provenientes del sector textil. Su eliminación mediante fotocátalisis se basa en la generación de pares electrón–hueco en el semiconductor, que a su vez producen especies reactivas de oxígeno capaces de oxidar las moléculas orgánicas hasta su mineralización. La utilización de Co_3O_4 en esta reacción modelo no solo permite examinar su eficiencia como fotocatalizador bajo luz visible, sino también establecer correlaciones entre sus propiedades estructurales, ópticas y morfológicas.

Por lo tanto, este trabajo tiene como propósito principal la síntesis y caracterización de películas delgadas de Co_3O_4 , así como la evaluación de su desempeño fotocatalítico en la degradación del azul de metileno. Los resultados obtenidos a partir de las técnicas de XRD, UV–Vis y degradación fotocatalítica permitirán comprender la relación entre la estructura del material y su actividad fotocatalítica, aportando información valiosa para el diseño de recubrimientos semiconductores eficientes y ambientalmente sostenibles, cada experimento se realizó por triplicado para asegurar la reproducibilidad de los resultados.

2. Materiales y métodos

Se utilizó nitrato de cobalto hexahidratado de la marca Merck (Figura 2), agua desionizada y etanol de la marca J.T. Baker (Figura 3).

La síntesis de las películas delgadas de Co_3O_4 se realizó mediante el método sol gel. En un vaso de precipitados de 250 ml se agregaron 20 ml de etanol y posteriormente se adicionaron 1.46 gramos de nitrato de cobalto hexahidratado y la solución se mantuvo en agitación constante durante 1 hora a 50 °C para asegurar la disolución completa del precursor del Co_3O_4 . Posteriormente a la solución anterior se le adicionó una cierta cantidad de agua desionizada y la reacción se mantuvo en agitación constante durante 1 hora. Finalmente, la solución se enfrió a temperatura ambiente y se guardó en el refrigerador para su madurado durante 24 horas. Las películas delgadas se prepararon mediante el método de inmersión usando el sistema que se muestra en la Figura 6 y Figura 7. Las películas se depositaron en sustratos de vidrio. Los sustratos de vidrio limpios

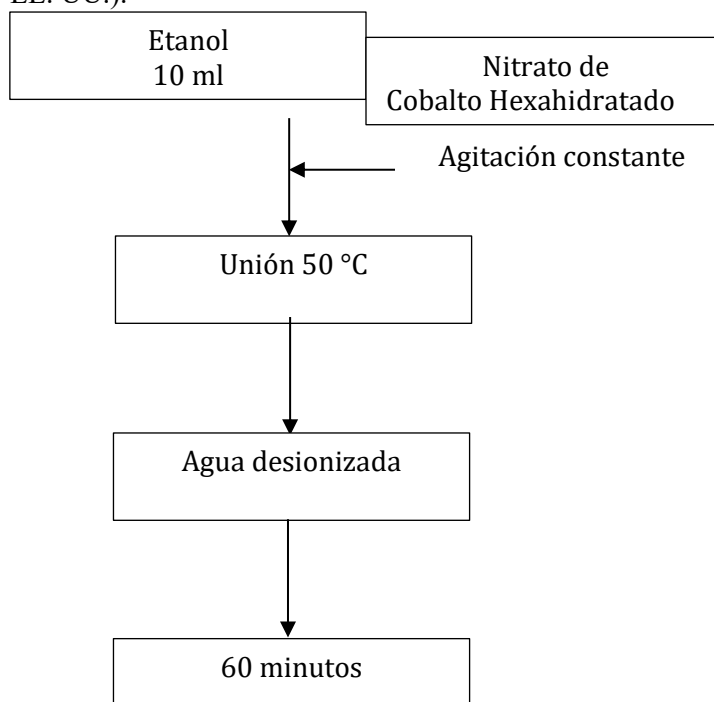
se sumergieron en la solución precursora de Co_3O_4 a una velocidad de 2 mm/s, se realizaron 8 ciclos de recubrimiento, las películas recubiertas se mantuvieron secas a 100 °C durante 5 minutos, posteriormente se enfriaron durante 10 minutos por cada ciclo de recubrimiento (Figura 8). Finalmente, las películas fueron calcinadas a 500 °C durante 1 hora en atmósfera de aire (Figura 9).

Caracterización estructural y óptica de las películas delgadas

La fase cristalina de las películas delgadas de Co_3O_4 fue determinada mediante difracción de rayos X utilizando un difractómetro Rigaku SmartLab que cuenta con una fuente de rayos X de ánodo rotatorio Photon Max de alto flujo (9 kW) que emplea radiación Cu-K α con una longitud de onda de 0.15405 nm en el rango $10 \leq 2\theta \leq 70^\circ$. Las propiedades ópticas fueron obtenidas utilizando espectrofotómetro UV-Vis Evolution 220 (Thermo Scientific, Waltham, MA, EE. UU.) en el rango de 200-1100 nm.

Evaluación de la actividad fotocatalítica

La actividad fotocatalítica de la película delgada de óxido de cobalto se estimó mediante la degradación de azul de metileno bajo luz visible a temperatura ambiente. Para ello, se llenó una celda de cuarzo convencional con 3 mL de solución de MB. Posteriormente, se introdujo en la celda una muestra de Co_3O_4 . La luz de irradiación se generó con una lámpara de luz visible. La celda de cuarzo y la lámpara estaban separadas por 3 cm. La actividad fotocatalítica después de las pruebas de fotodegradación fue determinada mediante espectroscopía de UV-vis, utilizando un espectrofotómetro UV-Vis Evolution 220 (Thermo Scientific, Waltham, MA, EE. UU.).



Fotocatálisis, FI-UAQ.

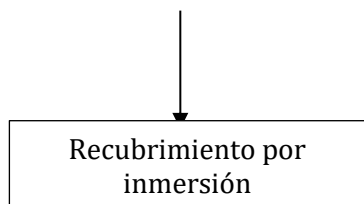


Figura 1a: Diagrama de síntesis.

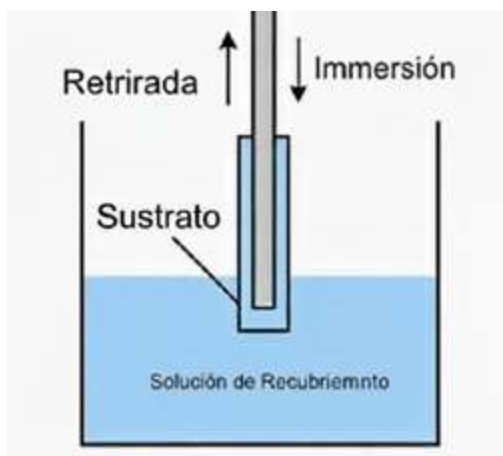


Figura 1b: Diagrama simbólico del proceso de recubrimiento por inmersión.



Figura 3: Alcohol Etílico imagen capturada laboratorio de Nanotecnología y Fotocatálisis, FI-UAQ.



Figura 2: Reactivo de Nitrato de Cobalto imagen capturada laboratorio de Nanotecnología y



Figura 4: Se peso Nitrato de Cobalto Hexahidratado.

inmersión imagen capturada laboratorio de Nanotecnología y Fotocatálisis, FI-UAQ.



Figura 5: Solución final imagen capturada laboratorio de Nanotecnología y Fotocatálisis, FI-UAQ.

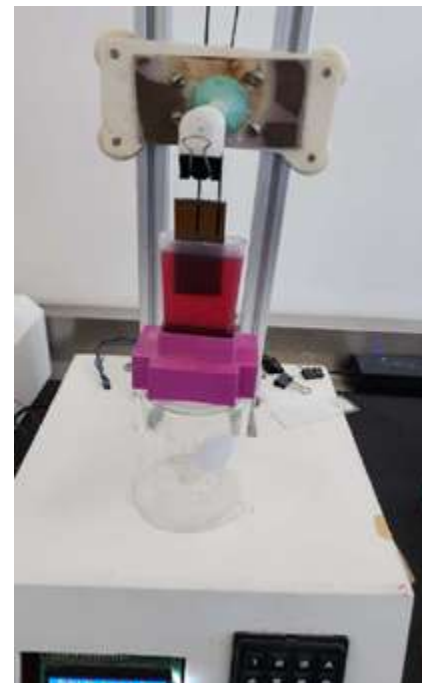


Figura 7: Recubrimiento de películas delgadas imagen capturada laboratorio de Nanotecnología y Fotocatálisis, FI-UAQ.

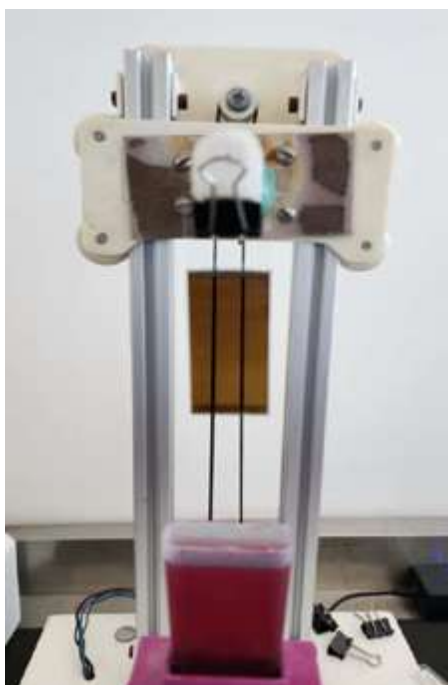


Figura 6: Inicio del sistema de recubrimiento por



Figura 8: Enfriado de películas delgadas imagen

capturada laboratorio de Nanotecnología y Fotocatálisis, FI-UAQ.



Figura 9: Calcinación de películas delgadas imagen capturada laboratorio de Nanotecnología y Fotocatálisis, FI-UAQ.

Una vez concluida la calcinación se apagaba la mufla y se dejaban las muestras dentro de la mufla, al día siguiente se sacaba la muestra de la mufla y se etiquetaba (Figura 10) para posteriormente realizar sus caracterización óptica y estructural.



Figura 10: Etiquetado de películas delgadas imagen capturada laboratorio de Nanotecnología y Fotocatálisis, FI-UAQ.

3. Resultados

3.1. Estudio estructural

Para analizar la estructura cristalina de las nanopartículas de Co_3O_4 , se empleó la espectroscopia de difracción de XRD. La alta cristalinidad observada en el patrón XRD puede atribuirse al tratamiento térmico a 500°C , el cual favorece la formación completa de la fase espinela y reduce los defectos estructurales. El patrón XRD muestra picos definidos en $2\theta = 31.2^\circ, 36.8^\circ, 38.6^\circ, 44.8^\circ$ y 59.3° , correspondientes a los planos (220), (311), (222), (400) y (511) de la fase espinela del Co_3O_4 (JCPDS No. 42-1467). El tamaño promedio de cristalito fue de 14.2 ± 1 nm, calculado mediante la ecuación de Scherrer a partir de tres mediciones independientes, lo que confirmó la formación de nanocristalitos de Co_3O_4 dentro de las películas delgadas, como se muestra en la Figura 11. Este patrón distintivo es un claro indicador de la disposición cristalina única de la espinela. Además, los picos nítidos y bien definidos sugieren un alto grado de cristalinidad. Los picos más amplios pueden deberse a diversos factores, como las dimensiones nanométricas de los cristales, los defectos estructurales o las tensiones de la red cristalina. Confirmamos la síntesis de las nanopartículas de Co_3O_4 mediante la alineación de los picos y la detección de los picos característicos con la tarjeta JCPDS #42-1467.

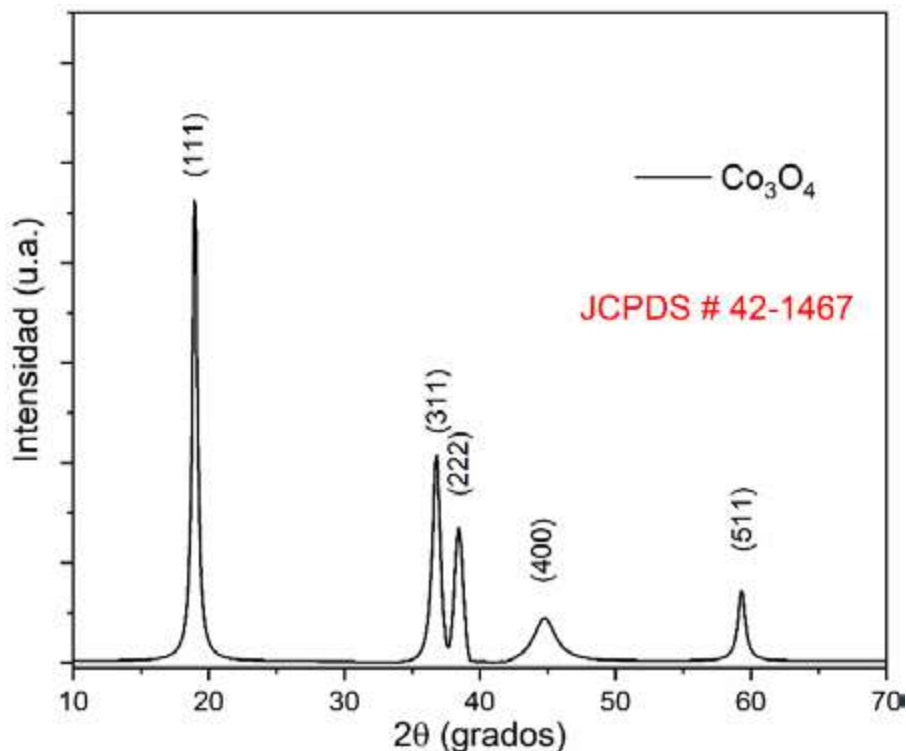
3.2. Estudio óptico

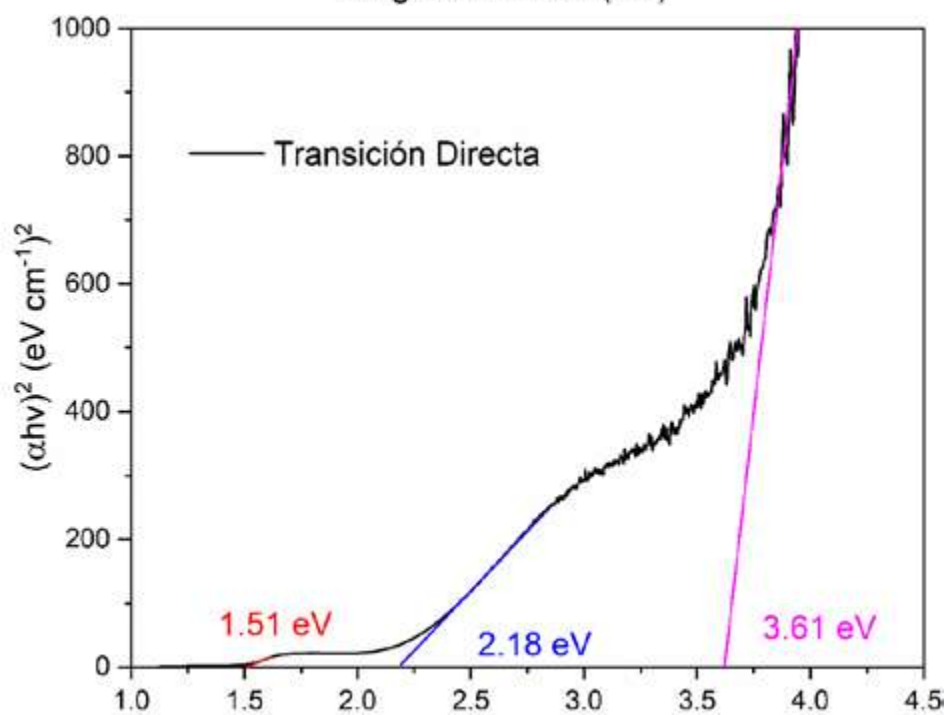
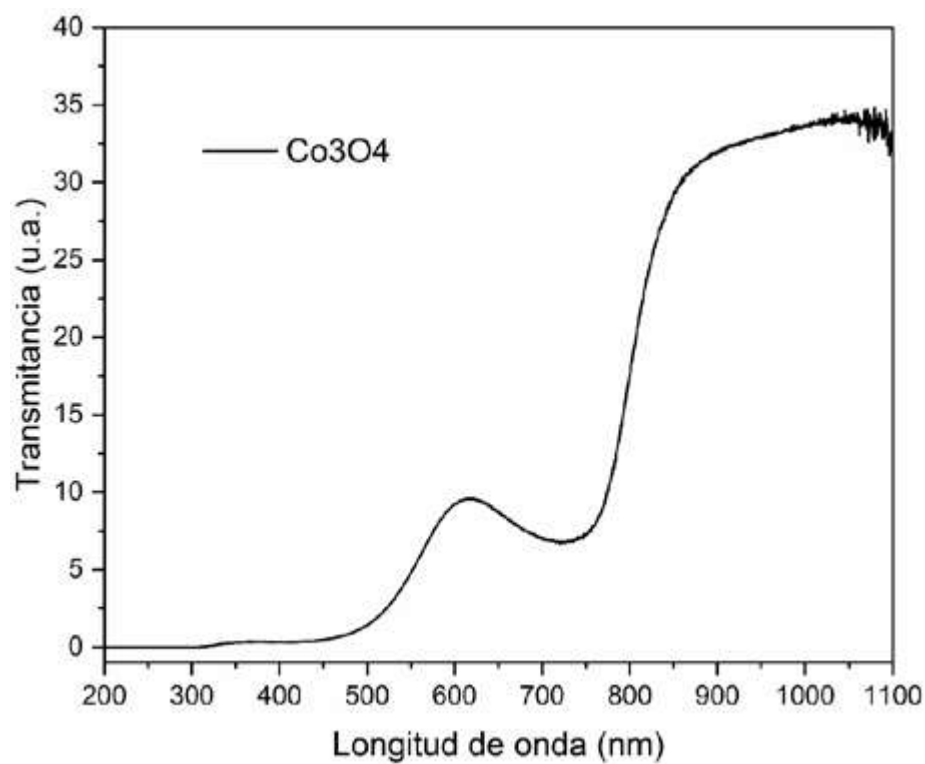
Las propiedades ópticas de las nanopartículas de Co_3O_4 se estudiaron mediante espectroscopia de transmitancia UV-Vis en el rango de 200 a 1100 nm a temperatura ambiente. La Figura 12 muestra el espectro UV-Vis de las nanopartículas de Co_3O_4 . Como se muestra en la figura 12, se encontraron bandas de transmitancia prominentes en los rangos de longitud de onda de 300 a 400 nm y de 500 a 700 nm. Se detectaron dos picos intensos a 356 y 615 nm, asignados a los procesos de transferencia de carga $\text{O}^{2-} \rightarrow \text{Co}^{2+}$ y $\text{O}^{2-} \rightarrow \text{Co}^{3+}$, respectivamente [44,45]. Estas transiciones electrónicas se observan con mayor intensidad debido al tamaño nanométrico de los cristallitos ($\approx 14.2 \pm 1$ nm), el cual genera confinamiento cuántico y modifica la interacción de la luz con la superficie del material.

La energía de la banda prohibida óptica de las nanopartículas de Co_3O_4 se estimó a partir del coeficiente de absorción (α) y la energía del fotón ($h\nu$) utilizando la relación de Tauc mostrada en las referencias [46,47], $(\alpha h\nu)^2 = k(h\nu - E_g)$, donde k representa la constante de proporcionalidad y n representa la transición óptica o electrónica (con valores 2, 1/2, 3 o 3/2), como se expresa en la referencia [48]. Aquí, $n = 2$ se toma para medir la banda prohibida óptica directa de las nanopartículas de Co_3O_4 . Las tres líneas extrapoladas (mostradas en la Figura 13) al coeficiente de absorción cero representaron las energías de la banda prohibida de 1,51 eV, 2.18 eV y

3.61 eV para la banda prohibida directa.

Mientras que para la transición indirecta $n = 1/2$, los valores calculados de banda para las películas delgadas de Co_3O_4 fueron de 1.44 eV, 1.7 eV y 2.85 eV (Figura 14). Se puede observar que las brechas de banda ópticas calculadas para las nanopartículas de Co_3O_4 con 2 y 1/2 son del orden de 1.51 eV, 2.18 eV, 3.61 eV y 1.44 eV, 1.70 eV, 2.85 eV respectivamente. Las diferencias entre los valores de brecha de banda directa e indirecta pueden deberse a efectos de confinamiento cuántico, estados superficiales, efectos de distribución de tamaño y transiciones entre bandas. Además, estos factores son esenciales para interpretar con precisión las propiedades ópticas en sistemas de nanocristales [49].





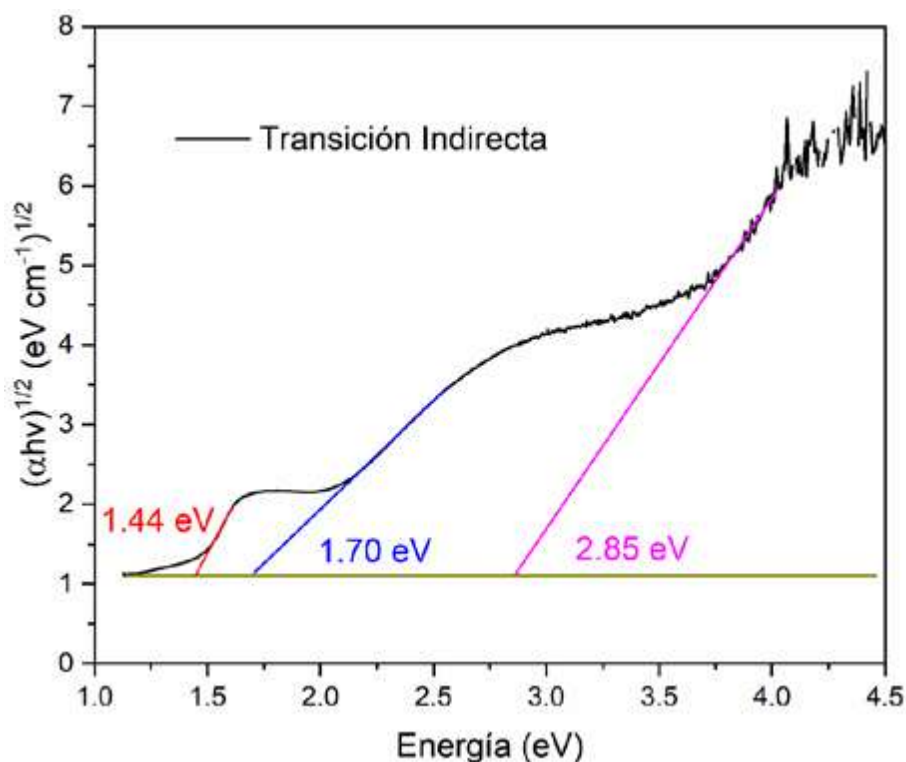


Figura 14. Banda prohibida óptica indirecta de películas delgadas de Co_3O_4 .

3.3. Proceso de fotocátalisis

Las propiedades fotocatalíticas de las películas delgadas de Co_3O_4 se examinaron observando la degradación de AM bajo luz visible. En este proceso, cuando el fotocatalizador absorbe suficiente energía, los electrones son promovidos rápidamente a la banda de conducción, mientras que se forman huecos en la banda de valencia. Esta transferencia de carga genera radicales hidroxilo y superóxido en la solución; estos potentes radicales facilitan la degradación de contaminantes [50]. El proceso fotocatalítico se probó para la descomposición de AM. El experimento consistió en mezclar la solución de AM y agregar películas delgadas (Figura 15) y exponerla a luz visible. Mediante un análisis de absorbancia basado en el tiempo, medimos las capacidades fotocatalíticas de las películas delgadas de Co_3O_4 (Figura 16), la degradación promedio del azul de metileno fue de 79.4 ± 2.0 % tras 120 minutos de irradiación, considerando tres ensayos consecutivos bajo las mismas condiciones, solo un ensayo se muestra en la Figura 17a. La eficiencia fotocatalítica elevada se relaciona con la buena cristalinidad obtenida durante la calcinación, así como con la adecuada adherencia de las películas al sustrato, lo que facilita la separación de portadores de

carga y la generación de especies reactivas. La buena cristalinidad confirmada por XRD, evidenciada por los picos intensos y estrechos correspondientes a la fase espinela del Co_3O_4 , favorece la movilidad electrónica dentro del material. Esto reduce la recombinación de los pares electrón-hueco generados bajo irradiación visible, lo que mejora la producción de especies reactivas de oxígeno ($\cdot\text{OH}$ y $\text{O}_2\cdot^-$) responsables de la degradación del azul de metileno. Este comportamiento coincide con reportes previos donde materiales con mayor orden estructural presentan mayor eficiencia fotocatalítica debido a una mejor conducción de carga y menor densidad de defectos superficiales [51]. La degradación con películas delgadas de Co_3O_4 es considerablemente superior al observado en la degradación sin catalizador (<5 % bajo las mismas condiciones), lo que confirma la actividad fotocatalítica del material. Además, la eficiencia obtenida se encuentra dentro del rango reportado para otros óxidos metálicos activos bajo luz visible, como ZnO (60–70 %) [52] o CuO (65–75 %) [53], lo que evidencia que el Co_3O_4 sintetizado presenta un desempeño competitivo para la degradación de colorantes orgánicos. La Figura 17b ilustra que $-\ln(C/C_0)$ exhibe una relación lineal con el tiempo de reacción t , lo que indica que la degradación de azul de metileno sigue esencialmente una cinética de pseudo primer orden.



Figura 15. Imagen ilustrativa de AM y película delgada de Co₃O₄.

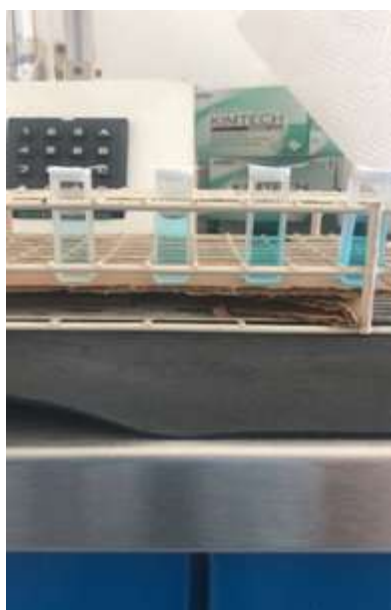


Figura 16. Muestras de la degradación de AM.

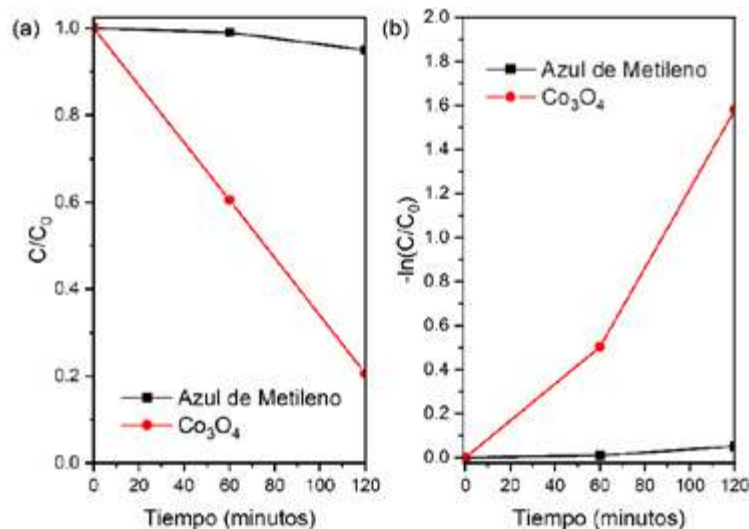


Figura 17. (a) Decoloración del colorante azul de metileno con película delgada de Co₃O₄. (b) Cinética de la degradación fotocatalítica de azul de metileno.

4. Conclusión

Los resultados obtenidos confirman que las películas delgadas de Co₃O₄ pueden ser elaboradas con éxito mediante el método de recubrimiento por inmersión, logrando una fase espinela bien definida y de buena cristalinidad. Esta estructura favorece la movilidad electrónica y la absorción de luz en la región visible, lo que se refleja en una notable eficiencia fotocatalítica durante la degradación del azul de metileno, alcanzando un $79.4 \pm 2.0 \%$ bajo irradiación visible.

El comportamiento fotocatalítico observado sugiere que la combinación de un tamaño de cristalito nanométrico y una superficie homogénea contribuye a una mejor separación de cargas y a la generación de especies reactivas responsables de la degradación del colorante. Estos resultados posicionan al Co₃O₄ como un material prometedor para aplicaciones en remediación ambiental y producción de energía limpia.

Sin embargo, el estudio se limitó al análisis de una única condición de síntesis y a un solo contaminante modelo. Futuras investigaciones podrían explorar el

efecto de la temperatura de calcinación, el número de capas depositadas o la incorporación de dopantes para optimizar el desempeño del material. Asimismo, la comparación con otros semiconductores bajo condiciones idénticas permitirá establecer con mayor precisión la ventaja relativa de las películas de Co_3O_4 frente a otros sistemas fotocatalíticos.

Fuentes de financiamiento

Los autores agradecen al FONDO PARA EL FORTALECIMIENTO DE LA INVESTIGACIÓN, VINCULACIÓN Y EXTENSIÓN (FONFIVE-UAQ-2024, FIN202428) por los recursos otorgados.

Agradecimientos

El alumno de maestría en nanotecnología agradece al apoyo de beca secihti. Los autores desean agradecer a todos los miembros del Laboratorio de Nanotecnología y Fotocatálisis del Campus Aeropuerto de la Universidad Autónoma de Querétaro.

Conflictos de interés

Los autores declaran que no existen conflictos de interés.

5. Referencias bibliográficas

- [1] Ding, L.; Xu, J.; Zhang, Z.; Qi, K.; Jin, G. N,S-doped $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{MXene}$ quantum dots-anchored metal ruthenium: Efficient electrocatalyst for pH-universal hydrogen evolution reaction. *Journal Of Colloid And Interface Science* **2025**, *689*, 137245. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2025.03.034>.
- [2] Wang, X.; Wang, S.; Qi, K.; Liu, S.-Y. Photocatalytic/Ultrasonic Catalytic Degradation of Antibiotic Contaminants and Hydrogen Production with Ni-Doped $\text{ZnFe}_2\text{O}_4/\text{g-C}_3\text{N}_4$ Nanocomposites. *ACS Applied Nano Materials* **2025**. <https://doi.org/10.1021/acsanm.5c00427>.
- [3] Zhang, J.; Zhao, Y.; Qi, K.; Liu, S.-Y. CuInS_2 quantum-dot-modified $\text{g-C}_3\text{N}_4$ S-scheme heterojunction photocatalyst for hydrogen production and tetracycline degradation. *Journal Of Material Science And Technology* **2023**, *172*, 145-155. <https://doi.org/10.1016/j.jmst.2023.06.042>.
- [4] Liao, J.; Li, Y.; Tian, J.; Feng, Y.; Liu, Q.; Li, H. Morphology engineering of hollow core@shell structured $\text{Co}_3\text{O}_4/\text{CuO-NiO}$ for fast hydrogen release from ammonia borane methanolysis. *Journal Of Colloid And Interface Science* **2024**, *680*, 78-87. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2024.10.177>.
- [5] Allendorf, M. D.; Stavila, V.; Snider, J. L.; Witman, M.; Bowden, M. E.; Brooks, K.; Tran, B. L.; Autrey, T. Challenges to developing materials for the transport and storage of hydrogen. *Nature Chemistry* **2022**, *14* (11), 1214-1223. <https://doi.org/10.1038/s41557-022-01056-2>.
- [6] Dawood, F.; Anda, M.; Shafiullah, G. M. Hydrogen production for energy: An overview. *International Journal Of Hydrogen Energy* **2020**, *45* (7), 3847-3869. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.12.059>.
- [7] Li, X.; Zhang, J.; Liu, J.; Wang, S.; Song, Y.; Zhang, J. Design strategies for shape-controlled nanocatalysts for efficient dehydrogenation of ammonia borane: A review. *Journal Of Alloys And Compounds* **2023**, *961*, 171001. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2023.171001>.
- [8] Guan, S.; Liu, Y.; Zhang, H.; Shen, R.; Wen, H.; Kang, N.; Zhou, J.; Liu, B.; Fan, Y.; Jiang, J.; Li, B. Recent Advances and Perspectives on Supported Catalysts for Heterogeneous Hydrogen Production from Ammonia Borane. *Advanced Science* **2023**, *10* (21). <https://doi.org/10.1002/advs.202300726>.
- [9] Sahu, K.; Singh, J.; Mohapatra, S. Catalytic reduction of 4-nitrophenol and photocatalytic degradation of organic pollutants in water by copper oxide nanosheets. *Optical Materials* **2019**, *93*, 58-69. <https://doi.org/10.1016/j.optmat.2019.05.007>.
- [10] Fan, Y.; Wu, D.; Zhang, S.; Zhang, L.; Hu, W.; Zhu, C.; Gong, X. Effective photodegradation of 4-nitrophenol with CuO nano particles prepared by ionic liquids/water system. *Green Chemical Engineering* **2021**, *3* (1), 15-24. <https://doi.org/10.1016/j.gce.2021.07.009>.
- [11] Mohan, B. S.; Ravi, K.; Anjaneyulu, R. B.; Sree, G. S.; Basavaiah, K. $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{RGO}$ nanocomposite photocatalyst: Effective degradation of 4-Nitrophenol. *Physica B Condensed Matter* **2018**, *553*, 190-194. <https://doi.org/10.1016/j.physb.2018.10.033>.
- [12] Yulizar, Y.; Abdullah, I.; Surya, R. M.; Alifa, N. L. Green synthesis of novel YMnO_3 -doped TiO_2 for enhanced visible-light-driven photocatalytic degradation of malachite green. *Journal Of Environmental Management* **2023**, *342*, 118139. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.118139>.
- [13] Pangestu, I.; Apriandanu, D. O. B.; Surya, R. M.; Chandren, S.; Yulizar, Y. Visible-light response $\text{ZnO/CuCo}_2\text{O}_4$ nanocomposite: Vibrational, optical, structural, morphological, photocatalytic, and kinetic analyses. *Ceramics International* **2024**, *50* (18), 34321-34330. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2024.06.251>.

- [14] Wijaya, B.; Apriandanu, D. O. B.; Surya, R. M.; Yulizar, Y.; Sambudi, N. S.; Khalil, M.; Umar, A. Synthesis of novel TiO₂/CeFeO₃ heterojunction using Mugwort (*Artemisia vulgaris*) leaves extracts with enhanced photocatalytic activity under visible light irradiation. *Applied Surface Science Advances* **2024**, *21*, 100599. <https://doi.org/10.1016/j.apsadv.2024.100599>.
- [15] Mulchandani, P.; Hangarter, C. M.; Lei, Y.; Chen, W.; Mulchandani, A. Amperometric microbial biosensor for p-nitrophenol using *Moraxella* sp.-modified carbon paste electrode. *Biosensors And Bioelectronics* **2004**, *21* (3), 523-527. <https://doi.org/10.1016/j.bios.2004.11.011>.
- [16] Rana, D. S.; Kalia, S.; Kumar, R.; Thakur, N.; Singh, R. K.; Singh, D. Two-dimensional layered reduced graphene oxide-tungsten disulphide nanocomposite for highly sensitive and selective determination of para nitrophenol. *Environmental Nanotechnology Monitoring & Management* **2022**, *18*, 100724. <https://doi.org/10.1016/j.enmm.2022.100724>.
- [17] Cui, L.; Bai, Z.; Li, Z.; Liu, Z.; Ma, H.; Chen, X.; Lin, K.; Hao, J.; Cui, Y.; Tian, F. A recyclable photocatalyst Cu₂O/Fe₃O₄@C/Cu nanocomposite for efficient photocatalytic reduction of 4-nitrophenol. *Applied Surface Science* **2022**, *602*, 154403. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2022.154403>.
- [18] Yunarti, R. T.; Emanuel, E.; Buhori, A.; Apriandanu, D. O. B.; Dahnum, D.; Ha, J.-M. Fe/TiO₂-GO Nanosheets as Two-dimensional Photocatalyst in the Application of Rhodamine B Photodegradation. *Optical Materials* **2025**, 116682. <https://doi.org/10.1016/j.optmat.2025.116682>.
- [19] Kusumah, A. D.; Yulizar, Y.; Apriandanu, D. O. B.; Surya, R. M. Fabrication of ZnO and ZnO/CuMoO₄ for the improvement of photocatalytic performance. *Vacuum* **2024**, *222*, 113034. <https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2024.113034>.
- [20] Yulianingrum, A. S.; Surya, R. M.; Apriandanu, D. O. B.; Aqoma, H.; Yulizar, Y. Visible-light ZnO/In₂Cu₂O₅ nanocomposite with increased photocatalytic activity for degradation of malachite green. *Vacuum* **2024**, *226*, 113317. <https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2024.113317>.
- [21] Ismael, M. Photo-Fenton reaction enhanced visible-light activity of p- Photo-Fenton reaction enhanced visible-light activity of p-CuFe₂O₄/n-g-C₃N₄ heterojunction composites synthesized by a simple ultrasonic-assisted route for organic pollutants degradation. *Materials Research Bulletin* **2022**, *151*, 111803. <https://doi.org/10.1016/j.materresbull.2022.111803>.
- [22] Jiang, P.; Zhou, J.; Zhang, A.; Zhong, Y. Electrochemical degradation of p-nitrophenol with different processes. *Journal Of Environmental Sciences* **2010**, *22* (4), 500-506. [https://doi.org/10.1016/s1001-0742\(09\)60140-6](https://doi.org/10.1016/s1001-0742(09)60140-6).
- [23] Kulkarni, M.; Chaudhari, A. Biodegradation of p-nitrophenol by *P. putida*. *Bioresource Technology* **2005**, *97* (8), 982-988. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2005.04.036>.
- [24] Nezamzadeh-Ejhi, A.; Khorsandi, S. Photocatalytic degradation of 4-nitrophenol with ZnO supported nanoclinoptilolite zeolite. *Journal Of Industrial And Engineering Chemistry* **2013**, *20* (3), 937-946. <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2013.06.026>.
- [25] Abbasi, Z.; García-López, E. I.; Marci, G.; Farrokhnia, A.; Shoushtari, M. Z. Photocatalytic degradation of 4-Nitrophenol by g-C₃N₄-MCy: Mechanism study and kinetic modeling. *Journal Of Photochemistry And Photobiology A Chemistry* **2020**, *407*, 113004. <https://doi.org/10.1016/j.jphotochem.2020.113004>.
- [26] Islam, S.; Saniya, M.; Shaheen, S.; Sadiq, I.; Ali, S. A.; Fazil, M.; Ahmad, T. Photocatalytic Perception for Degradation of Macro- and Micro-plastics. En *ACS symposium series*; 2024; pp 45-64. <https://doi.org/10.1021/bk-2024-1489.ch003>.
- [27] Naaz, F.; Ahmad, T. Ag-Doped WO₃ Nanoplates as Heterogenous Multifunctional Catalyst for Glycerol Acetylation, Electrocatalytic and Enhanced Photocatalytic Hydrogen Production. *Langmuir* **2023**, *39* (27), 9300-9314. <https://doi.org/10.1021/acs.langmuir.3c00386>.
- [28] National Center for Biotechnology Information (2025). PubChem Compound Summary for CID 6432046, Cobalt oxide. <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/Cobalt-oxide>.
- [29] Chen, X.; Chen, J.; Qiao, X.; Wang, D.; Cai, X. Performance of nano-Co₃O₄/peroxymonosulfate system: Kinetics and mechanism study using Acid Orange 7 as a model compound. *Applied Catalysis B Environment And Energy* **2007**, *80* (1-2), 116-121. <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2007.11.009>.
- [30] Mosleh, N.; Masteri-Farahani, M.; Mohammadikish, M. New Core-Shell Nanocomposite Based on Co₃O₄Quantum Dots and Fe-Infinite Coordination Polymer with Efficient Charge Separation Properties as Visible Light Photocatalyst and Photo-electrocatalyst. *The Journal Of Physical Chemistry C* **2020**, *124* (35),

- 19289-19303.
<https://doi.org/10.1021/acs.jpcc.0c03880>.
- [31] He, R.; Liang, H.; Li, C.; Bai, J. Enhanced photocatalytic hydrogen production over Co₃O₄@g-C₃N₄ p-n junction adhering on one-dimensional carbon fiber. *Colloids And Surfaces A Physicochemical And Engineering Aspects* **2019**, 586, 124200.
<https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2019.124200>.
- [32] Su, D.; Dou, S.; Wang, G. Single Crystalline Co₃O₄ Nanocrystals Exposed with Different Crystal Planes for Li-O₂ Batteries. *Scientific Reports* **2014**, 4 (1).
<https://doi.org/10.1038/srep05767>.
- [33] Kumar, S.; Kaur, G.; Rawat, M.; Tsang, Y. F.; Lin, K.-Y.; Kim, K.-H. Potential of Piper betle@Co₃O₄ nanoparticles as high-performance photocatalysts for the removal of industrial dyes. *Journal Of Cleaner Production* **2022**, 361, 132242.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.132242>.
- [34] Hao, J.; Peng, S.; Li, H.; Dang, S.; Qin, T.; Wen, Y.; Huang, J.; Ma, F.; Gao, D.; Li, F.; Cao, G. A low crystallinity oxygen-vacancy-rich Co₃O₄ cathode for high-performance flexible asymmetric supercapacitors. *Journal Of Materials Chemistry A* **2018**, 6 (33), 16094-16100. <https://doi.org/10.1039/c8ta06349d>.
- [35] Ma, L.; Chen, S.; Li, H.; Ruan, Z.; Tang, Z.; Liu, Z.; Wang, Z.; Huang, Y.; Pei, Z.; Zapien, J. A.; Zhi, C. Initiating a mild aqueous electrolyte Co₃O₄/Zn battery with 2.2 V-high voltage and 5000-cycle lifespan by a Co(III) rich-electrode. *Energy & Environmental Science* **2018**, 11 (9), 2521-2530. <https://doi.org/10.1039/c8ee01415a>.
- [36] Zhou, T.; Zhang, T.; Deng, J.; Zhang, R.; Lou, Z.; Wang, L. P-type Co₃O₄ nanomaterials-based gas sensor: Preparation and acetone sensing performance. *Sensors And Actuators B Chemical* **2016**, 242, 369-377.
<https://doi.org/10.1016/j.snb.2016.11.067>.
- [37] Althamthami, M.; Temam, E. G.; Temam, H. B.; Hasan, G. G.; Malfi, N. Influence of hole-scavenger and different withdrawn speeds on photocatalytic activity of Co₃O₄ thin films under sunlight irradiation. *Ceramics International* **2022**, 48 (21), 31570-31578.
<https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2022.07.078>.
- [38] Zhang, D. E.; Ren, L. Z.; Hao, X. Y.; Pan, B. B.; Wang, M. Y.; Juan, J.; MA, Li, F.; Li, S. A.; Tong, Z. W. Synthesis and photocatalytic property of multilayered Co₃O₄. *Applied Surface Science* **2015**, 355, 547-552.
<https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2015.04.018>.
- [39] Dhas, C. R.; Venkatesh, R.; Jothivenkatachalam, K.; Nithya, A.; Benjamin, B. S.; Raj, A. M. E.; Jeyadheepan, K.; Sanjeeviraja, C. Visible light driven photocatalytic degradation of Rhodamine B and Direct Red using cobalt oxide nanoparticles. *Ceramics International* **2015**, 41 (8), 9301-9313.
<https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2015.03.238>.
- [40] Saravan, R. S.; Muthukumaran, M.; Mubashera, S. M.; Abinaya, M.; Prasath, P. V.; Parthiban, R.; Mohammad, F.; Oh, W. C.; Sagadevan, S. Evaluation of the photocatalytic efficiency of cobalt oxide nanoparticles towards the degradation of crystal violet and methylene violet dyes. *Optik* **2020**, 207, 164428.
<https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2020.164428>.
- [41] Moridon, S. N. F.; Salehmin, M. I.; Mohamed, M. A.; Arifin, K.; Minggu, L. J.; Kassim, M. B. Cobalt oxide as photocatalyst for water splitting: Temperature-dependent phase structures. *International Journal Of Hydrogen Energy* **2019**, 44 (47), 25495-25504.
<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.08.075>.
- [42] Zhu, C.; Zhu, M.; Sun, Y.; Zhou, Y.; Gao, J.; Huang, H.; Liu, Y.; Kang, Z. Carbon-Supported Oxygen Vacancy-Rich Co₃O₄ for Robust Photocatalytic H₂O₂ Production via Coupled Water Oxidation and Oxygen Reduction Reaction. *ACS Applied Energy Materials* **2019**, 2 (12), 8737-8746.
<https://doi.org/10.1021/acsaeem.9b01712>.
- [43] Zhang, Q.; Yang, P.; Zhang, H.; Zhao, J.; Shi, H.; Huang, Y.; Yang, H. Oxygen vacancies in Co₃O₄ promote CO₂ photoreduction. *Applied Catalysis B Environment And Energy* **2021**, 300, 120729.
<https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2021.120729>.
- [44] Abdallah, A. M.; Awad, R. Study of the Structural and Physical Properties of Co₃O₄ Nanoparticles Synthesized by Co-Precipitation Method. *Journal Of Superconductivity And Novel Magnetism* **2019**, 33 (5), 1395-1404.
<https://doi.org/10.1007/s10948-019-05296-1>.
- [45] V, R. SYNTHESIS AND STRUCTURAL ANALYSIS OF COBALT OXIDE NANOPARTICLES. Scholar: National School Of Leadership.

- <https://jconsortium.com/index.php/scholar/article/view/78>.
- [46] Makula, P.; Pacia, M.; Macyk, W. How To Correctly Determine the Band Gap Energy of Modified Semiconductor Photocatalysts Based on UV–Vis Spectra. *The Journal Of Physical Chemistry Letters* **2018**, 9 (23), 6814-6817. <https://doi.org/10.1021/acs.jpcllett.8b02892>.
- [47] Dhayal, V.; Hashmi, S. Z.; Kumar, U.; Choudhary, B. L.; Dalela, S.; Dolia, S. N.; Alvi, P. A. Optical and electrical properties of biocompatible and novel (CS–GO) polymer nanocomposites. *Optical And Quantum Electronics* **2021**, 53 (1). <https://doi.org/10.1007/s11082-020-02723-9>.
- [48] Makhoulouf, S. A.; Bakr, Z. H.; Aly, K. I.; Moustafa. Structural, electrical and optical properties of Co₃O₄ nanoparticles. *Superlattices And Microstructures* **2013**, 64, 107-117. <https://doi.org/10.1016/j.spmi.2013.09.023>.
- [49] Serpone, N.; Lawless, D.; Khairutdinov, R. Size Effects on the Photophysical Properties of Colloidal Anatase TiO₂ Particles: Size Quantization versus Direct Transitions in This Indirect Semiconductor? *The Journal Of Physical Chemistry* **1995**, 99 (45), 16646-16654. <https://doi.org/10.1021/j100045a026>.
- [50] Parashar, S. D.; Meshram, A. A.; Sontakke, S. M. Electro-photocatalytic degradation processes for dye/colored wastewater treatment. In *Elsevier eBooks*; 2021; pp 833-846. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-821496-1.00031-3>.
- [51] Chauhan, A.; Kumar, R.; Devi, S.; Sonu, N.; Raizada, P.; Singh, P.; Ponnusamy, V. K.; Sudhaik, A.; Mishra, A. K.; Selvasembian, R. Recent advances on Co₃O₄-based nanostructure photocatalysis: Structure, Synthesis, Modification strategies, and Applications. *Surfaces And Interfaces* **2024**, 54, 105152. <https://doi.org/10.1016/j.surfin.2024.105152>.
- [52] Chaudhari, R.; Adhale, M.; Bhapkar, A.; Desai, M.; Bhame, S.; Sartale, S.; Kasabe, S.; Bhongale, C. ZnO Nanoparticles Synthesis by Sacrificial Composite Monolith Method and Enhanced Photocatalytic Degradation of Methylene Blue Dye. *Sustainable Chemistry For The Environment* **2025**, 100295. <https://doi.org/10.1016/j.scenv.2025.100295>.
- [53] Ghosh, A.; Mondal, A. Fabrication of stable, efficient and recyclable p-CuO/n-ZnO thin film heterojunction for visible light driven photocatalytic degradation of organic dyes. *Materials Letters* **2015**, 164, 221-224. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2015.10.148>.

Análisis comparativo de las propiedades físicas y mecánicas de una mezcla de concreto con material fino reciclado del banco REURBA

Comparative analysis of the physical and mechanical properties of a concrete mix with fine recycled material from the REURBA materials bank

Autor: Sanchez Barrera David¹

Coautores: Reyes Araiza José Luis², Saul Antonio Obregón Biosca³, Alejandro Manzano Ramírez⁴, José de Jesús Pérez Bueno⁵

¹Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Querétaro, dsanchez161@alumnos.uaq.mx; ²Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Querétaro, lreyes@uaq.mx; ³Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Querétaro, saul.obregon@uaq.mx; ⁴CINVESTAV, Querétaro amanzano@cinvestav.mx; ⁵CIDETEQ, Querétaro, jperez@cideteq.mx.

Resumen: La generación de residuos de construcción y demolición (RCD) está convirtiéndose en un problema grave medioambiental en Querétaro debido a la remodelación de distintas estructuras y edificaciones. Estos RCD que mayormente tienen como material principal el cemento Portland (CP) pueden ser utilizados para la obtención de agregados reciclados mediante tratamientos que el banco de materiales REURBA posee, ya que se presume que los agregados de origen natural para las mezclas de concreto serán cada vez más complicados de obtener conforme pasen los años. Sin embargo, la elaboración de elementos con agregados reciclados se enfrenta a la búsqueda de un diseño o diseños adecuados para lograr un buen desempeño bajo las cargas que necesita resistir un elemento de concreto. En este trabajo se hace un análisis del agregado fino resultado del concreto reciclado en mezclas de concreto de $F'c=210 \text{ kg/cm}^2$ para su uso a futuro en la industria de la construcción y así obtener la llamada economía circular ya que el empleo de agregados reciclados en el concreto abre nuevas alternativas de reutilización de estos materiales en la preparación de un nuevo concreto en la construcción, así también se estaría apoyando a la sostenibilidad. Dicho análisis se hizo mediante la elaboración de especímenes estándar según la norma NTP 339.183:2013 o ASTM C 192, con agregados de concreto reciclado y agregados naturales para un $F'c=210 \text{ Kg/cm}^2$ de diseño a los 14 días y a los 28 días a partir de su elaboración.

Palabras clave: RCD; REURBA; Concreto reciclado; Material reciclado

Abstract: The generation of construction and demolition waste (CDW) is becoming a serious environmental problem in Querétaro due to the remodeling of different structures and buildings. This CDW, whose main material is Portland cement (PC), can be used to obtain recycled aggregates through treatments that the REURBA materials bank possesses, since it is presumed that natural aggregates for concrete mixtures will become increasingly difficult to obtain as the years go by. However, the elaboration of elements with recycled aggregates faces the search for an adequate design or designs to achieve a good performance under the loads that a concrete element needs to resist. In this work, an analysis of the fine aggregate resulting from recycled concrete in concrete mixtures of $F'c=210 \text{ kg/cm}^2$ is made for its future use in the construction industry and thus obtain the so-called circular economy since the use of recycled aggregates in concrete opens new alternatives for the reuse of these materials in the preparation of new concrete in construction, thus also supporting sustainability. Such analysis will be done by preparing standard specimens according to NTP 339.183:2013 or ASTM C 192, with recycled concrete aggregates and natural aggregates for a design $F'c=210 \text{ Kg/cm}^2$ at 14 days and 28 days after its preparation.

Keywords: CDW; REURBA; Recycled concrete; Recycled material

1. Introducción

Actualmente la industria de la construcción es una de las principales generadoras de residuos sólidos a nivel mundial, no obstante, ha sido uno de los pilares más importantes para el desarrollo de la sociedad [1]. La contaminación siempre está presente en casi todos sus procesos, desde la extracción y fabricación de materiales hasta las diversas actividades que se realizan en las obras civiles. Dicho ciclo de producción provoca el agotamiento de los recursos naturales y no renovables, así como la contaminación del medio ambiente, y un consumo excesivo de energía [1].

La utilización de materiales de construcción está presente desde 1940, cuando Europa se enfrentó a grandes cantidades de escombros resultantes de los bombardeos. Estos escombros comenzaron a ser utilizados como materia prima para la reconstrucción, con resultados que fueron beneficiosos y positivos [2]. Los escombros resultantes incluían materiales cerámicos (ladrillos, cerámicas sanitarias), piedras naturales, plásticos, gomas, etc. que posteriormente se mezclaron con aditivos distintos como cenizas, escorias y humos de sílice [3].

Los residuos de construcción y demolición (RCD) son materiales de desecho generados en actividades de construcción, demolición y reforma de edificaciones, obras civiles y espacios públicos [16] [18] [19]. Estos residuos, considerados inertes y no peligrosos, tienen un alto potencial de aprovechamiento mediante su transformación y reincorporación como materia prima para agregados en la fabricación de nuevos productos [4]. El sector de la construcción de Querétaro genera alrededor de 18 mil toneladas de residuos anuales, siendo la que más residuos genera de acuerdo con la Secretaría de Desarrollo Sustentable (SEDESU) del Estado [5].

Debido a esto, se busca poner en marcha la Norma Técnica Ambiental Estatal que se publicó recientemente y la que establece la gestión adecuada de los Residuos de la Construcción y Demolición (RCD) mediante un tratamiento idóneo para que puedan ser utilizados por diferentes sectores dentro de los Centros Integrales que acogen todas las toneladas generadas diariamente [6].

Las mezclas de concreto con material reciclado se evalúan desde distintos puntos de vistas como lo son: desempeño mecánico, desempeño físico, durabilidad, formas de falla, revenimiento, hidratación del cemento, compactación entre otros [3] [9].

2. Materiales y equipos

2.1 Materiales

Para este trabajo, los agregados naturales utilizados fueron gravas de 3/4" y arena proveniente de las minas que existen en el estado de Querétaro. Por otra parte, para los agregados reciclados usados, estos se obtuvieron del banco de materiales REURBA ubicado en Zibatha. Estos agregados son producto del reciclaje de escombros de concreto, que son triturados y posteriormente separados por tipo de agregado y resistencia del concreto. El material fino (arena) es el que se sustituirá en una mezcla de concreto por material fino de concreto reciclado para una resistencia de $F'c=210 \text{ kg/cm}^2$

En el caso del material grueso natural se consideró un tamaño máximo de agregado (TMA) de 19 mm (3/4"). Se utilizó un intervalo granulométrico correspondiente a un material bien graduado según la norma ASTM C 33 [2] [10].

El proceso de la obtención del análisis granulométrico se explica en la Fig 1.

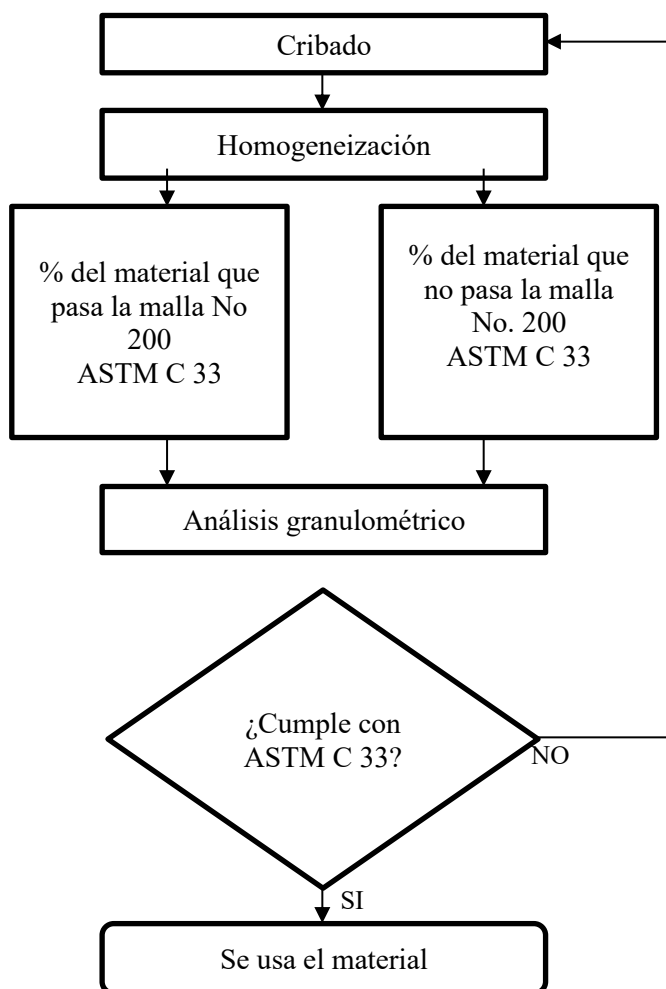


Fig. 1 Proceso granulométrico de agregados.

Para el caso del CP se usará de la marca CEMEX, ya que es la más utilizada en el estado de Querétaro y este cemento cumple con los estándares de calidad y desempeño establecidos en la norma NMX-C-414-ONNCCE, asegurando así que el material es adecuado para su uso en aplicaciones de construcción según los lineamientos nacionales vigentes; con respecto a aditivos, estos no se utilizarán en el proceso de la mezcla.

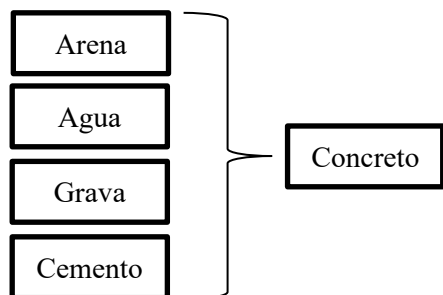


Fig. 2 Materiales para la elaboración del concreto.

2.2 Equipos

- Revolvedora eléctrica de 1/2 saco, marca OAKLAND modelo RE-1360
- Horno de secado, marca RIOSSA modelo H-62 D
- Cuarto de curado, Propio de la Universidad Autónoma de Querétaro
- Máquina de ensayo universal, marca Forney modelo LT-60-VDF
- Báscula digital de precisión de 0.1 gr, marca NIMBUS modelo NBL 820e

3. Metodología

Con el propósito de comparar el material fino natural y el material fino de concreto reciclado primero se cribó el material como se observa en la Fig 3 para luego obtener el % de absorción de cada uno de estos, siguiendo la norma M-MMP-1-05/3, la cual menciona que se utiliza la Ec 1.



Fig. 3 Cribado del material fino de concreto reciclado.

$$W_{ab} = \frac{W_1 - W_s}{W_s} \times 100 \quad \text{Ec. 1}$$

Donde:

W_{ab}= Absorción del material (%).

W₁= Masa del material saturado y superficialmente seco (g).

W_s= Masa del material secado al horno (g).

Esto se aplicó solo para un espécimen de concreto de 10 x 20 cm, dando como resultado una absorción de 13.47%, lo cual es excesivo para un material fino, ya que una absorción estándar de arena varía del .2% al 4% [11].

3.1 Diseño de las mezclas de concreto

Para las mezclas se utilizó una revolvedora de medio saco a la cual se le dio un tiempo de mezclado de ±8 minutos para que la mezcla sea homogénea. Se usó como base el método del ACI (American Concrete Institute) así como también se utilizó la tabla de dosificación de concretos de la Fig. 5, tomando como referencia también lo mencionado por el IMCYC (Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto).

Consiste básicamente en los siguientes pasos:

- 1) Revenimiento necesario
- 2) Cantidad de agua necesaria para el mezclado
- 3) Selección de la relación agua/cemento
- 4) Cantidad de cemento necesaria
- 5) Cantidad de agregado grueso a usar
- 6) Cantidad de agregado fino a usar
- 7) Estimación de la cantidad de baterías a utilizar
- 8) Dosificación de la mezcla
- 9) Ajustes a las mezclas de prueba

Teniendo esto en cuenta se diseñaron las diferentes mezclas de concreto como se muestra en la Fig 4; la primera con materiales y agregados naturales y la segunda únicamente cambiando el agregado fino (arena) por agregado fino proveniente de concreto reciclado.



Fig.4 Preparación de mezclas de concreto.

TABLA DE DOSIFICACIÓN DE CONCRETOS - CANTIDADES POR m3 DE CONCRETO														
DISEÑO	Resistencia F'c			CEMENTO		ARENA		GRAVA		AGUA				
										Agregado Húmedo		Agregado Seco		PROMEDIO
	Kg/cm2	PSI	Mpa	Kilos	Bultos (50 Kg)	m3	Latas (19 Lts)	m3	Latas (19 Lts)	Lts.	Latas (19 Lts)	Lts.	Latas (19 Lts)	Lts.
1, 2, 2	280	4000	27	420	8.4	0.67	35	0.67	35	180	9.5	200	10.5	190
1, 2, 2-1/2	240	3555	24	380	7.6	0.60	32	0.76	40	170	8.9	190	10.0	180
1, 2, 3	226	3224	22	350	7.0	0.55	29	0.84	44	160	8.4	180	9.5	170
1, 2, 3-1/2	210	3000	20	320	6.4	0.52	27	0.90	47	160	8.4	180	9.5	170
1, 2, 4	200	2850	19	300	6.0	0.48	25	0.95	50	145	7.6	170	8.9	158
1, 2-1/2, 4	189	2700	18	280	5.6	0.55	29	0.89	47	145	7.6	170	8.9	158
1, 3, 3	168	2400	16	300	6.0	0.72	38	0.72	38	145	7.6	170	8.9	158
1, 3, 4	159	2275	15	260	5.2	0.63	33	0.83	44	140	7.4	185	9.7	163
1, 3, 5	140	2000	14	230	4.6	0.55	29	0.92	48	135	7.1	160	8.4	148
1, 3, 6	119	1700	12	210	4.2	0.50	26	1.00	53	130	6.8	155	8.2	143
1, 4, 7	109	1560	11	175	3.5	0.55	29	0.98	52	120	6.3	145	7.6	133
1, 4, 8	99	1420	10	160	3.2	0.55	29	1.03	54	110	5.8	140	7.4	125

Fig. 5 Tabla de diseño de mezclas de concreto Método ACI.

Procedimiento de mezclado:

- Se dosifican los materiales a usar (mostrado más adelante en la Tabla 1).
- Se agregan de poco a poco y de uno en uno a la revolvedora mientras esta esta prendida. (Arena primero, Cemento después y Grava a lo último)
- Se añade el agua calculada.
- Mezclar durante 5 a 10 min (dependiendo de cómo se quiera la fluidez) hasta tener una mezcla homogénea.
- Verter el concreto resultante en carretilla previamente húmeda para su uso final.

Si bien una relación agua-cemento ideal sería entre 0.40 a 0.61, aquí se decidió elegir la última (Fig. 6), debido a 2 cosas importantes: su trabajabilidad y su resistencia; ya que este trabajo fue a nivel laboratorio se necesitaba que las mezclas de concreto fueran fluidas para un mayor avance y que su resistencia no fuera tan alta porque no se planeaba que fuera concreto de alta resistencia, si no un concreto más convencional.

RELACION AGUA CEMENTO POR RESISTENCIA		
f'cr (28 días) kg/cm ²	Relación agua cemento de diseño por peso	
	Concreto sin aire incorporado	Concreto con aire incorporado
150	0.80	0.71
200	0.70	0.61
210	0.68	0.59
250	0.62	0.53
280	0.57	0.48
300	0.55	0.46
350	0.48	0.40
400	0.43	---
420	0.41	---
450	0.38	---

Fig. 6 Relación agua-cemento por resistencia del concreto. ACI 211.1-81

Esta relación a/c corresponde a una resistencia de diseño $F'c=210 \text{ Kg/cm}^2$, la cual corresponde a un concreto de aplicación estructural como en viviendas, zapatas, columnas, vigas etc. Y su selección fue porque es una de las 3 resistencias más comunes usadas en el ámbito de la construcción ya que ofrece un buen equilibrio entre resistencia y coste.

Cabe aclarar que antes de la realización de los especímenes de prueba finales se hizo una preexperimentación que consistió en la elaboración y prueba de 3 especímenes de cada tipo de mezcla, esto para observar cómo era la tendencia de comportamiento de cada una e ir viendo la dosificación de los materiales; la Tabla 1 muestra la dosificación usada de los 4 tipos de mezcla que se hicieron, sin embargo para este artículo solo se utilizaron los primeros dos por cuestiones de tiempo de análisis; lo mismo sucede con la Tabla 2, solo se usaron los 15 especímenes de las primeras dos mezclas.

Tabla 1 Dosificación de materiales por tipo de mezcla.

Para:	Relación a/c	Tipo de Mezcla	Arena (Kg)	Cemento (Kg)	Grava (Kg)	Agua (Lts)
18 Cilindros (Desperdicio de 3 en revolvedora)	0.61	100 % Natural	15.48	9.83	19.15	6.54
		Solo con agregado fino reciclado 50%	15.48	9.83	19.15	6.91
		Materiales Reciclados 100%	15.48	9.83	19.15	7.27
		Materiales Reciclados	15.48	9.83	19.15	8.00

Los tipos de mezcla que se elaboraron en total se observan en la Tabla 2.

Se realizaron 15 especímenes cilíndricos de concreto Fig. 7 de cada una de estas para poder ser analizados y comparar el cómo afecta la sustitución del agregado fino. Estos se dejaron sumergidos en el cuarto de curado durante 14 y 28 días, en un ambiente controlado con humedad de 35% a 40% y una temperatura del agua de $\pm 23^{\circ}\text{C}$.



Fig. 7 Especímenes cilíndricos de concreto.

Tabla 2 Matriz de experimentos.

Relación a/c	Tipo de Mezcla	Revenimiento y densidad en estado fresco	Resistencia a compresión	Resistencia a tensión	Resistencia a flexión	
0.61	100 % Natural	-	15	15	5	35
	Solo con agregado fino 50%	-	15	15	5	35
	Materiales Reciclados 100%	-	15	15	5	35
	Materiales Reciclados	-	15	15	5	35
No. de especímenes totales						140

Finalmente, sobre cada uno de los cilindros se realizaron pruebas en la máquina universal Fig. 8 para obtener los resultados de sus propiedades mecánicas, realizar una tabla comparativa y obtener un promedio de los valores resultantes de las pruebas.

Dichas pruebas fueron a los 14 días para los primeros 15 especímenes (7 de cada tipo de mezcla) y a los 28 días para los 15 especímenes restantes.



Fig. 8 Espécimen en la Máquina Universal Forney

Se realizaron de igual manera pruebas de resistencia a la compresión, tensión, flexión (en este caso se utilizó un dispositivo especial para esta prueba, ver Fig 9), módulo de elasticidad y contenido de aire.



Fig. 9 Espécimen con el instrumento necesario para la prueba a tensión.

4. Análisis de resultados

Propiedades Físicas

Las propiedades físicas que se estudiaron para este artículo en el caso de los agregados fueron la granulometría, humedad, absorción y el peso volumétrico seco y compacto; para el caso de las mezclas fueron la resistencia a la compresión y la resistencia a la tensión, que son de las propiedades físicas más importantes a la hora de hacer una mezcla de concreto.

Los resultados se presentan durante los puntos siguientes; es importante mencionar que dichos resultados fueron obtenidos de forma individual por cada tipo de mezcla y cada espécimen, sin embargo, para un mejor análisis y presentación de datos, se utilizó el promedio de cada uno de estos.

4.1 Humedad

La humedad de los agregados naturales y reciclados se midió siguiendo lo establecido en la norma ASTM C 566. Los valores obtenidos se presentan en la Tabla 3, los cuales se obtienen mediante la Ec 2. Se observa que el agregado reciclado supera por mucho la humedad del agregado natural.

$$\%W = \frac{P_w - P_s}{P_s} * 100 \quad \text{Ec. 2}$$

Donde:

%W= Porcentaje de humedad (%).

Pw= Peso húmedo del material (g).

Ps= Peso secado al horno del material (g)

Tabla 3 Humedades de los agregados finos.

Agregado fino	Humedad (%)
Natural	0.04
Material reciclado	6.93

4.2 Absorción

Esta propiedad se midió de acuerdo con la norma ASTM C 127 y 128, para la cual se utilizó la Ec. 3, para agregados gruesos y finos. Los resultados se muestran en la Tabla 4.

$$\% \text{Absorción} = \frac{B - A}{A} * 100 \quad \text{Ec. 3}$$

Donde

% absorción= Porcentaje de absorción del material (%).

B= es el peso del material en estado SSS (g).

A= es el peso seco del material (g).

Tabla 4 Absorciones del agregado fino.

Agregado fino	Absorción (%)
Natural	0.39
Material reciclado	13.47

Es evidente que el agregado reciclado tiene una absorción demasiado alta, saliéndose incluso de los estándares normales. (Dato obtenido del promedio de los resultados)

4.3 Contenido de aire

Esta propiedad se obtuvo de acuerdo con el procedimiento que marca la norma ASTM C 231.

En la Tabla 5 se presentan los contenidos de aire obtenidos de las mezclas elaboradas.

Tabla 5 Contenido de aire de las distintas mezclas.

Mezcla	Contenido de aire (%)
Estandar 210	2
Con reciclado 210	1.8

4.4 Granulometría

La granulometría de los agregados se obtuvo mediante la norma ASTM C 33 la cual señala los requisitos de granulometría que debe cumplir el material fino como el grueso, considerando un tamaño máximo de agregado (TMA) de 3/4" (19 mm) a 3/8" (9.5 mm). Se utilizó un juego de mallas que va desde la 1 1/2" (38.1 mm) hasta la No. 200 (0.074 mm) como se puede ver en la Fig. 10.

Este ensayo tiene como objetivo principal identificar la distribución de tamaños de las partículas presentes en los materiales pétreos utilizados en el proyecto.



Fig. 10 Tamices utilizados para la granulometría de las arenas según Norma ASTM C136.

Para el caso del material reciclado los resultados de la prueba antes mencionada se muestran en la Tabla 6.

Tabla 6 Tabla granulométrica del material reciclado.

Material reciclado		
No. De Malla	Material (gr)	%
3/4"	25.60	0.98
1/2"	252.30	9.62
3/8"	147.70	5.63
1/4"	427.30	16.29
No. 4	183.00	6.98
No.10	533.10	20.32
No. 20	161.70	9.97
No. 40	200.40	7.64
No. 60	226.50	8.63
No. 100	226.00	8.61
No. 200	118.60	4.52
Pasa 200	21.40	0.82
Total	2,623.60	100

Por lo tanto, el material se clasifica según el SUCS como arena de mala graduación, lo cual es entendible debido a que como el material es reciclado, las arenas están combinadas, sin embargo, no quiere decir que este material no funcione para la construcción.

En el caso del material natural se muestra en la Tabla 7. Los resultados obtenidos.

Tabla 7 Tabla granulométrica del material natural.

Material natural		
No. De Malla	Material (gr)	%
1 1/2"	526.7	6.6
1"	1264.9	115.84
3/4"	731.70	9.16
1/2"	1257.70	15.75
3/8"	301.10	3.77
1/4"	932.80	11.68
No. 4	416.50	5.22
No. 10	1286.60	16.11
No. 20	634.80	7.95
No. 40	299.80	3.75
No. 60	101.20	1.27
No. 100	75.20	0.94
No. 200	85.00	1.01
Pasa 200	82.10	1.03
Total	7,986.30	100

Este material se clasifica como arena bien graduada, por lo cual están dentro de los parámetros para poder usarse en una mezcla de concreto estándar.

4.5 Revenimiento

El revenimiento de las mezclas de concreto se determinó de acuerdo con el procedimiento especificado en la norma ASTM C143. Los valores obtenidos se presentan en la Tabla 8, evidenciando que la mayoría de los resultados se encuentran dentro del rango de tolerancia de ± 2.5 cm establecido en la sección 6.1.2 de la norma ASTM C94.

Tabla 8 Revenimientos obtenidos.

Mezcla	Revenimiento (cm)
Estandar 210	7.21
Con reciclado 210	7.03

Los resultados de otras investigaciones similares muestran que la trabajabilidad de las mezclas recicladas es menor que la de las mezclas naturales [11] [13] [20].

4.6 Peso Volumétrico seco y compacto de los agregados

Esta propiedad se analizó de acuerdo con la norma ASTM

C 29. La cual menciona que se debe de usar un recipiente metálico con capacidad de 10Lts para dicha prueba; el conocer estos valores es necesario para optimizar el diseño de las mezclas. Se uso la Ec. 4 que se muestra a continuación.

$$M = \frac{G - T}{V} = \text{Ec. 4}$$

Donde:

M= peso volumétrico seco y compacto (kg/m³)

G= peso del recipiente con material (kg)

T= peso del recipiente (kg)

V= volumen del recipiente (m³)

Los valores obtenidos se muestran en la Tabla 9 y 10.

Tabla 9 Peso Volumétrico seco y compacto de arena.

Agregado	Peso Vol. seco (kg/cm ³)	Peso Vol. compactado (kg/cm ³)
Natural	1345	1399
Reciclado	1198	1256

Tabla 10 Peso Volumétrico seco y compacto de grava.

Agregado	Peso Vol. seco (kg/cm ³)	Peso Vol. compactado (kg/cm ³)
Natural	1512	1598
Reciclado	1387	1401

De acuerdo con [16] [17], el peso volumétrico compactado de un agregado usado para concreto de peso normal varía de 1200 a 1400 kg/m³ en arenas y de 1400 a 1700 kg/m³ en gravas. Como se ve en la tabla anterior, los resultados están dentro de este intervalo.

4.7 Resistencia a la compresión

La resistencia a la compresión de las mezclas de concreto se evaluó conforme al procedimiento establecido en la norma ASTM C39, en la cual marca que se debe de utilizar la Ec. 5 para la obtención de esta propiedad. Los resultados se muestran en las tablas 11 y 12.

$$f'c = \frac{P}{A} \text{ Ec.5}$$

Donde:

f'c= esfuerzo a compresión de proyecto en kg/cm²

P= carga de ruptura en kg

A= área de la sección transversal en cm²

Tabla 11 Resistencia a compresión sin material reciclado.

Mezcla de concreto sin material reciclado	Especimen	Resistencia a la compresión (kg/cm ²)
	1	180.2
	2	199.3
	3	178.5
	4	185.6
	5	188.8
	6	190.3
	7	200.0
	8	199.3
	9	188.3
	10	189.0
	11	189.5
	12	195.4
	13	196.3
	14	197.8
	15	201.0

Tabla 12 Resistencia a compresión con material reciclado.

Mezcla de concreto con material reciclado	Especimen	Resistencia a la compresión (kg/cm ²)
	1	231.8
	2	199.4
	3	218.0
	4	209.1
	5	208.3
	6	220.3
	7	211.0
	8	224.0
	9	223.7
	10	210.2
	11	230.0
	12	229.5
	13	228.6
	14	208.4
	15	215.8

Comparando ambas tablas, se muestra que los cilindros con material reciclado alcanzaron valores de resistencia a la compresión ligeramente mayores que los concretos sin material reciclado. [9] [10] [12] obtuvieron una tendencia similar, pero en sentido opuesto, ver Tabla 15 (un decremento ligero de sus propiedades mecánicas) en sus investigaciones con usos de agregados de materiales de concreto reciclado.

La razón de este puede deberse a diferentes circunstancias, como el lugar de obtención del material reciclado, el tipo

de cemento, la resistencia de diseño, el tipo de mezclado, la relación agua-cemento entre otros factores.

Tabla 13 Contraste cuantitativo de algunos autores de la diferencia de resistencias a compresión de mezclas naturales con mezclas con material reciclado.

Referencia	Mezcla	Relación A/C	Resistencia a la compresión (kg/cm ²)	% de disminución de resistencia
[8]	CN 200	1.01	188.20	1.42
	CR 200	1.30	185.53	
[10]	Diseño patron optimizado	0.95	207.00	7.73
	Diseño patron optimizado con 10% de material reciclado	1.05	191.00	
[12]	RC 0	1.33	421.60	7.54
	RC 40	1.45	389.80	
[12]	CARF 0	0.4 - 0.5	385.50	5.58
	CARF 20		364.00	

4.8 Resistencia a la tensión

La resistencia a la flexión, también denominada módulo de ruptura, en concretos de peso normal se estima como 2 y 1.4 veces la raíz cuadrada de la resistencia a la compresión, para concretos de clase uno y clase dos, respectivamente.

La determinación experimental de esta propiedad se realizó conforme al procedimiento establecido en la norma ASTM C78.

Tabla 13 Resistencias a la flexión de las mezclas de concreto.

Mezcla	Resistencia a la flexión en kg/cm ²	Concreto clase 1 2.0x (fc) 1/2	Concreto clase 2 1.4x (fc) 1/2
Estandar 210	27.22	27.87	19.3
Con reciclado 210	29.51	26.98	19.04

Como se muestra en la tabla 13, la mezcla de concreto reciclado muestra valores ligeramente mayores en el caso de la resistencia a flexión.

Sin embargo, los valores que alcanzaron ambas mezclas están dentro de los parámetros que marca la clasificación de concretos de clase uno.

4.9 Densidad del concreto en estado fresco

La densidad de los diferentes tipos de concretos frescos determinados conforme al procedimiento establecido en la norma ASTM C138, se presentan en la Tabla 14.

Se observa que el concreto elaborado con material reciclado mostraron una densidad baja en comparación

con el concreto con agregados naturales, lo cual era de esperarse. Investigaciones previas [8] [14] [20] utilizando agregados reciclados de mayor densidad, como el basalto, han reportado mezclas recicladas con densidades superiores a los obtenidos en este trabajo.

Estos resultados son similares mas no iguales debido a que en las demás investigaciones se usaron otros agregados reciclados como la caliza.

Tabla 14 Densidad por tipo de mezcla.

Mezcla	Peso Vol. (kg/cm3)
Concreto estandar	2367.002
Concreto Reciclado	2238.467

La máquina que se utilizó para ambas pruebas (resistencia y tensión) se muestra en la Fig. 11.



Fig. 11 Maquina Universal marca Fourney la cual se usa para las pruebas de compresión y flexión.

4.10 Densidad Relativa

La densidad relativa de los agregados se evaluó de acuerdo con las normas ASTM C127 y ASTM C128, correspondientes a agregados gruesos y finos, respectivamente. Los datos presentados en la Tabla 15 muestran que la densidad de los agregados reciclados es consistentemente menor que la de los agregados naturales, lo cual se atribuye a la presencia de pasta de cemento adherida al material reciclado entre otros cementantes o aditivos que no fueron posibles separar del todo al momento de la separación de los agregados gruesos y finos, reduciendo así su densidad global.

La Ec.6 fue la utilizada para medir esta propiedad en el caso de las arenas y la Ec. 7 para el caso de las gravas.

$$D_{RA} = \frac{P_s}{(P_s + P_a + A) - (P_m + m + A)} \quad \text{Ec. 6}$$

Donde:

DRA= densidad relativa de la arena (adimensional).

Ps= peso del material seco (g).

PM= peso del matraz (g).

$$D_{rg} = \frac{P_i}{V_i * D_w} \quad \text{Ec.7}$$

Donde:

Pi = peso del material en condición de (SSS).

Vt = volumen del agua desalojada por el material (cm3).

Dw = densidad del agua se considera igual a 1(g/cm3).

Tabla 15 Densidad relativa (adimensional)

Agregado	Densidad
Natural	2.56
Reciclado	2.21

4.11 Análisis de dispersión, Media y Desviación estándar

Como bien se sabe, un análisis de dispersión de datos es una herramienta estadística que permite evaluar la variabilidad o uniformidad de los resultados de un conjunto de mediciones; se presentan las gráficas de dispersión de datos Fig. 12 y 13, para el concreto natural la distribución es mucho más irregular que el otro tipo de mezcla, sin embargo, es muy probable que se debiera a un error humano en el proceso de mezclado y/o curado.

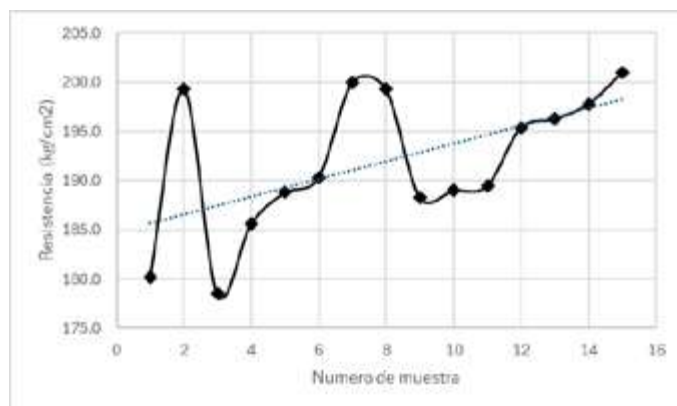


Fig. 12. Variación de resistencias del concreto 100% natural.

Para la mezcla de solo agregado fino reciclado (Fig. 13) se observa una distribución poco menos irregular de los resultados en comparación con la Fig. 10, con valores que oscilan entre aproximadamente 199 y 231 kg/cm², lo que evidencia una ligera variabilidad en el comportamiento mecánico del material.

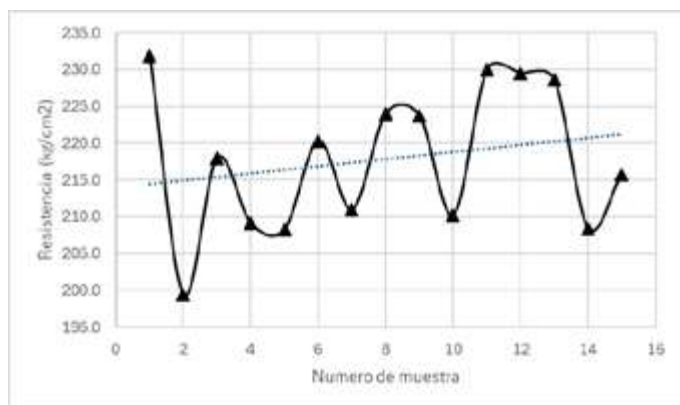


Fig. 13 Variación de resistencias del concreto solo con agregado fino reciclado.

Como se observa, la línea de tendencia presenta una pendiente positiva en ambos casos, lo que sugiere un incremento en las resistencias conforme avanza el número de muestra.

Aun con estos detalles los resultados se mantienen dentro de un rango aceptable de dispersión, lo cual indica un adecuado control de calidad en la producción del concreto.

El análisis estadístico de los resultados obtenidos muestra una media de resistencia a compresión de 191.95 kg/cm² y 217.87 kg/cm² Tabla 16.

La desviación estándar calculada, indica una baja dispersión de los datos respecto a la media, lo cual marca un buen grado de homogeneidad tomando como referencia la ASTM C 94, la cual dice que una desviación estándar debajo de 17 es un concreto muy uniforme y bien controlado.

Asimismo, el coeficiente de variación obtenido, inferior al 5 % en ambos casos, se encuentra dentro de los límites recomendados por la normativa ACI 318 para concretos de calidad controlada, evidenciando un buen control en los procesos de mezclado y curado.

Tabla 16. Análisis de la media, desviación estándar y coeficiente de variación de las resistencias de los dos tipos de concreto.

Tipo de Mezcla	Cilindro No.	Resistencia a compresión-RCS(Kg/cm2)	Media (kg)	Desviación Estandar (kg)
100 % Natural	1	180.2	191.953	7.170
	2	199.3		
	3	178.5		
	4	185.6		
	5	188.8		
	6	190.3		
	7	200.0		
	8	199.3		
	9	188.3		
	10	189.0		
	11	189.5		
	12	195.4		
	13	196.3		
	14	197.8		
	15	201.0		
Solo con agregado fino reciclado	1	231.8	217.873	9.924
	2	199.4		
	3	218.0		
	4	209.1		
	5	208.3		
	6	220.3		
	7	211.0		
	8	224.0		
	9	223.7		
	10	210.2		
	11	230.0		
	12	229.5		
	13	228.6		
	14	208.4		
	15	215.8		

5. Discusión de resultados

Diferencia del material reciclado con el natural.

Empezando con la granulometría del material fino, este resultado ser una arena mal graduada, lo que significa que el resultado final puede llegar a ser más poroso, sin embargo, como este material es reciclado de otros con otro tipo de partículas en el como lo son partículas de pasta de los concretos viejos, en este caso no afecto a la porosidad de la mezcla final; lo que si afecto fue la absorción del mismo, este es mucho mayor comparado a una arena bien graduada, lo que demando un 50% más de agua para la realización de la mezcla con este material.

En el caso de la densidad si afecto, pero fue una ventaja ya que una densidad alta da como resultado una mayor resistencia del concreto, caso que se puede observar comparando las tablas 11 y 12, para el caso del revenimiento queda dentro de lo óptimo, lo que dota de una buena trabajabilidad y compactación.

Con lo anterior comentado, se puede suponer que esta mezcla sería de menos calidad que una mezcla ordinaria, lo cual no fue así, ya que como se mostró en las Tablas 11 y 12, todas las diferencias en las propiedades físicas de ambas mezclas dieron como resultado una mayor resistencia en la mezcla con material reciclado. Es de importancia mencionar que esto no siempre puede que suceda así; aquí fue el caso, con el material del banco REURBA en específico, todo depende del origen del material y del tratamiento que se le da a la hora de ser separado este mismo en los bancos de materiales.

Uso estructural

Como se sabe, el concreto con resistencia de diseño de $F'_c=210 \text{ Kg/cm}^2$ es uno de los más usados en edificaciones de uso habitacional y obras urbanas ligeras; se usa para cimentaciones, columnas, losas de entrepiso y azotea, banquetas, guarniciones, entre otros. Y, retomando los resultados de la Tabla 12, tenemos una resistencia promedio de 217 kg/cm^2 , lo cual encaja perfectamente con lo requerido para ser usado en los elementos estructurales anteriormente mencionados; llegando así a la conclusión de que esta mezcla de concreto puede ser usada sin ningún problema, siempre y cuando se trabaje de manera adecuada y se analicen los materiales reciclados antes.

6. Conclusiones

La utilización de concreto reciclado como fuente de agregado grueso para reemplazar los recursos naturales constituye una estrategia urgente, dado que conforme avanzan los años, la disponibilidad de los bancos de materiales pétreos naturales se va a ir escaseando.

Si bien el agregado pétreo derivado de la demolición de concreto puede no cumplir siempre con las condiciones óptimas, es igualmente cierto que numerosos agregados pétreos naturales disponibles localmente no satisfacen al pie de la letra las especificaciones establecidas en los códigos y reglamentos de construcción vigentes.

El agregado de origen reciclado tiene aún mucho por estudiar, a la par que el diseño y elaboración del concreto reciclado deben explorarse posibilidades de adiciones de otros materiales que modifiquen las propiedades de los

concretos consiguiendo condiciones exitosas y económicas.

Este trabajo de investigación reveló que el agregado reciclado de granulometría fina tiene mucho más porcentaje de absorción que un agregado fino natural, por lo cual la única dosificación que se requiere modificar es la del agua, por lo demás es una mezcla factible económicamente.

Aparte de que tiene un ligero incremento en la resistencia a compresión que es de las características que más importan en una mezcla de concreto. Los concretos reciclados pueden ser utilizados como concretos clase dos, lo que lo convierte en un concreto con una cantidad de aplicaciones bastante similar al concreto estándar. Por último, esta investigación constituye el punto de partida de investigaciones complementarias.

Agradecimientos

Se agradece al consejo Nacional de Ciencia y Tecnología al igual que a la Universidad Autónoma de Querétaro por los recursos otorgados.

Abreviaturas

Las siguientes abreviaturas se usaron en este trabajo:

RCD: Residuos de Construcción y Demolición

CP: Cemento Portland

TMA: Tamaño máximo de agregado

SUCS: Sistema Unificado de Clasificación de Suelos

SEDESU: Secretaría de Desarrollo Sustentable

Referencias

- [1] J. O. Castaño, R. Misle Rodríguez, L. A. Lasso, A. Gómez Cabrera, y M. S. Ocampo, "Gestión de residuos de construcción y demolición (RCD) en Bogotá: perspectivas y limitantes", *Rev. Tecnura*, vol. 17, n.º 38, p. 121, sep. 2013, doi: 10.14483/udistrital.jour.tecnura.2013.4.a09.
- [2] W. Martínez-Molina *et al.*, "Concreto reciclado: una revisión", *Rev. ALCONPAT*, vol. 5, n.º 3, pp. 224-237, sep. 2015, doi: 10.21041/ra.v5i3.91.
- [3] Universidad del Norte *et al.*, "Construction demolition waste (CDW), a perspective of achievement for the city of Barranquilla since its management model", *Ing. Desarro.*, vol. 35, n.º 2, pp. 533-555, jun. 2017, doi: 10.14482/inde.35.2.10174.
- [4] "Cámara Mexicana de la Industria de la Construcción". Accedido: 3 de junio de 2024. [En línea]. Disponible en:

<https://www.cmic.org.mx/sectores/vivienda/noticmic.cfm?seleccion=633>

[5] wpcmic, "Presenta Gobierno de Querétaro norma para el manejo de los residuos", Cámara Mexicana de la Industria de la Construcción. Accedido: 3 de junio de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.cmic.org/presenta-gobierno-de-queretaro-norma-para-el-manejo-de-los-residuos/>

[6] "Presentan en Querétaro la Norma Técnica de Residuos de Construcción y Demolición", PortalAmbiental.com.mx. Accedido: 3 de junio de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.portalambiental.com.mx/residuos/20220908/presentan-en-queretaro-la-norma-tecnica-de-residuos-de-construccion-y-demolicion>

[7] F. Ledezma y W. Yauri, "Diseño de mezcla del concreto para elaboración de adoquines con material reciclado de neumáticos en la provincia de Huancavelica", *Rev. Científica Cienc. Ing.*, vol. 3, n.º 1, Art. n.º 1, ene. 2023, doi: 10.54943/ricci.v3i1.224.

[8] Universidad Nacional Autónoma de México, I. E. Martínez-Soto, C. J. Mendoza-Escobedo, y Universidad Nacional Autónoma de México, "Comportamiento mecánico de concreto fabricado con agregados reciclados", *Ing. Investig. Tecnol.*, vol. 7, n.º 3, pp. 151-164, jul. 2006, doi: 10.22201/fi.25940732e.2006.07n3.012.

[9] J. R. H. Ávila, Á. R. O. Herazo, D. J. A. Mercado, y J. R. Montoya, "Relación entre resistencia a compresión en cilindros de concreto y los rebotes con esclerómetro digital", *Ingeniare*, n.º 22, Art. n.º 22, 2017, doi: 10.18041/1909-2458/ingeniare.22.1342.

[10] F. A. Guacaneme Lizarazo, "Ventajas y Usos del Concreto Reciclado", dic. 2015, Accedido: 13 de junio de 2024. [En línea]. Disponible en: <http://repository.unimilitar.edu.co/handle/10654/15151>

[11] "Factors affecting the properties of recycled concrete by using neural networks". Accedido: 13 de junio de 2024. [En línea]. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/269098168_Factors_affecting_the_properties_of_recycled_concrete_by_using_neural_networks

[12] H. Rahimpour, A. B. Amini, F. Sharifi, A. Fahmi, y S. Zinatloo-Ajabshir, "Facile fabrication of next-generation sustainable brick and mortar through

geopolymerization of construction debris", *Sci. Rep.*, vol. 14, n.º 1, 2024, doi: 10.1038/s41598-024-61688-x.

[13] N. Singh y A. Gupta, "Use of recycled coarse aggregate for M40 grade concrete", *J. Build. Pathol. Rehabil.*, vol. 9, n.º 2, 2024, doi: 10.1007/s41024-024-00440-4.

[14] S. Saxena, L. B. Roy, P. K. Gupta, V. Kumar, y P. Paramasivam, "Model tests on ordinary and geosynthetic encased stone columns with recycled aggregates as filler material", *Int. J. Geo-Eng.*, vol. 15, n.º 1, 2024, doi: 10.1186/s40703-023-00202-0.

[15] F. Amin *et al.*, "Utilization of discarded face masks in combination with recycled concrete aggregate and silica fume for sustainable civil construction projects", *Sci. Rep.*, vol. 14, n.º 1, 2024, doi: 10.1038/s41598-023-50946-z.

[16] A. M. Buttler, "Concreto com agregados graúdos reciclados de concreto : influência da idade de reciclagem nas propriedades dos agregados e concretos reciclados.", Mestrado em Estruturas, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2003. doi: 10.11606/D.18.2003.tde-06082003-172935.

[17] Y. Chen, X. Liu, P. Ye, W. Zhang, y Y. Ji, "Mechanical properties of recycled aggregate concrete reinforced with steel fibers under triaxial loading", *J. Build. Eng.*, vol. 92, 2024, doi: 10.1016/j.jobbe.2024.109541.

[18] Qin, y G. Sun, "Effect of ultra-low dosage graphene oxide on the properties of recycled cement-based materials", *J. Build. Eng.*, vol. 91, 2024, doi: 10.1016/j.jobbe.2024.109637.

[19] P. Wang, C. Xu, Q. Li, L. Wang, y Y. Guo, "Experimental study on the preparation of wood aggregate recycled concrete using waste wood and recycled fine aggregate from construction and demolition wastes", *J. Build. Eng.*, vol. 90, 2024, doi: 10.1016/j.jobbe.2024.109471.

[20] Z. Li, H. Yang, Z. Tang, B. Zhao, H. Lv, y L. Meng, "Non-destructive evaluation of residual strength distribution of recycled aggregate concrete and bond strength between recycled aggregate concrete and deformed bar with different cover thicknesses after freeze-thaw cycles", *Case Stud. Constr. Mater.*, vol. 20, 2024, doi: 10.1016/j.cscm.2024.e03347.

Análisis comparativo mediante Inteligencia de Enjambre para la Identificación Paramétrica aplicada a motores de inducción.

Comparative Analysis using Swarm Intelligence for Parameter Identification applied to Induction Motors.

Medina Vega, Gustavo* y Morales Velázquez, Luis*

Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Querétaro, Querétaro, México*

gmedina08@alumnos.uaq.mx; ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-6621-1188>

luis.moralesv@uaq.mx; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1130-7131>

Resumen: La eficiencia energética en sistemas industriales es un pilar fundamental para la sostenibilidad, en el cual los motores de inducción cumplen el papel como la principal fuerza motriz. Lograr una operación óptima de estos motores y una implementación de estrategias avanzadas de control dependen significativamente de la precisión con la que se cuente el modelo físico del motor. El presente trabajo presenta un análisis comparativo entre la Optimización por Enjambre de Partículas (PSO) y el Optimizador del Lobo Gris (GWO) para la identificación paramétrica de un modelo dinámico de quinto orden de un motor de inducción. Se utilizaron datos transitorios con ruido para emular condiciones realistas. Los resultados demuestran de manera cuantitativa la superioridad de GWO, el cual logra una precisión aproximadamente cinco veces mayor que PSO bajo las mismas condiciones. Se concluye que la selección de un algoritmo de optimización como GWO es un paso importante para futuras aplicaciones como la implementación de gemelos digitales para el monitoreo y diagnóstico.

Palabras clave: MEC; Motores de Inducción; Identificación de Parámetros; Inteligencia de Enjambre; Optimización Metaheurística; Optimizador del Lobo Gris

Abstract: Energy efficiency in industrial systems is a fundamental pillar for sustainability, in which induction motors (IM) fulfill the role as the main driving force. Achieving optimal operation of these motors and the implementation of advanced control strategies depend significantly on the accuracy of the motor's physical model. This work presents a comparative analysis between Particle Swarm Optimization (PSO) and the Grey Wolf Optimizer (GWO) for the parametric identification of a fifth-order dynamic model of an induction motor. Transient data with noise were used to emulate realistic conditions. The results quantitatively demonstrate the superiority of GWO, which achieved approximately five times greater accuracy than PSO under the same conditions. It is concluded that the selection of an optimization algorithm like GWO is an important step for accurate parameter identification in induction motors, laying the groundwork for future applications such as the implementation of digital twins for monitoring and diagnostics.

Keywords: MEC; Induction Motors; Parameter Identification; Swarm Intelligence; Metaheuristic Optimization; Grey Wolf Optimizer.

1. Introducción

Los Motores de Inducción (MI) forman la estructura central de la industria moderna, desde su importancia siendo pivotes en un amplio número de aplicaciones debido a su versatilidad, robustez y fiabilidad. Sin embargo, dichas ventajas han logrado una creciente demanda en la eficiencia energética y una búsqueda de rendimiento dinámico lo que ha impulsado a transicionar de un control convencional a técnicas avanzadas. Por ejemplo, el Control Orientado por Campo (FOC, por sus siglas en inglés Field Oriented control) y el Control Predictivo Basado en Modelo (MPC por sus siglas en

inglés Model Predictive Control) [1]. La eficacia y aplicación de estos métodos depende de gran manera en la disponibilidad de un modelo matemático que pueda representar con precisión el comportamiento dinámico del motor. Una estimación deficiente/inexacta de los parámetros impacta directamente de manera negativa en el rendimiento del controlador [2].

Para resolver el problema de identificación paramétrica de motores de inducción actualmente es dominado por algoritmos de optimización

metaheurísticos (MOA por sus siglas en inglés Metaheuristic Optimization Algorithms) [3], dado que la misma naturaleza de dichos algoritmos les permiten recorrer el paisaje del error sin importar su complejidad. Este término se refiere a una conceptualización de la función de costes tomándola como una superficie multidimensional, donde cada conjunto de parámetros del modelo corresponde a una ubicación y el valor del error da la altitud del terreno. Un paisaje complejo, el cual es común en problemas no lineales, se caracteriza principalmente por contener un gran número de óptimos locales, dichos puntos se caracterizan por parecer ser la mejor solución en una región pequeña del paisaje, pero no representan el mínimo global el cual es el que se busca en un problema de optimización. La topología descrita anteriormente es de manera precisa una de las mayores limitaciones para los métodos basados en gradiente [4]. Dichos métodos, al utilizar exclusivamente un descenso por la pendiente local, quedan expuestos inevitablemente a dicha problemática, siendo atrapados en el primer óptimo local al que se encuentren. A diferencia de los algoritmos que se emplearan en este trabajo que utilizan mecanismos estocásticos para lograr una exploración de las diversas regiones del paisaje, permitiéndoles en pocas palabras dar un “salto” entre los valles subóptimos y así aumentando la probabilidad de converger hacia una solución que sea de manera global superior. Trabajos recientes proponen versiones mejoradas de algoritmos ya establecidos diseñados para equilibrar o mejorar de manera dinámica las fases de exploración y explotación y así mejorar la precisión en la estimación de parámetros. Aunque la Optimización por Enjambre de Partículas (PSO por sus siglas en inglés Particle Swarm Optimization) sigue siendo un método referente al utilizar métodos metaheurísticos, la tendencia actual se inclina más a una hibridación, como la combinación de PSO con el Algoritmo Seno Coseno (SCA por sus siglas en inglés Sine Cosine Algorithm) [5].

Si bien existen un número vasto de estudios que aplican diversos MOA, aún existen brechas importantes en estas aplicaciones. Siendo una de las optimizaciones más populares, la optimización usando PSO ha demostrado contar con limitaciones relacionadas con la convergencia prematura, lo que en la mayoría de los casos conduce a la obtención de soluciones subóptimas debido a el desequilibrio en la etapa de búsqueda [6]. Investigaciones comparativas recientes han cuantificado dicha desventaja, llegando a mostrar que el error mínimo alcanzado por la optimización por PSO estándar llega a ser hasta diez veces superior a enfoques híbridos. En contraparte, el optimizador del Lobo Gris (GWO por sus siglas en inglés Grey Wolf Optimizer) presenta en su arquitectura de búsqueda una fundamentación distinta,

siendo emulada por la jerarquía social y tácticas de caza de una manada. Al utilizar las tres mejores soluciones para guiar al resto del enjambre, GWO utiliza una implementación de liderazgo lo que reduce intrínsecamente el riesgo de un estancamiento prematuro en un óptimo local. Sin embargo, muchas de las comparativas se realizan sobre modelos estáticos o datos de placa de fabricante, siendo metodologías que no logran capturar la dinámica real del sistema. En consecuencia, se identifica un área de oportunidad en la necesidad de realizar una evaluación comparativa entre el ya establecido por la optimización por Enjambre de Partículas y un contendiente prometedor, GWO, bajo condiciones más realistas, la identificación de un modelo dinámico de orden alto a partir de datos transitorios con ruido.

El presente trabajo aborda dicha área de oportunidad mediante un análisis comparativo siendo la hipótesis central que GWO gracias a la naturaleza del mecanismo de búsqueda de múltiples líderes, superara a la optimización por Enjambre de Partículas en precisión y robustez para la identificación paramétrica de un motor de inducción. El objetivo principal es cuantificar dicho rendimiento aplicando ambos algoritmos a la problemática de identificar un modelo dinámico de quinto orden a partir de los datos transitorios con ruido, minimizando el Error Cuadrático Medio (MSE). La principal aportación será proveer de evidencia empírica que permita evaluar la robustez y la precisión del algoritmo GWO frente a PSO para la identificación paramétrica de motores de inducción en condiciones realistas. El presente estudio ofrece una recomendación para la selección de algoritmos de optimización en aplicaciones industriales donde la precisión sea un factor importante.

El presente artículo se organiza de la siguiente manera: la Sección 2 detalla el modelo matemático del motor así como el diseño experimental y los algoritmos de optimización implementados. En la sección 3 se presenta los resultados comparativos del rendimiento de ambos algoritmos, a su vez la Sección 4 ofrece una discusión sobre las implicaciones de dichos hallazgos y finalmente, la Sección 5 expone las conclusiones y áreas de oportunidad para futuros estudios.,

2. Materiales y métodos

A continuación, se presentará una descripción exhaustiva de la estructura metodológica, los procedimientos computacionales y las herramientas de análisis empleadas para lograr la identificación paramétrica de un motor de inducción trifásico de 2 HP.

2.1. Modelo matemático del Sistema

Para la representación del comportamiento dinámico del motor de inducción trifásico, se optó por un modelo de quinto orden en el marco de referencia del estator estacionario ($\alpha-\beta$). Dicho modelo se describe mediante un sistema de ecuaciones diferenciales que relaciona las variables eléctricas y mecánicas del sistema. Las variables que nos permiten conocer el estado del modelo son las corrientes del estator en el eje directo y en cuadratura (i_{ds}, i_{qs}), las corrientes del rotor referentes al estator (i_{dr}, i_{qr}) y la velocidad angular del rotor (ω_r).

Las ecuaciones que rigen la dinámica eléctrica del motor se representan de la siguiente forma:

$$\frac{d}{dt} i_{qs} = \frac{1}{\sigma L_s} \left(v_{qs} - r_s i_{qs} + \frac{L_m}{\tau_r} i_{qr} + \omega_r L_r L_m^2 i_{dr} + \omega_r L_m i_{ds} \right) \quad (1)$$

$$\frac{d}{dt} i_{ds} = \frac{1}{\sigma L_s} \left(v_{ds} - r_s i_{ds} + \frac{L_m}{\tau_r} i_{dr} - \omega_r L_r L_m^2 i_{qr} - \omega_r L_m i_{qs} \right) \quad (2)$$

$$\frac{d}{dt} i_{qr} = -\frac{1}{\tau_r} i_{qr} - \omega_r i_{dr} + \frac{L_s L_m}{\tau_r} i_{qs} \quad (3)$$

$$\frac{d}{dt} i_{dr} = -\frac{1}{\tau_r} i_{dr} + \omega_r i_{qr} + \frac{L_s L_m}{\tau_r} i_{ds} \quad (4)$$

La dinámica mecánica del sistema se describe en la siguiente ecuación:

$$\frac{dw_r}{dt} = \frac{(T_e - B w_r - T_L)}{J} \quad (5)$$

Donde el par electromagnético (T_e) acopla el dominio eléctrico y mecánico, dicho par electromagnético se calcula con la Eq. 6:

$$T_e = \frac{3}{2} \frac{P}{2} \frac{L_m}{L_r} (i_{qs} i_{dr} - i_{ds} i_{qr}) \quad (6)$$

De igual forma se definieron dos términos auxiliares los cuales nos permiten simplificar el modelo: en primer lugar, el coeficiente de dispersión magnética (σ), dado por la Eq. 7 y la constante de tiempo del rotor (t_r) en la Eq. 8.

$$\sigma = 1 - \frac{L_m^2}{L_s L_r} \quad (7)$$

$$\tau_r = \frac{L_r}{r_r} \quad (8)$$

Finalmente, el conjunto de los siete parámetros a identificar que nos permiten modelar el comportamiento del motor es el vector $\theta = [r_s, r_r, L_{ls}, L_{lr}, L_m, J, B]$.

2.2. Diseño Experimental y entorno de simulación

El estudio se realizó mediante simulación numérica. El entorno de desarrollo fue Python 3.9.12, con el uso de las librerías Numpy (v1.22) para el cálculo matricial, Pandas (v1.4) para la gestión de los datos y SciPy (v1.8.1) para la integración numérica.

Para la generación de los datos de referencia, se estableció un conjunto de parámetros objetivo en los cuales se simuló un escenario de arranque directo en línea (DOL) para un motor de inducción trifásico de 2HP, aplicando una tensión trifásica a una frecuencia de 60 Hz. El sistema de ecuaciones diferenciales se resolvió utilizando el método Runge-Kutta de orden 5, utilizando la función `solve_ivp` de SciPy con una tolerancia relativa y absoluta de 10^{-3} y 10^{-6} , sobre una simulación de 2 segundos.

Con el objetivo de emular la naturaleza ruidosa de un sistema de adquisición de datos real, a las señales obtenidas (corriente estator, velocidad y par) se les agregó ruido blanco gaussiano. La desviación estándar del ruido se dijo en un 2% de la amplitud máxima de cada señal.

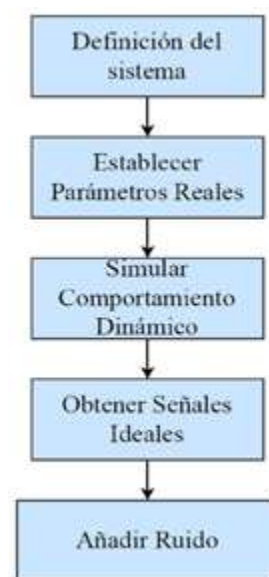


Figura 1. Diagrama del proceso de generación de datos sintéticos.

El proceso mostrado en la Figura 1 comienza desde la definición del sistema en la cual se establece el modelo matemático que se utilizara. Después de establecer el modelo matemático que se utilizara, es necesario establecer los parámetros reales de nuestro sistema, dado que dichos parámetros sirven como la verdad fundamental en la simulación. A partir de dichos valores, se simula el comportamiento dinámico del sistema para así obtener las señales ideales del sistema dinámico, las cuales a su vez nos representan una salida teórica y sin imperfecciones lo cual en el mundo físico no es posible, porque finalmente se emula una condición de medición realista para así poder completar la generación de los datos sintéticos al agregarles ruido a dichas señales.

2.3. Metodología de Optimización

El problema de identificación de parámetros se planteó como un problema de optimización no lineal y multivariable, siendo el objetivo principal encontrar el vector de parámetros θ que minimizaría el Error Cuadrático Medio (MSE) entre las señales simuladas y las de referencia con ruido. El espacio de búsqueda se acoto inicialmente en un intervalo de $\pm 20\%$ de su valor verdadero.

Se evaluó un mismo escenario utilizando dos algoritmos bioinspirados.

1. **Optimización por Enjambre de Partículas (PSO):** Se implementó una versión clásica de PSO, donde cada partícula i -ésima se actualiza su velocidad v_i y posición x_i , en cada iteración k de acuerdo con las ecuaciones Eq. 9 y Eq. 10.

$$v_i(k+1) = wv_i(k) + c_1r_1(pbest_i - x_i(k)) + c_2r_2(gbest - x_i(k)) \quad (9)$$

$$x_i(k+1) = x_i(k) + v_i(k+1) \quad (10)$$

Para la Optimización por Enjambre de Partículas (PSO), se empleó una configuración canónica con un factor de inercia $w = 0.7$ y coeficientes $c_1 = c_2 = 2.0$. Esta configuración es ampliamente recomendada en la literatura, dado que establece un equilibrio crucial entre la componente cognitiva (confianza de la partícula en su

propia experiencia) y la social (confianza en la experiencia del enjambre). Un desequilibrio, con $c_2 > c_1$, puede provocar una convergencia prematura en óptimos locales, mientras que $c_1 > c_2$ resulta en una exploración excesiva e ineficiente. Al utilizar esta configuración estándar y balanceada, nos aseguramos de que el rendimiento observado se deba a las características inherentes del algoritmo y no a un ajuste deficiente.

```

1: Entrada:  $N, K_{max}, w, c_1, c_2, f(x)$ 
2: Inicialización ( $k = 0$ ):
3: for  $i = 1$  to  $N$  do
4:    $x_i(0) \leftarrow$  Posición aleatoria
5:    $v_i(0) \leftarrow$  Velocidad aleatoria
6:    $pbest_i \leftarrow x_i(0)$ 
7: end for
8:  $gbest \leftarrow \arg \min_i f(pbest_i)$ 
9: Proceso de Optimización:
10: for  $k = 0$  to  $K_{max} - 1$  do
11:   for  $i = 1$  to  $N$  do
12:      $r_1, r_2 \leftarrow$  Valores aleatorios en  $U(0, 1)$ 
13:      $v_i(k+1) \leftarrow wv_i(k) + c_1r_1(pbest_i - x_i(k)) + c_2r_2(gbest - x_i(k))$ 
14:      $x_i(k+1) \leftarrow x_i(k) + v_i(k+1)$ 
15:     if  $f(x_i(k+1))$  es mejor que  $f(pbest_i)$  then
16:        $pbest_i \leftarrow x_i(k+1)$ 
17:     end if
18:     if  $f(pbest_i)$  es mejor que  $f(gbest)$  then
19:        $gbest \leftarrow pbest_i$ 
20:     end if
21:   end for
22: end for
23: return  $gbest$ 

```

Algoritmo 1. Pseudocódigo de PSO

El mecanismo de actualización de PSO permite que el enjambre explore el espacio de soluciones de manera dinámica. El factor de inercia w es la parte fundamental para balancear entre la exploración y la explotación, moderando la velocidad de las partículas para evitar cambios repentinos en la trayectoria. Por otra parte, los coeficientes cognitivos y sociales (c_1 y c_2) actúan como fuerzas de atracción, el primero impulsa la partícula a visitar las mejores posiciones mientras que el segundo la guía hacia el mejor punto encontrado en todo el grupo. El objetivo general del algoritmo PSO es que las 50 partículas converjan hacia la región más prometedora en el espacio de búsqueda logrando identificar la solución óptima del problema al finalizar el número de iteraciones.

2. **Algoritmo del Lobo Gris (GWO):** El algoritmo GWO, simula la jerarquía y el comportamiento de caza de una mandada de lobos. Se actualizan las posiciones de los lobos de menor rango (Omega) en función de las posiciones de los tres

líderes, Alfa (X_α), Beta (X_β) y Delta (X_δ), el comportamiento se describe en las ecuaciones Eq. 11 y Eq. 12.

$$D_\alpha = \frac{|C_1 \cdot X_\alpha - X(k)|}{1}, X_1 = \frac{X_\alpha - A_1 \cdot D_\alpha}{1} \quad (11)$$

$$X(k+1) = \frac{X_1 + X_2 + X_3}{3} \quad (12)$$

Para el algoritmo se configuró una manada de 50 lobos y 100 iteraciones, ajustando el parámetro de convergencia a de 2 a 0 para transitar del estado de exploración a explotación.

En el caso del Optimizador del Lobo Gris (GWO), la estrategia de control principal no depende de múltiples coeficientes externos, sino del parámetro a , que disminuye linealmente de 2 a 0 a lo largo de las iteraciones. Este mecanismo no es un hiperparámetro que requiera un ajuste específico para cada problema, sino una característica intrínseca del diseño del algoritmo que gestiona la transición de una fase de exploración global a una de explotación local. Alterar este comportamiento equivaldría a proponer una variante del algoritmo, lo cual estaba fuera del alcance de este estudio comparativo. La robustez de GWO radica en su menor dependencia de la sintonización de parámetros externos, lo que refuerza la validez de la comparación.

```

1: Entrada:  $N, K_{max}, f(X)$ 
2: Inicialización ( $k = 0$ ):
3: Inicializar población de lobos  $X_i(0)$  para  $i = 1, \dots, N$ .
4: Calcular  $f(X_i(0))$  y establecer  $X_\alpha, X_\beta, X_\delta$  (las 3 mejores posiciones).
5: for  $k = 0$  to  $K_{max} - 1$  do
6:    $a \leftarrow 2 - 2 \cdot (k / K_{max})$ 
7:   for cada lobo  $i = 1$  to  $N$  do
8:     // Calcular vectores de influencia para líderes  $\alpha, \beta, \delta$ :
9:      $A_1 = 2a \cdot \text{rand} - a$ ;  $C_1 = 2 \cdot \text{rand}$ ;  $D_\alpha = |C_1 \cdot X_\alpha - X_i(k)|$ ;  $X_1 = X_\alpha - A_1 \cdot D_\alpha$ 
10:     $A_2 = 2a \cdot \text{rand} - a$ ;  $C_2 = 2 \cdot \text{rand}$ ;  $D_\beta = |C_2 \cdot X_\beta - X_i(k)|$ ;  $X_2 = X_\beta - A_2 \cdot D_\beta$ 
11:     $A_3 = 2a \cdot \text{rand} - a$ ;  $C_3 = 2 \cdot \text{rand}$ ;  $D_\delta = |C_3 \cdot X_\delta - X_i(k)|$ ;  $X_3 = X_\delta - A_3 \cdot D_\delta$ 
12:    // Actualizar posición para la siguiente iteración
13:     $X_i(k+1) \leftarrow (X_1 + X_2 + X_3) / 3$ 
14:  end for
15:  Actualizar  $f(X_i(k+1))$  para toda la manada y luego actualizar  $X_\alpha, X_\beta, X_\delta$ .
16: end for
17: return  $X_\alpha$ 

```

Algoritmo 2. Pseudocódigo de GWO

GWO se basa en una estructura de liderazgo donde las tres mejores soluciones encontradas hasta el

momento son representadas por los lobos Alfa (X_α), Beta (X_β) y Delta (X_δ). El resto de la manada, los lobos Omega (ω), actualizan sus posiciones en función de los tres líderes, simulando el proceso de acecho y caza de una presa.

El flujo del proceso se realiza por el número de iteraciones con una población de 50 lobos en el cual se ajusta a su comportamiento mediante algoritmos de convergencia que disminuye linealmente de 2 a 0. Esa convergencia permite transitar de una fase inicial de exploración a una fase final de explotación.

2.4. Técnicas de Análisis y Métricas de Rendimiento

Tomando en cuenta la naturaleza estocástica de los algoritmos metaheurísticos, se realizaron 10 corridas independientes para cada uno, la inicialización de las poblaciones se realizó de forma aleatoria en cada ensayo para garantizar la robustez y lograr resultados fiables del rendimiento. El rendimiento de la experimentación se cuantificó de acuerdo con las siguientes métricas:

- **Error Porcentual Promedio de Parámetros (%Err_{Theta}):** Se calcula como el promedio de los errores absolutos porcentuales para cada uno de los 7 parámetros (N_p):
- **Valor Final de la Función de Coste (MSE):** Es el valor mínimo del MSE alcanzado al finalizar las 100 iteraciones.
- **Tiempo de Computo:** Tiempo total de ejecución de cada corrida, medido en segundos.

Los resultados de las métricas calculados se analizaron estadísticamente usando la media y el mínimo para realizar una comparativa objetiva del desempeño en términos de precisión, eficiencia computacional y la calidad del ajuste.

3. Resultados

A continuación, se presentan los resultados cuantitativos y cualitativos obtenidos en la comparativa entre los algoritmos PSO y GWO. Para lograr una significancia estadística y evaluar consistentemente los métodos, cada algoritmo se ejecutó 10 veces de manera

independiente, partiendo de condiciones iniciales aleatorias.

3.1. Métricas de Rendimiento Cuantitativo

Referente al desempeño de ambos algoritmos a lo largo de las diez ejecuciones, el cual se reporta en la Tabla 1, se reporta la media, así como la desviación estándar del error de estimación de parámetros de igual forma el tiempo de cómputo, así como el mejor resultado obtenido (error mínimo).

Tabla 1: Resumen estadístico del rendimiento de los algoritmos bioinspirados.

Algoritmo	Error promedio (%)	Desv. Estd. Error (%)	Mejor Error (%)	Tiempo promedio (s)
PSO	5.85	1.45	3.58	1451.3
GWO	1.15	0.25	0.85	1424.1

Los resultados mostrados en la Tabla 1 nos indican que el error de estimación promedio para GWO fue de 1.15% (DE ± 0.25), a su vez PSO fue de 5.85% (DE $\pm 1.45\%$). El error mínimo registrado fue de 0.85% para GWO y 3.58% para PSO. Los tiempos de cómputo promedio fueron de 1424.1 s para GWO y 1452.3 s para PSO.

3.2. Comportamiento de Convergencia

La Figura 2 muestra la evolución de la función de coste (MSE) a lo largo de las 100 iteraciones en cada algoritmo en la mejor ejecución de cada algoritmo.

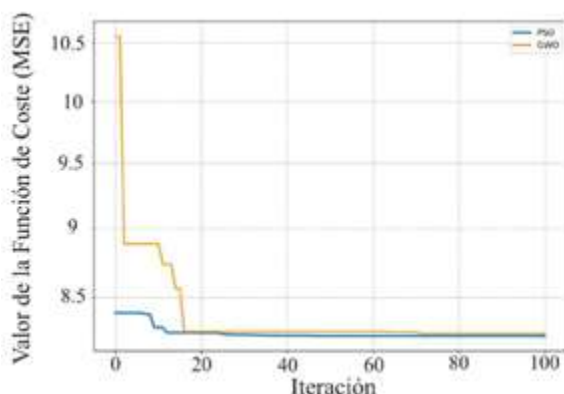


Figura 2. Curvas de convergencia del valor de la función de coste, PSO y GWO.

Como se puede observar en la Fig. 2, GWO presenta una rápida disminución del coste durante las primeras 20 iteraciones, alcanzando un valor estable. Sin embargo, PSO muestra una reducción más gradual del coste a lo largo de las iteraciones, aunque su primera iteración tiene un valor de costes menor a GWO.

3.3. Precisión de Parámetros Individuales

Referente al desglose del error de estimación para cada uno de los siete parámetros se presenta la Figura 3, utilizando a su vez los datos de la mejor ejecución de cada algoritmo.

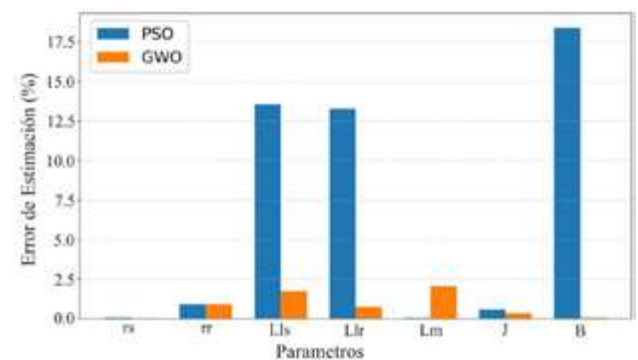


Figura 3. Error de estimación porcentual por parámetro.

Tomando el caso de GWO, el error de estimación en todos los parámetros individuales fue inferior al 2%. En PSO, se registraron errores superiores a 10% en la estimación de las inductancias de (L_{ls} , L_{lr}) y mayores a 17% para el cálculo del parámetro mecánico (B).

Tabla 2. Comparativa parámetros PSO y GWO.

Parámetros	Real	PSO	GWO
r_s	2.45	2.445437	2.454703
r_r	1.83	1.793767	1.833512
L_{ls}	<u>0.008</u>	0.008697	0.008015
L_{lr}	0.008	0.007352	0.008015
L_m	0.203	0.206627	0.203389
J	0.02	0.019830	0.020038
B	0.001	0.001046	0.001001

La Tabla 2 compara los valores reales del conjunto

de parámetros con las estimaciones logradas por los dos algoritmos de optimización: PSO y GWO. Es posible observar que ambos algoritmos se aproximaron al valor objetivo, pero se logró una mejor aproximación con un error promedio de 1.15% a diferencia del 5.85% logrado por PSO.

3.4. Ajuste de las Señales Dinámicas

Con el objetivo de evaluar de manera cualitativa el ajuste de los parámetros, se utilizó el contraste entre la señal objetivo con las simulaciones resultantes de los parámetros obtenidos por cada algoritmo. En la Figura 4 se observa que la señal obtenida por GWO se superpone de mejor manera con la señal objetivo en la Corriente del Estator que PSO.

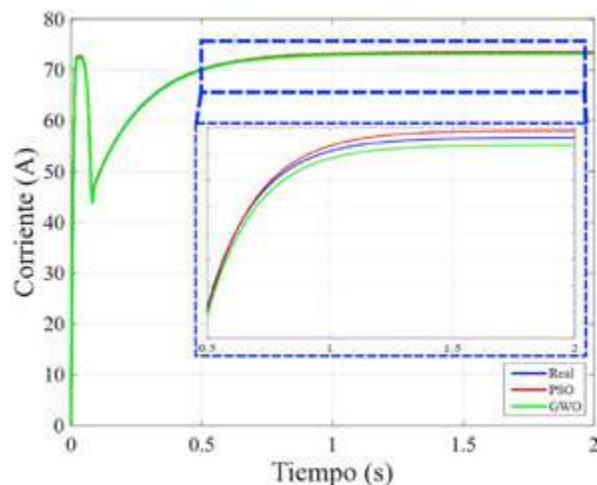


Figura 4. Superposición en Corriente del Estator.

A su vez, la Figura 5 nos muestra de igual forma la comparativa, ahora en el escenario del Torque, notando de igual forma como GWO logra un mejor acercamiento a la señal objetivo del sistema.

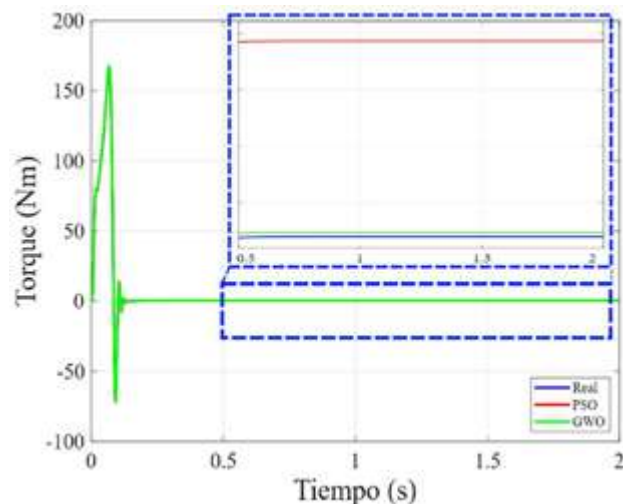


Figura 5. Superposición en Torque.

Finalmente, en la parte de comparativas con las señales objetivo del sistema, la Figura 6 evidencia un desempeño casi idéntico con la identificación de los parámetros usando GWO.

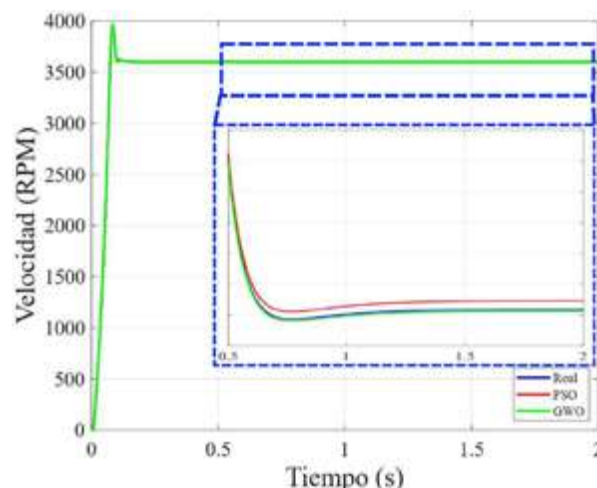


Figura 6. Superposición en Velocidad del Rotor.

Para complementar este análisis visual con una métrica cuantitativa, la Figura 7 presenta la distribución del error medio que tuvo cada modelo para los parámetros identificados. Es posible notar que la distribución del Algoritmo GWO es cercana al 3%, a diferencia de PSO que se distribuye alrededor de 7.5% y 6.2%.

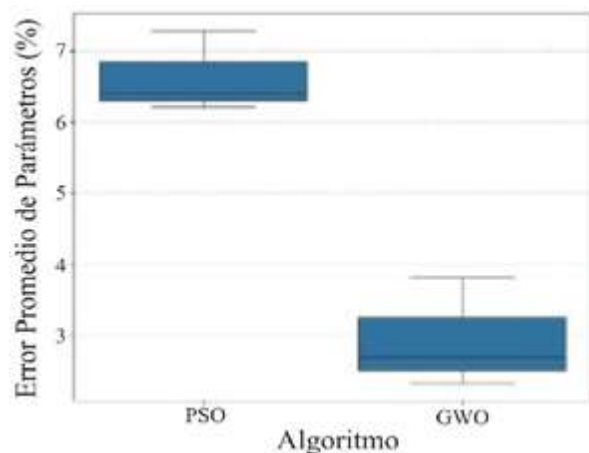


Figura 7. Distribución del Error de parámetros.

4. Discusión

El análisis obtenido se centra en la disparidad en el rendimiento observada entre los dos algoritmos, GWO y PSO, se exploró la ventaja en el uso de uno u otro algoritmo dadas sus características intrínsecas, siendo el pilar de importancia el lograr una identificación precisa de los parámetros de un motor de inducción dado que constituye un requisito fundamental para una implementación de estrategias de control avanzadas enfocadas en el rendimiento como sería FOC. Como se ha documentado, una estimación no certera del flujo, directamente afectada por errores en el cálculo de los parámetros, impacta negativamente en la dinámica de FOC [7].

En este contexto, el hallazgo central de este estudio cataloga el rendimiento de GWO sobre PSO una relevancia en la práctica de forma significativa. Los resultados que se presentan en la Tabla 1, revelan que GWO obtuvo un error porcentual promedio del 1.15% en la estimación de parámetros, mientras PSO obtuvo un promedio de 5.85%. Dicha diferencia representa una mejora en la precisión de aproximadamente cinco veces. Un error de ese calibre especialmente en las desviaciones de parámetros clave como inductancias de dispersión (L_{ls} , L_{lr}) y el coeficiente de fricción viscoso (B), es suficientemente grave como para inducir problemas operativos importantes como ondulaciones de par (torque ripple) así como un aumento en las pérdidas energéticas de un sistema FOC real. Por el contrario, un error del 1.15% se encuentra en un margen

de tolerancia que permite lograr un control eficiente haciendo posible que el sistema opere en su punto de eficiencia óptima [8].

La superioridad que presenta GWO, radica en su mecanismo de búsqueda, el cual emula la jerarquía social y tácticas de caza de los lobos grises. A diferencia de PSO, que depende de un único líder global, GWO utiliza las tres mejores soluciones para poder guiar una búsqueda. [9] Estos hallazgos se alinean directamente con la literatura donde estudios comparativos exhiben que GWO logra una mayor precisión en la búsqueda de identificación que PSO y algoritmos Genéticos [10].

Para consolidar esta discusión, la siguiente tabla resume las diferencias clave entre ambos métodos en el contexto de optimización de parámetros abordada en el presente estudio.

Tabla 3. Comparativa de Atributos Metodológicos de PSO y GWO.

Atributo Metodológico	Optimización por Enjambre de Partículas (PSO)	Optimizador del Lobo Gris (GWO)
Mecanismo de guía	Centralizado: Un único líder global (g_{best}) atrae a todo el enjambre.	Jerárquico: Tres líderes (α , β , δ) guían colectivamente la búsqueda.
Riesgo de convergencia prematura	Alto. La fuerte atracción hacia un único g_{best} puede atrapar al enjambre en óptimos locales.	Moderado. La guía de múltiples líderes diversifica la búsqueda y reduce el riesgo de estancamiento.
Balance entre exploración y explotación	Controlado por parámetros externos (w , c_1 , c_2) que requieren un ajuste cuidadoso.	Controlado intrínsecamente por un único parámetro (α) que transita de forma programada.
Resultados en el estudio.	Precisión inferior (error del 5.85%), menor robustez. Consistente con su debilidad teórica.	Precisión superior (error del 1.15%), mayor robustez. Consistente con su fortaleza estructural.

En definitiva, la tabla 3 consolida la evidencia de

que la disparidad en el rendimiento no es casual, sino una consecuencia directa de la arquitectura de cada algoritmo. Mientras que PSO, con su guía centralizada, demuestra una alta vulnerabilidad a estancarse en óptimos locales, dada su naturaleza teórica, GWO mitiga dicho riesgo dada su estructura de liderazgo jerárquico. GWO al utilizar un balance entre la exploración y explotación le brinda una robustez suficiente para poder descubrir el paisaje de error complejos y a su vez converger de manera consistente hacia el óptimo global, posicionándolo como una herramienta significativamente más fiable y precisa para aplicaciones de ingeniería donde la exactitud del modelo es crítica.

5. Conclusión

El presente estudio realiza una evaluación comparativa en el rendimiento de dos algoritmos de optimización bioinspirados, específicamente GWO y PSO, en la tarea de parametrizar el modelo dinámico de un motor de inducción. En este caso se utiliza un modelo de quinto orden y datos transitorios con ruido añadido para simular el error que se obtiene en un entorno de medición realista.

Los resultados demuestran que ambos algoritmos son capaces de obtener los parámetros que describen el comportamiento del sistema dinámico. Sin embargo, se destaca en los resultados la superioridad de GWO y PSO para este escenario. El algoritmo GWO (1.15%) logra alcanzar un error promedio porcentual en la estimación de los parámetros significativamente menor en comparación con PSO (5.85%). De igual forma, GWO presenta una desviación estándar menor, dando evidencia de lograr una mayor robustez y consistencia en los parámetros.

La aplicabilidad encontrada en la parametrización del modelo mediante GWO abre nuevas oportunidades en la investigación y aplicaciones prácticas. Futuros trabajos se centrarán en el uso de dichos modelos para el desarrollo de mecanismos para la detección de fallos y mantenimiento preventivo. Un modelo con este tipo de ajustes personalizables permite establecer una línea base precisa para el comportamiento óptimo. De esta misma manera, desviaciones en los parámetros a lo largo del tiempo, pueden indicar un desgaste en el motor o una

falla operativa a futuro. Esta personalización del modelo es un pilar de suma importancia para la implementación de gemelos digitales.

Conflictos de interés

Los autores declaran que no existen conflictos de interés.

Agradecimientos

Se agradece al Consejo Nacional de Ciencia, Humanidades y Tecnología y a la Universidad Autónoma de Querétaro por los recursos otorgados para la realización de esta investigación.

Abreviaturas

Las siguientes abreviaturas se utilizan en este manuscrito:

- MI:** Motores de Inducción
- MPC:** Control Predictivo Basado en Modelo
- MOA:** Algoritmos de optimización metaheurísticos
- SCA:** Algoritmo Seno Coseno
- DOL:** Arranque directo en línea
- DE:** Desviación Estándar
- GWO:** Grey Wolf Optimizer (Optimizador del Lobo Gris)
- MSE:** Mean Squared Error (Error Cuadrático Medio)
- PSO:** Particle Swarm Optimization (Optimización por Enjambre de Partículas)
- FOC:** Field Oriented Control

Simbología del Modelo Matemático

- r_s : Resistencia del Estator
- r_r : Resistencia del Rotor
- L_{ls} : Inductancia de Dispersión del Estator
- L_{lr} : Inductancia de Dispersión del Rotor
- L_m : Inductancia de Magnetización
- J : Momento de Inercia del Rotor
- B : Coeficiente de Fricción Viscosa
- i_{ds}, i_{qs} : Corrientes del estator en el marco de referencia d-q
- i_{dr}, i_{qr} : Corrientes del rotor en el marco de referencia d-q
- T_e : Par Electromagnético
- w_r : Velocidad Angular del Rotor

6. Referencias bibliográficas

- [1] Q. Wang, H. Shi, C. Ye, and H. Zhou, “Synergizing metaheuristic optimization and model predictive control: A comprehensive review for advanced motor drives,” *Energies*, vol. 18, art. no. 4831, 2025.
- [2] B. K. Reddy, K. S. Ayyagari, Y. P. Kumar, N. C. Giri, P. V. Rajgopal, G. Fotis, and V. Mladenov, “Experimental benchmarking of existing offline parameter estimation methods for induction motor vector control,” *Technologies*, vol. 12, art. no. 123, 2024.
- [3] V. Charilogis, I. G. Tsoulos, D. Tsalikakis, and A. M. Gianni, “The SIOA algorithm: A bio-inspired approach for efficient optimization,” *AppliedMath*, vol. 5, no. 4, art. no. 135, 2025.
- [4] O. Avalos, E. Cuevas, and J. Gálvez, “Induction motor parameter identification using a gravitational search algorithm,” *Computers*, vol. 5, art. no. 6, 2016.
- [5] H. Wang, Y. Gao, and Y. He, “Hybrid sine cosine and particle swarm optimization algorithm for high-dimensional global optimization problem and its application,” *Mathematics*, vol. 12, art. no. 965, 2024.
- [6] J. Zhou, Q. Zhao, Z. Feng, K. Wu, L. Zhang, and H. Qin, “Trajectory-regularized localization in asynchronous acoustic networks via enhanced PSO optimization,” *Sensors*, vol. 25, art. no. 5722, 2025.
- [7] F. Wang, Z. Zhang, X. Mei, J. Rodríguez, and R. Kennel, “Advanced control strategies of induction machine: Field oriented control, direct torque control and model predictive control,” *Energies*, vol. 11, art. no. 120, 2018.
- [8] P. Paramo-Balsa et al., “Estimation of power output and efficiency of induction motors: A new non-intrusive approach,” *Sensors*, vol. 25, no. 3, art. no. 754, Jan. 2025.
- [9] P. Manoharan, S. Ravichandran, J. S. V. Siva Kumar, M. Abdullah, T. Ching Sin, and T. J. Tengku Hashim, “Electrical equivalent circuit parameter estimation of commercial induction machines using an enhanced grey wolf optimization algorithm,” *Biomimetics*, vol. 10, art. no. 228, 2025.
- [10] X. Lü, S. Huang, Y. Wang, and Z. Ji, “Grey wolf optimizer for parameters identification of induction motor with improved model,” *J. Syst. Simul.*, vol. 28, no. 12, pp. 3010–3018, 2016.

Proposal for improving dimensional accuracy for an open-source 3D bioprinter

Proposal for improving dimensional accuracy for an open-source 3D bioprinter

Peña Solache, Jaime*, Hernández Rosas, Fabiola**, Iturralde Carrera, Luis Ángel, Zapatero Gutiérrez, Araceli, García Ávila, Josué.

*Escuela de ingeniería**

*Universidad Anáhuac Querétaro ***

Querétaro, México

00425960@anahuac.mx; ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-7084-699X>, fabiola.hernandez86@anahuac.mx; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2287-7041>, luis.iturralde@anahuac.mx; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5595-9329>, araceli.zapatero@anahuac.mx; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1421-837X>, josue.garciaavila@anahuac.mx; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3522-4165>

Resumen: La bioimpresión es una tecnología emergente con gran potencial en investigación relacionada al diseño de tejidos y manufactura personalizada en biomédica. Aunque existe una limitación al momento que adaptarla entornos académicos y experimentales, ya que aún se ve limitada por el elevado costo y la complejidad técnica de los equipos comerciales. Teniendo como objetivo la construcción de una bioimpresora basada en la arquitectura de código abierto Printess al utilizar un sistema de Escritura Directa con Tinta (DIW) por jeringas. Sin embargo, este método de manufactura posee problemas al momento de buscar una alta precisión e inestabilidad geométrica para biotintas de baja viscosidad para contrarrestar esta medida y la inestabilidad geométrica de las biotintas de baja viscosidad, se propone una arquitectura de manufactura híbrida que integra un módulo complementario de curado volumétrico (VAM). El desarrollo sigue la metodología Design Thinking para la construcción y calibración de un prototipo funcional basado en una estructura cartesiana. En esta fase inicial, se validó el sistema de extrusión DIW, empleando Carbopol como biotinta preliminar para el control de propiedades reológicas. Los resultados sientan las bases para el diseño del módulo de curado volumétrico para concretar una arquitectura híbrida para lograr impresiones con mayor fidelidad geométrica de estructuras suspendidas en futuras etapas.

Palabras clave: manufactura aditiva; ingeniería mecánica; manufactura aditiva volumétrica (VAM); Procesamiento Digital de Luz (DLP); Escritura directa con tinta (DIW).

Abstract: Bioprinting is an emerging technology with great potential in research related to tissue design and customized manufacturing in biomedicine. However, there is a limitation when adapting it to academic and experimental environments, as it is still constrained by the high cost and technical complexity of commercial equipment. The objective is to build a bioprinter based on the Printess open-source architecture using a Direct Ink Writing (DIW) system with syringes. However, this manufacturing method has problems when seeking high precision and geometric instability for low-viscosity bioinks. To counteract this and the geometric instability of low-viscosity bioinks, a hybrid manufacturing architecture is proposed that integrates a complementary volumetric curing (VAM) module. The development follows the Design Thinking methodology for the construction and calibration of a functional prototype based on a Cartesian structure. In this initial phase, the DIW extrusion system was validated, using Carbopol as a preliminary bioink for the control of rheological properties. The results lay the foundation for the design of the volumetric curing module to finalize a hybrid architecture to achieve prints with greater geometric fidelity of suspended structures in future stages.

Keywords: additive manufacturing; mechanical engineering; volumetric additive manufacturing (VAM); digital light processing (DLP); Direct Ink Writing (DIW)

1 introduction

Despite advances in bioprinting as a key tool in the generation of biomedical models and functional structures, access to it remains limited because commercial equipment capable of manipulating soft materials with submillimeter resolution can cost up to \$200,000 or more [1]. This barrier prevents its adoption in various settings, which is why part of the academic community, such as maker hobbyists, has promoted the use of open-source software in 3D printing, which has also spread to bioprinting [2, 3]. These initiatives aim to democratize access to technology by developing low-cost systems, where the creation of functional prototypes would be highly beneficial.

The use of open-source bioprinters, such as Printess, a \$250 open-source bottom-up 3D printer [3], has partially democratized access to three-dimensional printing technologies in educational and research contexts. These printers use simple Cartesian mechanisms and syringes as an extrusion system, which reduces costs but also limits dimensional control and the geometric quality of the final result. Their operation depends largely on mechanical stability, precise dosing, and the properties of the material used.

At the same time, additive manufacturing using light projected from multiple angles allows layer-by-layer printing of complete structures in seconds through radical polymerization reactions. Within the field of bioprinting and additive manufacturing, various technologies have been developed that use mechanisms other than sedimentation and solidification. Among the best known are stereolithography (SLA), digital light processing (DLP), selective laser sintering (SLS), and two-photon polymerization (2PP). More recently, proposals have emerged that break with the layer-by-layer approach, such as woodcut printing and light sheet microprinting, converging in what is known as Volumetric Additive Manufacturing (VAM) [4].

However, its implementation requires advanced optics, specific materials, and complex computational processing, making it inaccessible for many emerging projects. This project proposes a design that adapts the principles of volumetric curing in a simplified version, complementing suspended extrusion bioprinting.

There is therefore a need to optimize this type of printer, as low-viscosity inks (live cells embedded in hydrogels) present challenges in bioprinting, as grav-

ity, temperature, and poor process control can cause the printed filaments to collapse, resulting in a loss of shape fidelity and reduced resolution. [5].

Furthermore, process hybridization may be crucial to expanding the application of these technologies in academic and experimental settings. Based on photochemical reactions, this technique adapts to a wide range of photocurable biomaterials by selecting light sources with wavelengths longer than ultraviolet (UV) light (400 nm), which are more cell-friendly. The polymerization reaction typically occurs rapidly (several seconds to minutes) [6].

The overall objective of this work is to propose a hybrid manufacturing design based on the adaptation of the Printess bioprinter, integrating a complementary system that utilizes the enveloping projection of light from multiple angles, inspired by the principles of Volumetric Additive Manufacturing (VAM), to enhance the dimensional accuracy of the printed parts. In this first stage, the functional construction of the printer will be carried out through extrusion using syringes, utilizing a preliminary material that takes into account mechanical properties, resolution, and geometric quality.

Therefore, the functional construction of the printer, the development of the proposed system, and preliminary validation through printing tests with low-viscosity bioinks are being considered. To this end, digital tools such as SolidWorks 2024 for 3D modeling, UltiMaker Cura for G-code generation, Marlin Firmware as the control environment, Pronterface for system execution and monitoring, and Visual Studio Code with Python 3.13.5 for custom code adjustments are used.

2 Materials and methods

The choice of materials was based on the criteria of accessibility, modularity, and compatibility with the open-source design proposed by the Printess project.

2.1 Materials and physical components

Commercially available components were considered. The complete list of materials is presented in Table 1, which includes the RUMBA+ card, linear stepper motors, M3 screws, syringes, and acrylic structural components. Two 1-milliliter syringes were considered due to their size, which fits the bioprinter design.

List of materials

Table 1: List of physical materials used in the bio-printer.

Category	Component	Quantity	Technical description
Electronics and control	BigTreeTech Octopus	1	32-bit main board for centralized system control
	TMC2208 drivers	1	Silent controllers for stepper motors
	Power supply	1	24V DC power supply for motors and electronics
	Connection cables	2	Cables for signal and power transmission
Actuators and movement	NEMA 11 100 mm linear motors	4	Stepper motors for X/Y/Z axis movement
	NEMA 11 50 mm linear motors	2	Motors for auxiliary system or secondary extrusion
	RUMBA+ controller	1	Alternative control board for expansion or testing
	1/4" acrylic 12x12"	2	Laser-cut structural support plates
Structure and fastening	M3 12 mm screws	70	Fastening of printed parts and linear guides
	M3 45 mm screws	8	Joining main modules
	M3 nuts	50	Complement for metal fasteners
	M3 threaded inserts	50	For mounting plastic and PLA parts
	PLA filament	< 0.4 kg	Manufacture of supports and functional parts
Printing system	1 ml extrusion syringes	2	Pressure sedimentation system
	Plastic dispensing tips	50	Material output control by nozzle diameter
	Carbopol	10 L	Test material with viscoelastic properties
	Transparent container	1	Container for stationary printing and curing

2.2 Laboratory or workshop tools and equipment

A laser cutter was used to manufacture the structural components of the prototype, cutting and drilling acrylic plates according to the models previously designed in CAD. Additive manufacturing by fused filament was also applied using a Creality K1C 3D printer to produce mechanical supports and auxiliary elements (Figure 1).



Figure 1: PLA filament prints for structural supports for the printer.

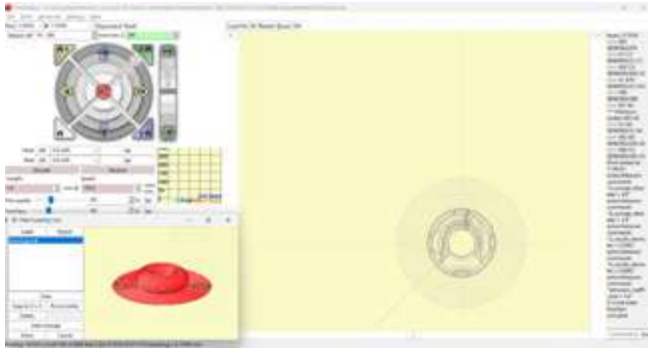
The assembly process was carried out using precision hand tools, including screwdrivers for millimeter screws and Allen keys for adjusting M3 screws in the

connection of structural modules, motors, and linear guides. For the electrical connection stage, a digital multimeter was used to calibrate the voltage of the drivers. In addition, fine-tip tweezers were used to facilitate the handling of cables, connectors, and conductive elements in confined spaces.

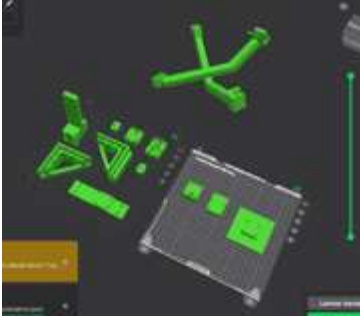
For the dimensional validation of the system, a digital vernier caliper was used to verify alignment and assembly tolerances in moving components and critical coupling areas. This stage was crucial in ensuring the prototype's correct mechanical operation before integrating the electronic control system.

2.3 Software

The three-dimensional modeling of the structure was developed in SolidWorks 2024. This CAD environment allowed us to define critical dimensions and verify geometric interference between components. It also facilitated the generation of assemblies and the export of parts in STL format for subsequent 3D printing. For the processing of three-dimensional models and the generation of G-code, UltiMaker Cura software was used, as shown in Figure 2, which allows for the configuration of parameters such as layer height, infill, speed, and extrusion temperature, tailored to the requirements of parts printed in PLA.



(a) Direct control interface with the printer.



(b) CAD models in UltiMaker Cura for 3D printing.

Figure 2: CAD model of the Printess bioprinter.

The resulting file is interpreted and executed through Pronterface, an interface that allows direct communication between the computer and the controller card to start printing and calibrate the motion system Figure 2.

The hardware control logic is based on Marlin firmware, compatible with the RUMBA+ board, which offers support for unconventional printing architectures through an open configuration of speeds, accelerations, the number of axes, and extrusion types. Knowing how the software component works is critical in most commercial bioprinters, as the predominant software is slicing software, which translates a 3D model into a series of single-step commands (G-code) that tell the print head where to move and how much material to deposit [1]. The Arduino IDE (v1.8.19) environment is quite helpful for firmware adjustments and compilation, complemented by VS Code and Python 3.13.5 for editing control scripts and task automation.

Additionally, it is known that the manufacture of thick, functional tissues and organs depends on the successful generation and integration of perfusable vascular networks [7]. For this reason, the SVVascularize plugin is installed in Python and executed in

Visual Studio Code, serving as a tool for generating three-dimensional vascular structures.

2.5 Equations

Power Law Model

This describes the non-Newtonian behavior of the bioink, in which its shear viscosity can be studied, fitting the power law model [8] based on the following Equation 1:

$$\eta = K \cdot \dot{\gamma}^n \quad (1)$$

Where eta represents shear viscosity (Pa s), K represents the consistency index (Pa s), “ $\dot{\gamma}$ ” represents the shear rate and n represents the flow index.

Percentage recovery

Evaluating the material’s ability to recover its shape after stress, its percentage recovery was determined using the following Equation 2 [9] :

$$\text{Recovery (\%)} = \frac{G'_{\text{recovered}}}{G'_{\text{initial}}} \times 100 \quad (2)$$

Where $G'(\text{recovered})$ is the average of the G' values after removing the 100 Pa stress, and $G'(\text{initial})$ corresponds to the average of the G' values in the first relaxation stage.

Printability Index (Pr)

To determine the structural fidelity of a printed mesh or grid, the printability index (Pr) could be implemented. In the Printess repository, a program is available that calculates Pr by processing a .txt file of G-code to determine the extrusion distances.

The extrusion calculations are based on the assumption that the cylindrical geometric volume introduced into the syringe body is equal to that extruded from the nozzle, which allows the height, or extrusion distance, to be calculated. The extrusion distance is defined as the distance in millimeters traveled by the stepper motor connected to the syringe plunger.

The purpose of this program is to calculate the distance that the extruder shaft must push the plunger to extrude a filament of the desired volume and diameter based on the following Equation 3 :

$$(3)$$

$$E = \frac{k \cdot l \cdot n_d^2}{b_d^2}$$

The extrusion distance (non-dimensional) is denoted as E . The extrusion coefficient, represented by k (non-dimensional), is a scale factor that the user determines. The diameter of the syringe barrel is indicated as b_d (meters), while the diameter of the nozzle is represented as n_d (meters). The length of the path is expressed as l (meters).

Geometric fidelity (%)

To estimate the quality of the object and compare the dimensions of the tests obtained, Equation 4 can be used to estimate the print quality/fidelity of the printed constructions (p):

$$\varphi = \frac{A_{rt} - A_{re}}{A_{rt}} \quad (4)$$

Where A_{rt} represents the theoretical area (m^2) of the network and A_{re} the experimental area (m^2) [9].

These metrics will enable us to experimentally analyze the print quality obtained and guide the development of the system, which will be covered in the next period.

The independent variables considered in this experimental design include the two syringes used in the extrusion system, the extrusion time of the syringe, and the relative viscosity of the material used, which the proportion of gelling agent will modulate.

The dependent variables to be evaluated are the dimensional accuracy of the printed parts (compared to the CAD model), the observed surface quality (including texture and uniformity), and the geometric stability after curing, verifying whether there are any deformations, contractions, or loss of volume.

Therefore, we plan to carry out numerous printing tests with different configurations, observing the dimensional behavior of the parts obtained:

- Regularity of material flow during extrusion.
- Dimensional accuracy of printed lines and basic structures.
- Qualitative Comparison between parts.
- Initial assessment of the effect of soft material viscosity on print quality (through empirical measurement or reference to known values).

Finite element analysis and structural simulations are not yet planned at this stage. The CAD design will

undergo geometric review and iterative adjustments based on the behavior observed during testing.

In later stages of the project, the possibility of integrating more advanced analyses, such as material strength and rheological studies, will be considered.

2.7 Printing material:

Due to the project's practical approach and the limited scope of the first phase, priority will be given to using experimental methods for the functional validation of the system, based on the analysis of the material to be used. Although other materials, such as GelMA, can be used, validation tests can be performed based on four key metrics that have been identified.

In addition to being non-toxic, biocompatible, and impermeable to bioink and its components to minimize diffusion, the support medium must also possess the appropriate rheological properties, characterized by elastic limit and viscosity, to allow the needle to move through the medium during printing while being strong enough to support the printed construct without movement after printing [10, 11]. Carbopol 940 proves to be an economical and reliable choice, as it enables viscosity control before bioprinting.

Carbopol 940 is a synthetic polymer used as a gelling agent in biomedical formulations due to its ability to form high-viscosity hydrogels at low concentrations. Its rheological behavior depends on factors such as concentration, pH, temperature, and the presence of neutralizing agents, including triethanolamine (TEA). In bioprinting, these properties make it suitable for forming suspended structures and maintaining temporary stability during extrusion sedimentation.

Typical values for Carbopol 940 at relevant concentrations, as determined by experimental studies and technical literature, are presented in the Table 2. Values may vary slightly depending on the degree of neutralization and preparation:

Table 2: Approximate mechanical properties of Carbopol 940 as a function of concentration.

Concentration (%)	Viscosity (Pa.s)	Modulus G' (Pa)	Modulus G'' (Pa)	Observations
1.0	2-10	10-50	2-15	Smooth flow, good extrusion, poor structural capacity.
1.5	20-40	50-200	20-50	Good balance between extrusion and shape. Less collapse when printing.
2.0	100-300	300-600	80-150	High structural strength. Difficult to extrude.

In practice, different Carbopol-based mixtures were prepared, varying their concentration to generate different viscosity levels [12]. These formulations enabled the analysis of the fluidity of the bioink during sedimentation, as well as its ability to maintain

printed structures due to its elasticity and behavior during extrusion. Table 3 shows the proportions used and the preliminary observations obtained after their preparation.

Table 3: Mixing ratios used for the preparation of Carbpol-based bioink.

Sample	Carbpol (%w/w)	Glycerin (%w/w)	Water (%w/w)	TGA (drops)	Initial observations
A	1.0	10	89.0	4	Light gel, easy to mix. Small bubbles appear.
B	1.5	15	83.5	6	Thicker, better shape retention. Moderate bubbling.
C	2.0	10	88.0	6	High viscosity, difficult to extrude. Structure is maintained, but with persistent bubbles.

Given that the structures to be printed are based on hydrogels with low initial mechanical strength, the best option is to opt for suspended printing in a support medium. In this regard, the possible implementation of the FRESH approach is proposed, which uses a thermoreversible support bath that allows the sedimentation of hydrogels in complex three-dimensional geometries. This technique has been shown to significantly improve print fidelity and facilitate the creation of suspended internal structures thanks to the temporary support provided by the gel medium. In addition, FRESH has been developed using open-source tools[13, 14], making it an accessible, adaptable, and highly cost-effective platform for biomedical applications in additive manufacturing.

This serves as a strategy to mitigate the initial mechanical limitations of soft hydrogels. By embedding the bioink within a support medium, the influence of gravity is reduced and temporal stability during sedimentation is improved, which is critical when using materials with low elastic modulus or high fluidity, such as Carbpol. This technique complements the limited mechanical properties of the bioink through passive confinement.

2.7 Technical or experimental methodology:

The methodology applied is based on the Design Thinking (DT) approach, adapted to a context of engineering design and iterative prototype development. The use of the DT methodology to develop solutions in various areas, including biomedicine, education, computer science, and engineering, among others, can be found in the literature [15].

This strategy allows the project to be approached from an understanding of the technical problem, followed by the definition of functional requirements, the ideation of mechanical and electronic solutions, the development of the CAD model, and the construction of the initial prototype, as shown in Figure 3.

At a technical level, the process includes the following stages:

- CAD modeling of the mechanical printing system and the rotating curing module.
- Laser cutting and additive manufacturing to produce the physical parts of the prototype.
- Structural assembly and mounting of electronic and mechanical components.
- Configuration of Marlin firmware for motion control.
- Preliminary validation through movement and alignment tests.

However, empirical validation based on dimensional observations is proposed only at this stage. The results obtained will serve as the basis for defining the next stage, where the performance of the volumetric curing system and its effect on the accuracy of the printed structures will be evaluated.



Figure 3: Flowchart applied to project development.

Phase 1: Understanding (Empathy)

The development process began with a research stage focused on the academic context, where the arrival of additive manufacturing has facilitated a wide variety of processes, as bioprinters have already proven to be transformative in the disciplines of tissue engineering and regenerative medicine [1, 16].

In particular, bioprinting of soft materials has emerged as a significant technique in biomedical and educational applications, distinguishing itself for its

potential in the manufacture of cellular scaffolds, anatomical models, and functional tissues. These printers could be fundamental in the manufacture of complex geometries for medical transplants or in the precise sedimentation of cells to promote coordinated function and development [17].

However, users interested in these technologies face considerable economic and technical barriers, especially when seeking to work with high-precision commercial equipment. Even those bioprinters that are expensive often contain proprietary software, which prevents them from being customized for specific laboratory applications. Recently, researchers have manufactured and published open-source 3D extrusion bioprinters [1], representing a favorable alternative due to their accessibility, customizability, and compatibility with different types of materials.

Among these initiatives, particular attention was paid to the Printess bioprinter, which operates using syringe extrusion. Despite its modular design, the system has limitations in terms of extrusion control, geometric resolution, and printing stability, which necessitate the implementation of improvements focused on mechanical design and the integration of optical post-curing processes. In this phase, it was understood that the system had to be adapted to meet the low-dimensional user needs, as well as the functional requirements of the material, taking into account its viscoelastic and photosensitive properties, which laid the foundation for the technical formulation of the problem.

Phase 2: Definition of the problem

With an understanding of the project, the central problem was defined as the low-dimensional accuracy and geometric instability of prints made with open-source extrusion bioprinters. These limitations affect the fidelity of the parts when working with viscoelastic or photosensitive materials. Therefore, the project's main technical objective is to design a stationary light-curing module that improves the structural quality of the prints, addressing mechanical, material, and optical variables from a hybrid manufacturing perspective.

Phase 3: Ideation

Criteria of modularity, ease of assembly, and compatibility with the existing hardware of the Printess bioprinter guided this ideation process. For the movement system, a three-axis Cartesian architecture was

chosen for its simplicity, reliability, and ease of controlling the trajectory of the extruder syringe. For programming, Visual Studio Code with Python was selected due to its versatility and numerous functions, which allow access to file locations and facilitate the easy installation of firmware such as Marlin, making it very suitable for this project.

Additionally, Carbopol was selected for use in this initial stage as a rheological modifier in the bioink due to its viscoelastic behavior, stress-thinning capacity, and rapid recovery, which are ideal properties for direct printing. However, given the soft properties of the printed material and the low initial rigidity of the hydrogel, its use within a suspended support medium is being considered.

In particular, the adoption of the FRESH (Freeform Reversible Embedding of Suspended Hydrogels) approach is contemplated, which allows complex structures to be printed within a granular support gel that acts as a temporary confinement medium [13, 18]. This method has demonstrated high printing fidelity and geometry preservation in materials such as GelMA, collagen, or alginate. It can be adapted for use with Carbopol as a reversible support medium.

This allows suspended geometries to be printed without collapsing, increasing the precision and stability of the deposited lines, with behavior based on their mechanical and rheological properties. Likewise, the generation of test structures, vascular structures, and structures with these geometries allows for the evaluation of the system's ability to maintain complex shapes and, in the future, to compare its performance before and after curing. This ideation phase allowed for the consolidation of a clear direction for the development of the prototype and the preparation of its experimental validation.

Finally, it was proposed to design a stationary lighting module that utilizes ultraviolet (UV) light with an angular distribution from a single point. This stage is proposed as a complementary process, carried out after printing to improve interline adhesion and reduce deformation in sensitive parts. This module will be modeled in SolidWorks, demonstrating its mechanical adaptation to the main design and its potential integration as a removable accessory or one that can be attached to the Z-axis.

Phase 4: Prototyping

During this phase, the central bioprinting system was constructed based on the design of the Printess printer, an open-source model developed for syringe printing. The prototype was assembled using a three-axis (X, Y, Z) Cartesian structure, designed to provide precise movement of the extruder syringe in a workspace defined by linear guides, NEMA 17 stepper motors, and 3D-printed components.

The structural base of the system consists of laser-cut acrylic plates joined together using M3 screws and reinforced with PLA. The motors are managed by the RUMBA+ controller board, configured with Marlin firmware to enable travel calibration, extrusion control, and axis movement.

The extrusion system was designed to integrate standard syringes attached to a printed clamping system, allowing Carbopol sedimentation through the use of Engineered Fluid Dispensing precision dispensing tips, made of plastic, which would enable control of the outlet diameter and improve the resolution of the deposited material. This configuration facilitates the exchange of nozzles according to the type of material or level of detail required.

The assembly was carried out following a modular sequence that allowed for the validation of the alignment between axes, the mechanical stability of the platform, and communication with the control system. Preliminary low-viscosity movement and extrusion tests were conducted to verify the basic functionality of the system, excluding the post-curing stage. This version of the prototype establishes a functional baseline for the stationary light-curing system to be integrated in the next stage.

Phase 5: Evaluation (Testing)

A validation strategy has been established that includes the use of physical and geometric metrics applicable to extrusion printing. These metrics will enable us to assess the quality of the generated parts and gain a deeper understanding of the system's behavior under various Carbopol configurations, nozzles, and printing parameters.

One of the equations considered is the power law model, used to characterize the rheological behavior of the printed material, which may exhibit non-Newtonian properties such as viscosity reduction with shear stress. This will allow the ease of extrusion and response during deposition to be interpreted. Ad-

ditionally, the percentage of recovery will be calculated, which reflects the material's ability to maintain its shape after deposition, particularly in soft gels or viscoelastic materials.

Likewise, the evaluation of geometric fidelity will be implemented, which involves comparing the expected dimensions according to the CAD model with the actual dimensions obtained in the printed parts. As an additional parameter, the printability index (Pr) will be used, which is a metric integrated into the software available in the official Printess repository. This index is calculated automatically in the Visual Studio Code environment, taking into account parameters such as nozzle diameter, extrusion pressure, and bioink characteristics. These tests, although preliminary, will allow us to establish a baseline for system performance before incorporating the light-curing stage in future phases.

3 Proposed technical methods

When considering the primary manufacturing strategies employed in bioprinting, it is essential to recognize that they significantly impact printing time, resolution of the printed structure, and the stability of the deposited material. Comparing extrusion-based methods with those that use light curing, and also whether photopolymerization begins immediately after the bioink is deposited from the nozzle; this prevents nozzle clogging (if the material is pre-articulating) and excessive filament extension (if the material crosslinks after sedimentation)[19].

Table 4 summarizes the key characteristics of various representative techniques, including syringe extrusion, inkjet, stereolithography (SLA), and volumetric additive manufacturing (VAM). Specifically, a light-based crosslinking mechanism prevents the soft and viscous bioink from deforming under its own weight.

This comparison enables us to identify the relative advantages and limitations of each approach, supporting the selection of a hybrid architecture that combines the direct extrusion of materials with a complementary post-curing process using light.

Table 4: Comparison of sedimentation and light-curing bioprinting techniques.

Parameter	Sedimentation			Light curing		
	Inkjet	Extrusion	Pick & Place	Stereolithography	Two Photons (2P)	Volumetric
Geometry	2D	3D	3D	3D Complexity	3D Complexity	3D Complexity
Resolution	100 μm	100 μm	100 μm	10–100 μm	1 μm	100 μm
Scale	cm	cm	cm	cm	mm	cm
Multimaterial	Yes	Yes	Yes	No	No	No

To contextualize the hybrid manufacturing proposal, a comparison was made between the main bioprinting techniques grouped into two broad categories: sedimentation (Inkjet, Extrusion, and Pick & Place) and light curing (Stereolithography, Two-Photon, and Volumetric). The main advantages and limitations are described below:

- **Inkjet:** High speed, low cost, good resolution ($\sim 100 \mu\text{m}$), but limited to low-viscosity materials and 2D geometry. High cell compatibility.
- **Extrusion:** Allows viscous materials, 3D printing, and multiple materials. It has a medium resolution, a risk of structural collapse, and moderate speed—offering high cell compatibility.
- **Pick & Place:** Excellent for the precise positioning of cell units. Limited in speed and requiring advanced handling systems, this technology offers very high cell compatibility.
- **Stereolithography (SLA):** High resolution ($10\text{--}100 \mu\text{m}$), excellent finish. Limited in materials and may be toxic if photoinitiators are not controlled. Moderate cell compatibility.
- **Two Photons (2P):** Ultra-high resolution ($\sim 1 \mu\text{m}$), ideal for complex microstructures. Very expensive and slow. Low cell compatibility due to light intensity.
- **Volumetric (VAM):** Fast, three-dimensional printing in seconds, without the need for support structures. Requires advanced optics and specific resins. Variable cell compatibility, which is enhanced when using visible light.

This analysis supports the choice of a hybrid architecture that combines syringe extrusion with subsequent light curing as a viable alternative for improving dimensional fidelity without compromising the accessibility of the system in educational and experimental contexts.

3.1 Evaluation metrics and objective criteria

Although at this stage of the project, validation will focus on the functional construction of the syringe extrusion system, including motion control, mechanical response of the actuators, and preliminary evaluation of printed soft materials. Some physical properties of the bioink, such as viscosity and geometric fidelity of

the generated structures, will also be characterized. However, the implementation of surround light curing, as well as the full integration of a suspended printing environment using the FRESH method, will be reserved for the second stage of the project.

This decision addresses the need to optimize the extrusion and sedimentation of the material, as the FRESH method, which utilizes a gelatinous support to stabilize the impression in suspension, requires additional thermal and rheological control conditions. These conditions will be validated in conjunction with the optical curing module in the next phase. This separation allows the project to be structured in stages, facilitating the functional evaluation and iterative development of the proposed hybrid system. Although the light-curing system has not yet been implemented, aspects of the current system have been identified that can be validated in preparation for its future integration with technologies such as Volumetric Additive Manufacturing (VAM).

Evaluating the compatibility of the material used in this case, Carbopol-based gels, in terms of photosensitivity, optical homogeneity, and volumetric stability, is essential to ensure an adequate response to ambient light sources.

The geometry and transparency of the printing container are also analyzed, verifying that it allows uniform light transmission and that its shape is suitable for rotation or angular exposure, key requirements in volumetric curing processes.

From a mechanical perspective, the structural stability and dimensional accuracy of the printing platform are validated, considering future structural integrations that may incorporate optical systems. Additionally, the modularity of the electronic system is examined, evaluating the capacity of the Marlin firmware and the RUMBA+ card to be expanded with lighting control modules or optical sensors.

Finally, the correct centered sedimentation of the material within the printing volume represents a strategic factor, as it will allow a more efficient transition to volumetric curing without the need to redesign the entire architecture.

These preliminary validations lay the technical foundations for the second phase of the project, which will directly address the integration of the optical stage and the comparative analysis between simple extrusion and hybrid envelope curing processes.

During this phase, a set of technical metrics will

be used to preliminarily evaluate the performance of the bioprinting system. Each metric will be associated with a target threshold that will serve as a reference to validate its basic functionality and potential for improvement in future phases. The expected values are detailed below:

- **Printability index (Pr):** A value between **0.9 and 1.1** is sought, indicating a good ratio between the height and diameter of the printed lines, which is an acceptable range for bioinks under stable printing conditions.
- **Geometric fidelity:** A correspondence of at least **85%** between the geometry of the CAD model and the shape obtained experimentally is expected, evaluated by direct measurement or image analysis.
- **Percentage of recovery:** A structural recovery of $\geq 70\%$ after printing is considered optimal, evaluated based on minimal deformation or collapse of the material.

These values will serve as guiding parameters for adjusting printing conditions, modifying the mechanical design if necessary, and informing the design of the optical system in the next stage.

4 Results

At the end of this stage of the project, significant progress has been made in the physical construction of the bioprinting system. The complete construction of the bioprinting system is based on the Printess design, using the components defined in the CAD design. With mechanical, electronic, and functional integration of the syringe extrusion system seen in the functional prototype.

The prototype features controlled displacement on all three axes using Cartesian architecture, with NEMA 17 motors and TMC2208 controllers configured via Marlin firmware. The support structure was manufactured using laser-cut acrylic plates and PLA-printed parts, ensuring stability and accessibility for subsequent adjustments. Figure 4.

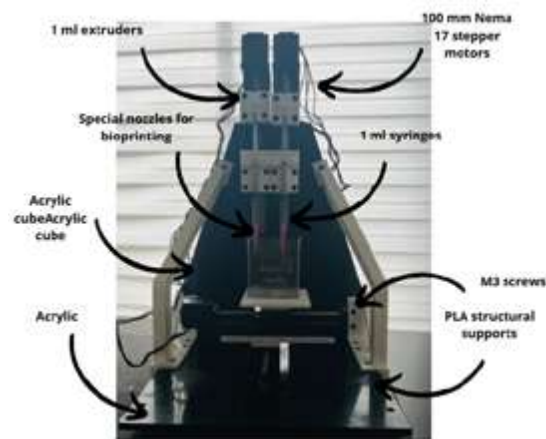
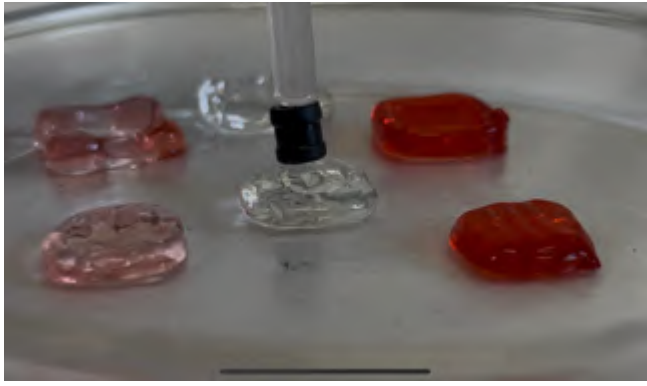


Figure 4: Complete assembly of the system.

Additionally, the digital environment necessary for the system's operation was developed and validated, including the generation of automated G-code using Python scripts, the interpretation of the code through Pronterface, and the integration with the CAD model to synchronize design and printing. The main evaluation metrics (power law, printability index, geometric fidelity, and structural recovery) were defined, and the experimental strategy for future testing was established, with printing material already prepared (Carbopol as the base bioink).

Carbopol is inexpensive, transparent for visualization, and very easy to produce in large quantities. However, it contains non-degradable particles that are not ideal for tissue printing.

To analyze the initial performance of the bioprinting system, printing tests were conducted using three different Carbopol formulations. These tests employed a hollow cube, a solid cube with an internal structure, and a solid cube with filling as test geometries. These pieces were selected for their geometric simplicity, which allows for precise observation of flow regularity, structural collapse, and the material's ability to maintain defined shapes Figure 5.



(a) Comparison with different printing models.



(b) Top view of the printed parts.

Figure 5: First samples of parts with different Carbopol compositions.

The tests were conducted under similar extrusion conditions, with constant parameters for temperature, speed, and nozzle size. The visual and dimensional results enable the clear identification of differences in the behavior of each formulation.

The mixtures with lower concentrations showed good fluidity but low stability, tending to collapse on the vertical walls of the hollow cube. In contrast, the more viscous formulations retained their printed shape better but exhibited flow discontinuities, resulting in interrupted lines and material accumulation.

This observation aligns with the power law theory, which describes how viscosity changes in response to shear rate. In this case, materials with more pseudo-plastic behavior tend to flow more easily under pressure but recover their shape more quickly, which favors printing fidelity.

During the experimental stage, it was observed that

the bioink prepared with Carbopol showed pseudo-plastic behavior, characteristic of non-Newtonian fluids, suggesting that it can be modeled using the power law:

$$\tau = K \cdot \dot{\gamma}^n \quad (5)$$

Where τ represents shear stress (Pa), $\dot{\gamma}$ shear rate (s^{-1}), K consistency index ($Pa \cdot s^n$) and n flow behavior index.

Based on data from the literature for similar concentrations of Carbopol 940 [16], a typical value of $n = 0.45$ was assumed. From an estimated shear rate of $\dot{\gamma} = 20 s^{-1}$ and a shear stress of $\tau = 12 Pa$, an approximate consistency index of:

$$K = \frac{\tau}{\dot{\gamma}^n} = \frac{12}{(20)^{0.45}} \approx 3.85 Pa \cdot s^n \quad (6)$$

This result suggests that the material reduces its viscosity as the cutting speed increases, favoring its extrusion during printing and subsequent stabilization. The power law allows us to quantify rheological parameters and understand their behavior for the proper use of bioink. This is because it is either: a pseudo-plastic (in which its viscosity tends to decrease and therefore its speed), a Newtonian (with a viscosity like water), or a dilatant (when viscosity increases with cutting speed).

During bioprinting processes, particularly with viscoelastic materials such as Carbopol, it is crucial to assess the material's ability to recover its original shape after extrusion-induced deformation. This property is quantified by the recovery coefficient, which describes the elastic behavior of the bioink once the application of stress ceases.

The recovery coefficient is a metric that enables the evaluation of the bioink's ability to maintain its original height after deposition, which is crucial in extrusion bioprinting processes. This metric is calculated as the ratio between the actual height obtained after curing and the theoretical height expected according to the CAD design:

$$\text{Recovery coefficient} = \frac{h_{\text{actual}}}{h_{\text{expected}}} \quad (7)$$

For this evaluation, three parts with an expected height of 3.5 mm were printed. The actual heights obtained were 3.3 mm, 3.1 mm, and 3.1 mm, respectively, measured using a combination of laser pointing and digital vernier calipers. Based on these values,

individual recovery coefficients of 0.943, 0.886, and 0.886 were calculated, resulting in an overall average of:

$$\bar{C}R \approx 0.905 \quad (8)$$

This value indicates a retention of 90.5% of the designed height, which represents adequate performance for viscoelastic materials such as Carbopol. However, it also shows the influence of viscosity and printing time on the partial loss of shape in some samples.

The printability index (Pr) is a widely used metric to characterize the quality of extruded material in syringe bioprinting, as it relates to the bioink's ability to maintain its shape during sedimentation. This index is generally calculated as:

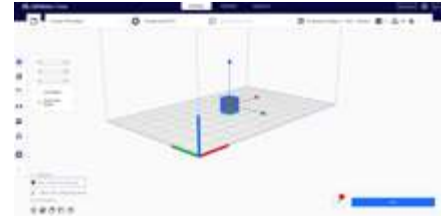
$$Pr = \frac{L^2}{4\pi A} \quad (9)$$

Where L represents the perimeter (meters) of the printed contour and A the enclosed area (m^2), in an ideal case (e.g., a perfect circle), the expected value of Pr (non-dimensional) is close to 1.0. Values outside the typical range (0.9–1.1) indicate deformations [16], collapses, or poor extrusion of the bioink.

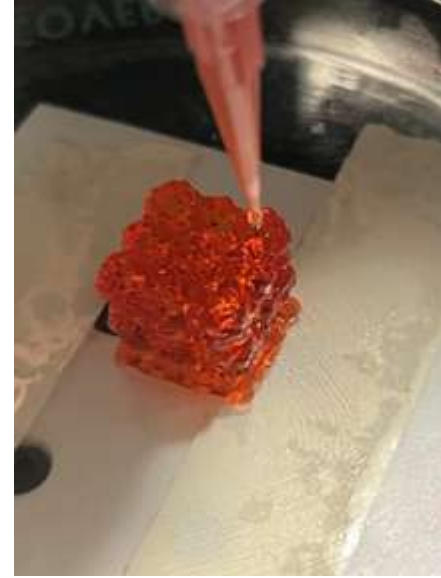
In this work, the original script provided in the official Printess repository was used. This script automates the calculation of the extrusion advance based on the deposited volume and the system's geometric parameters. By entering variables such as the diameter of the syringe and the diameter of the nozzle, the script generates a new .g-code file with corrected extrusion values that are adaptive for each displacement, improving dimensional accuracy.

In preliminary tests, notable differences in line definition were observed when comparing printed lines with and without extrusion correction. The corrected lines had a better height-to-width ratio and maintained a more uniform thickness throughout the part. With a standard layer height of 0.25 mm and extrusion widths controlled between 0.2 and 0.4 mm, the estimated printability index remained within the acceptable range of 0.95–1.05 for the samples evaluated.

Geometric fidelity is defined as the degree of agreement between the dimensions of the printed object and its CAD model, as shown in 6.



(a) CAD figure of the UltimakerCura.



(b) View of the printed part.

Figure 6: CAD model of the part to be analyzed.

This metric enables you to assess deformations, shrinkage, or printing failures resulting from bioink behavior, extrusion, or curing. It is calculated as:

$$\text{Accuracy (\%)} = \left(1 - \frac{|\text{Actual value} - \text{CAD value}|}{\text{CAD value}} \right) \times 100 \quad (10)$$

For this evaluation, a ring-shaped (or doughnut-shaped) part with an outer diameter of 13 mm and an inner diameter of 4.5 mm was printed according to the CAD model. The actual measurements were 10.0 mm (outer diameter) and approximately 4.4 mm (inner diameter). The results obtained were:

- Accuracy of outer diameter: 76.9%
- Accuracy of inner diameter: 97.8%

The loss of external accuracy can be attributed to deformations during printing and delays in material output. In contrast, the internal diameter exhibited better dimensional retention, which could be attributed to a smaller amount of material being deposited in internal areas or greater rigidity at that point in the struc-

ture. These results represent the first step in the structural analysis of the material and lay the groundwork for the future integration of the optical curing system, which is expected to reduce deformations further and enhance the surface quality of the printed parts.

4.1 Hybrid system design proposal

The initial sketch is shown in Figure 7. It also highlights the fundamental aspects of a physical VAM system utilizing the Schindler effect. This system features a modular structure, where the printing platform can remain fixed, although it also allows for rotational movement. The lighting will be distributed by LED sources located in a rectangular housing within a DLP projector, which is well-positioned to cover a 360-degree angular range as the print rotates. This configuration is inspired by the principles of Volumetric Additive Manufacturing (VAM).

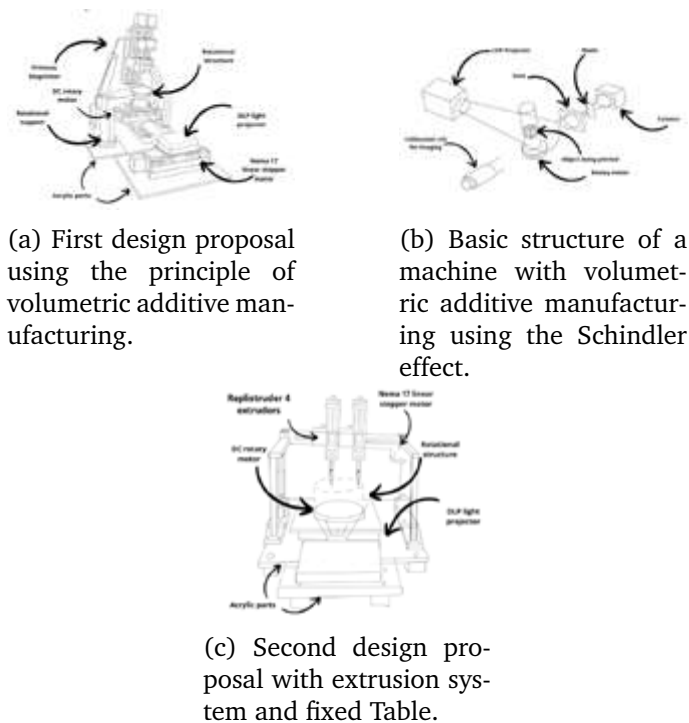


Figure 7: Design proposals for the Printess bioprinter using volumetric additive manufacturing.

The curing system will be designed to operate in a second stage, once printing has been completed. In this phase, the printed object remains in place, avoiding alignment errors, and is exposed to a light source to induce surface or partial polymerization of the material.

This model will encompass both the mechanical

support for the curing system and its structural integration into the base system, enabling future simulations if required. The goal is for the design to be replicable, compact, and easily attachable without modifying the printer's base architecture.

5 Discussion of results

During the first stage of the project, exploratory printing tests were conducted using Carbopol-based mixtures with varying concentrations to assess their behavior during the extrusion process and their ability to form coherent structures. The printing of two simple geometries, a cubic structure and a ring-like figure, enabled key metrics, such as the recovery coefficient, the printability index (Pr), and geometric fidelity, to be applied.

In terms of structural recovery, an average coefficient of 0.905 was obtained, indicating that the material retained approximately 90.5% of its theoretical height after sedimentation. This value, although acceptable for a hydrogel such as Carbopol, indicates a slight loss of vertical stability, which may be attributed to the viscoelasticity of the material and the delayed exit time in some samples. This same observation is related to the variability in extrusion, as tests with a low extrusion coefficient (0.01–0.4) revealed a delay of up to 3 seconds before the material began to flow, which affected the uniformity of the initial layer.

The estimated printability index remained within the range of 0.95–1.05 when using the corrected code from the Python script provided by the Printess repository, which resulted in a significant improvement in stroke definition and uniform line thickness in the printed output. The accuracy obtained with this correction validates the use of custom parameters for each axis, nozzle, and syringe diameter.

On the other hand, the geometric fidelity of the parts varied considerably depending on the complexity of the Figure. In the case of the millimeter ring, a fidelity of 76.9% was obtained for the outer diameter and 97.8% for the inner diameter, suggesting that external structures are more prone to deformation during the process. This behavior may be related to the lower structural strength of the most exposed perimeters, the lateral flow of the bioink, or the accumulation of material in areas with less control over speed.

These limitations could be mitigated by integrating an enveloping light-curing system. By allowing partial or total solidification of the material immediately af-

ter sedimentation, the curing module can improve the initial rigidity of the structures, increase edge resolution, and reduce deformation caused by gel fluidity. In addition, the incorporation of this module would enable more accurate validation of metrics such as the volumetric recovery index and three-dimensional spatial fidelity.

Despite the advances made so far, the proposed system continues to face challenges inherent in traditional extrusion bioprinting methods. According to recent studies, laser-induced transfer (LIFT), extrusion, and injection technologies are capable of depositing viable cells, biomaterials, and macromolecules. Still, they have significant limitations when it comes to generating large constructions with sufficient structural integrity for surgical applications [20, 21]. This observation reinforces the importance of complementary strategies such as light curing, whose future implementation could improve the cohesion and dimensional stability of printed structures.

6 Discussion

This project was developed to improve dimensional accuracy and geometric stability in syringe extrusion bioprinting systems compared to other systems, as shown in Table 5.

Table 5: Comparison of different bioprinting techniques based on deposition and light.

Method	Inkjet	Extrusion	Pick & Place	Stereolithography	2 Photon	Volumetric
Reference	[22]	[23]	[24]	[25]	[26]	[27]
Geometry	2D	3D	3D	Complex 3D	Complex 3D	Complex 3D
Resolution	$\sim 100 \mu\text{m}$	$\sim 100 \mu\text{m}$	$\sim 100 \mu\text{m}$	$10\text{--}100 \mu\text{m}$	$\sim 1 \mu\text{m}$	$\sim 100 \mu\text{m}$
Scale	cm	cm	cm	cm	mm	cm
Multimaterial	Yes	Yes	Yes	No*	No*	No*

This is particularly true of open-source platforms such as Printess, despite their limitations in terms of the accuracy and repeatability of their results. These limitations stem mainly from the viscoelastic nature of the materials used and the absence of a mechanism for stabilizing the material’s properties after sedimentation.

To address this challenge, the incorporation of a light-curing system is proposed as a complementary stage, which acts on the printed part to induce localized and homogeneous polymerization. This technical strategy is based on photo-curing principles applied in techniques such as SLA or VAM. It seems to minimize remelting formations, enhance adhesion between layers, and stabilize the material without significantly altering the mechanical architecture of the original sys-

tem.

From a hybrid manufacturing perspective, integrating mechanical extrusion with optical curing enables the versatility of the DIW process to be combined with the spatial control offered by light activation. This synergy can be evaluated quantitatively using metrics defined in this work, such as printability index, geometric fidelity, structural recovery, and effective viscosity of the material.

In academic training or experimental prototyping contexts, where access to industrial bioprinting systems is limited, the development of hybrid solutions such as the one proposed here represents a realistic and functional way to expand existing technological capabilities. Thus, this project not only addresses a specific technical need but also fosters new configurations in biofabrication, providing an adaptable, empirically validated platform with potential for evolution in future stages.

7 Conclusion

During this first phase of the project, we successfully built a functional bioprinter based on the open-source Printess architecture, adapted for extrusion using syringes and controlled by a RUMBA+ board configured with Marlin firmware. The XYZ Cartesian motion system was validated through displacement tests and trajectory execution with custom G-code, adjusting the extrusion feed rate and verifying the electronic response on each axis. These tests confirmed the precise operation of the system, thus laying a solid technical foundation for future stages.

Regarding the objectives set at the beginning of the project:

- **Construction of the functional prototype:** *completed*. The printer was successfully assembled with structural, electronic, and software integration. Initial prints were performed using Carbopol-based bioinks at varying concentrations.
- **Analysis of technical limitations in terms of precision and stability:** *completed*. Deformations were identified in printed parts that correlate with the material’s viscosity, the lack of immediate curing, and the sensitivity of the flow to the extrusion feed rate.
- **Printing samples to determine their properties:** *partially accomplished*. Exploratory prints

of two types of geometries (cube and ring) were made, and metrics of recovery, geometric fidelity, and printability were applied. However, a more in-depth characterization with optimized bioinks is still pending.

The results obtained showed an average recovery coefficient of 0.905, a printability index in the range of 0.95–1.05, and a geometric fidelity of up to 97.8

For the next stage of the project, we plan to integrate a light-curing module inspired by volumetric additive manufacturing (VAM) to improve the resolution and stability of the printed structures. Among the metrics to be evaluated are:

- Total geometric fidelity greater than 85%
- Printability index (Pr) between 0.9 and 1.1
- Printing time reduced by up to 25% due to early solidification
- Reduction in lateral deformation greater than 20% compared to extrusion without curing

The aim is not only to validate a hybrid configuration technically, but also to propose a replicable, accurate, and accessible platform for bioprinting in educational, research, or biomedical prototyping environments. The project continues, and these advances consolidate the foundations for a more robust second phase, focused on dimensional improvement, optical integration, and complete functional validation of the system.

Acknowledgments

During the preparation of this manuscript/study, the authors used ChatGPT-5 and NotebookLM to cite sources and search for information to enrich the text. The authors have reviewed and edited the generated content and assume full responsibility for the content of this publication.

Abbreviations

The following abbreviations are used in this manuscript:

VAM: Volumetric Additive Manufacturing

FRESH: Reversible Embedding of Suspended Hydrogels

DIW: Direct Ink Writing

DLP: Digital Light Processing

FEM: Finite Element Method

References

- [1] C. O. Crosby, “Open-source extrusion 3d bio-printers: Trends and recommendations,” *Bio-printing*, vol. 38, p. e00336, 2024.
- [2] R. Jones, P. Haufe, E. Sells, P. Irvani, V. Olliver, C. Palmer, and A. Bowyer, “Reprap – the replicating rapid prototyper,” *Robotica*, vol. 29, no. 1, p. 177–191, 2011.
- [3] J. D. Weiss, A. Mermin-Bunnell, F. S. Solberg, T. Tam, L. Rosalia, A. Sharir, D. Rütsche, S. Sinha, P. S. Choi, M. Shibata, Y. Palagani, R. Nilkant, K. Paulvannan, M. Ma, and M. A. Skylar-Scott, “A low-cost, open-source 3d printer for multimaterial and high-throughput direct ink writing of soft and living materials,” *Advanced Materials*, vol. 37, no. 10, p. 2414971, 2025.
- [4] J. Madrid-Wolff, J. Toombs, R. Rizzo, P. N. Bernal, D. Porcincula, R. Walton, B. Wang, F. Kotz-Helmer, Y. Yang, D. Kaplan, *et al.*, “A review of materials used in tomographic volumetric additive manufacturing,” *MRS communications*, vol. 13, no. 5, pp. 764–785, 2023.
- [5] M. Seiti, E. L. Mazzoldi, S. Pandini, E. Ferraris, and P. S. Ginestra, “Fabrication of 3d soft polymeric constructs at high structural integrity through bioprinting optimization of suspended hydrogels,” *Bioprinting*, vol. 47, p. e00403, 2025.
- [6] N. Corrigan, J. Yeow, P. Judzewitsch, J. Xu, and C. Boyer, “Seeing the light: Advancing materials chemistry through photopolymerization,” *Angewandte Chemie - International Edition*, vol. 58, no. 16, p. 5170 – 5189, 2019. Cited by: 490; All Open Access, Bronze Open Access.
- [7] J. Rouwkema, N. C. Rivron, and C. A. van Blitterswijk, “Vascularization in tissue engineering,” *Trends in biotechnology*, vol. 26, no. 8, pp. 434–441, 2008.
- [8] R. King, “Non-newtonian slurries,” *Introduction to Practical Fluid Flow*, pp. 117–157, 2002.

- [9] N. S. Lameirinhas, J. P. Carvalho, M. C. Teixeira, J. L. Luís, A. Esmail, R. J. Pinto, H. Oliveira, F. Freitas, J. M. Oliveira, C. Vilela, A. J. Silvestre, and C. S. Freire, "Nanocomposite hydrogel-based bioinks composed of a fucose-rich polysaccharide and nanocellulose fibers for 3d-bioprinting applications," *Bioprinting*, vol. 45, p. e00382, 2025.
- [10] C. A. Wu, Y. Zhu, A. Venkatesh, C. J. Stark, S. H. Lee, and Y. J. Woo, "Optimization of freeform reversible embedding of suspended hydrogel microspheres for substantially improved three-dimensional bioprinting capabilities," *Tissue Engineering Part C: Methods*, vol. 29, no. 3, pp. 85–94, 2023.
- [11] Y. Fang, Y. Guo, B. Wu, Z. Liu, M. Ye, Y. Xu, M. Ji, L. Chen, B. Lu, K. Nie, *et al.*, "Expanding embedded 3d bioprinting capability for engineering complex organs with freeform vascular networks," *Advanced Materials*, vol. 35, no. 22, p. 2205082, 2023.
- [12] C. B. Highley, C. B. Rodell, and J. A. Burdick, "Direct 3d printing of shear-thinning hydrogels into self-healing hydrogels," *Advanced Materials*, vol. 27, no. 34, pp. 5075–5079, 2015.
- [13] T. J. Hinton, Q. Jallerat, R. N. Palchesko, J. H. Park, M. S. Grodzicki, H.-J. Shue, M. H. Ramadan, A. R. Hudson, and A. W. Feinberg, "Three-dimensional printing of complex biological structures by freeform reversible embedding of suspended hydrogels," *Science Advances*, vol. 1, no. 9, p. e1500758, 2015.
- [14] W. Wu, A. DeConinck, and J. A. Lewis, "Omnidirectional printing of 3d microvascular networks," *Advanced materials*, vol. 23, no. 24, pp. H178–H183, 2011.
- [15] A. Lugmayr, B. Stockleben, Y. Zou, S. Anzenhofer, and M. Jalonen, "Applying "design thinking" in the context of media management education," *Multimedia tools and applications*, vol. 71, pp. 119–157, 2014.
- [16] H. W. Kang, S. J. Lee, I. K. Ko, C. Kengla, J. J. Yoo, and A. Atala, "A 3d bioprinting system to produce human-scale tissue constructs with structural integrity," *Nature Biotechnology*, vol. 34, no. 3, pp. 312–319, 2016.
- [17] R. D. Bruno, J. Reid, and P. C. Sachs, "The revolution will be open-source: how 3d bioprinting can change 3d cell culture," *Oncotarget*, vol. 10, no. 46, p. 4724, 2019.
- [18] R. L. Truby and J. A. Lewis, "Impresión tridimensional de materia blanda," *Nature*, vol. 540, no. 7633, pp. 371–378, 2016.
- [19] J. H. Galarrraga, M. Y. Kwon, and J. A. Burdick, "3d bioprinting via an in situ crosslinking technique towards engineering cartilage tissue," *Scientific reports*, vol. 9, no. 1, p. 19987, 2019.
- [20] K. W. Binder, W. Zhao, T. Aboushwareb, D. Dice, A. Atala, and J. J. Yoo, "In situ bioprinting of the skin for burns," *Journal of the American College of Surgeons*, vol. 211, no. 3, p. S76, 2010.
- [21] F. Marga, K. Jakab, C. Khatiwala, B. Shepherd, S. Dorfman, B. Hubbard, S. Colbert, and G. Forgacs, "Toward engineering functional organ modules by additive manufacturing," *Biofabrication*, vol. 4, no. 2, p. 022001, 2012.
- [22] V. Mironov, "Referencia del trabajo original sobre inkjet bio-printing," 2003. Referencia genérica, completar datos según fuente original.
- [23] D. B. Kolesky, K. A. Homan, M. A. Skylar-Scott, and J. A. Lewis, "Three-dimensional bioprinting of thick vascularized tissues," *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 113, no. 12, pp. 3179–3184, 2016.
- [24] A. C. Daly, M. E. Prendergast, A. J. Hughes, and J. A. Burdick, "3d bioprinting of developmental patterns during biofabrication of tissue models," *Advanced Materials*, vol. 32, no. 7, p. 1905972, 2020.
- [25] B. Grigoryan, S. J. Paulsen, D. C. Corbett, D. W. Sazer, C. L. Fortin, A. J. Zaita, P. T. Greenfield, N. J. Calafat, J. P. Gounley, A. H. Ta, F. Johansson, A. Randles, J. E. Rosenkrantz, J. D. Louis-Rosenberg, P. A. Galie, K. R. Stevens, and J. S. Miller, "Multivascular networks and functional intravascular topologies within biocompatible hydrogels," *Science*, vol. 364, no. 6439, pp. 458–464, 2019.

- [26] S. Kawata, H. B. Sun, T. Tanaka, and K. Takada, “Finer features for functional microdevices,” *Nature*, vol. 412, no. 6848, pp. 697–698, 2001.
- [27] B. E. Kelly, I. Bhattacharya, H. Heidari, M. Shusteff, C. M. Spadaccini, and H. K. Taylor, “Volumetric additive manufacturing via tomographic reconstruction,” *Science*, vol. 363, no. 6431, pp. 1075–1079, 2019.

Diseño y optimización de un biosistema urbano con microalgas e hidroponía en un techo de vivienda multifamiliar

Design and optimization of an urban biosystem with microalgae and hydroponics

J. R. Uvera a, Lara-Montaña Oscar Daniel b, Guzmán-Martínez Carlos Eduardo c, Martínez-Guido Sergio Iván d*

a Facultad de Ingeniería Campus Centro Universitario, Universidad Autónoma de Querétaro, Cerro de las Campanas S/N, Colonia Las Campanas, Santiago de Querétaro, Querétaro, 76017, México

b Facultad de Ingeniería Campus Amealco, Universidad Autónoma de Querétaro, Camacho Guzmán km 60, Amealco, Querétaro, 76850, México

c Facultad de Ingeniería Campus Amazcala, Universidad Autónoma de Querétaro, Carretera a Chichimequillas s/n, Km. 1, Amazcala, El Marqués, Querétaro, 76265, México

d Facultad de Ingeniería Campus Juriquilla, Universidad Autónoma de Querétaro, Av. de las Ciencias esq. Blvd. Villas del Mesón S/N, Juriquilla, Querétaro, 76230, México

**sergio.martinezg@uaq.mx*

Resumen:

Se presentan los avances de investigación de un proyecto de tesis del doctorado en Innovación, Tecnología y Hábitat (DITH) de la FI-UAQ. El objetivo es desarrollar una herramienta de optimización matemática que permita modelar la adaptación de biosistemas integrados en la infraestructura urbana. Dicho modelo se plantea como un entero mixto no lineal (MINLP), modelado en GAMS versión 35 con el resolvente DICOPT. En este documento se describe la primera parte de su desarrollo, que integra un sistema híbrido de cultivos microalgal e hidroponía en una unidad multifamiliar ubicada en el municipio de Santiago de Querétaro, México, como miniestudio de caso para la construcción y validación de una primera versión del modelo.

La integración de dos tecnologías (microalgas-hidroponía) químico-biológicamente afines genera un biosistema funcional que puede emplearse para el tratamiento de aguas residuales domésticas, la captura de CO₂ atmosférico y la producción de alimentos y biofertilizantes. A su vez, tal biosistema integrado se plantea como adaptable al entorno urbano mediante su acoplamiento espacial, estructural y operativo con la infraestructura urbana. Con esta propuesta se busca maximizar la eficiencia de tales sistemas en pro del aprovechamiento integral de los recursos urbanos; asimismo, su adaptación a contextos urbanos contempla variables sociales, de costo-beneficio, de rendimiento y de eficiencia. En esta participación se consolida la parte conceptual del modelo y se inicia la integración matemática de los primeros biosistemas. Aunque los resultados mostrados corresponden a la etapa de prevalidación, los cálculos iniciales indican una disponibilidad anual promedio de 850-900 m³ por edificio, considerando un área disponible por edificio de 225,45 m² y una precipitación anual promedio de 568 mm. Tal volumen de captura sería suficiente para cubrir el sistema hidropónico y el número total de reactores (NTR). La primera versión del modelo muestra estabilidad en los balances de flujo y de nutrientes. El ejercicio presenta las bases para la integración biotecnológica de ambas tecnologías para la producción de alimentos, la reducción de descargas contaminantes y la captura de CO₂ atmosférico.

Palabras clave: Biosistemas Urbanos; Hidroponía en azoteas; Optimización MINLP; Integración tecnológica; Hidroponía; Infraestructura verde; Sostenibilidad urbana.

Abstract:

This paper presents the research progress of a doctoral thesis project in Innovation, Technology, and Habitat (DITH) at FI-UAQ. The objective is to develop a mathematical optimization tool that allows modeling the adaptation of biosystems integrated into urban infrastructure. This model is proposed as a nonlinear mixed-integer program (MINLP) modeled in GAMS version 35 with the DICOPT solver. This document describes the first part of its development, which integrates a hybrid system of microalgal and hydroponic crops in a multi-family unit located in the municipality of Santiago de Querétaro, Mexico, as a mini-case study for the construction and validation of a preliminary model. The integration of two chemically and biologically related technologies yields a functional biosystem that can be utilized for treating domestic wastewater, capturing atmospheric CO₂, and producing food and biofertilizers. In turn, such an integrated biosystem is proposed as adaptable to the urban environment through its spatial, structural, and operational coupling to urban infrastructure. This

proposal aims to optimize the efficiency of such systems for the comprehensive utilization of urban resources. Likewise, their adaptation to urban contexts includes social, cost-benefit, performance, and efficiency variables. The first version of the model shows stability in flow and nutrient balances. This participation consolidates the conceptual part of the model and begins the mathematical integration of the first biosystems. Although the results shown correspond to the pre-validation stage, the exercise presents the basis for the biotechnological integration of both technologies for food production, reduction of pollutant discharges, and atmospheric CO₂ capture. Initial calculations indicate an average annual availability of 850-900 m³ per building, based on an available area of 225.45 m² per building and an average yearly rainfall of 568 mm. Such a capture volume would be sufficient to cover the hydroponic system and the total number of reactors (NTR).

Keywords: Urban Biosystems; Rooftop Hydroponics; MINLP Optimization; Technological Integration; Hydroponics; Green Infrastructure; Urban Sustainability.

1. Introducción

Hoy por hoy, los seres humanos vivimos una crisis ambiental y alimentaria generada, en parte, por la demanda cada vez mayor de alimentos a nivel global. Durante la crisis del COVID-19, el sector alimentario fue uno de los más afectados, lo que elevó los precios de los alimentos [1]. De igual modo, durante la crisis de la guerra en Ucrania, un recorte de la potasa proveniente de Rusia provocó un aumento de los precios de los fertilizantes, lo que se reflejó en los precios de los alimentos. Es decir, el sistema alimentario excesivamente centralizado muestra una estabilidad reducida ante procesos de incertidumbre global.

En un planeta en constante cambio, tal incertidumbre se ve agravada si consideramos que más de la mitad de la población global habita en las ciudades, lo que aumentará a un 70% para el año 2050 [2]. Estas grandes metrópolis dependen totalmente del medio ecológico como base para satisfacer sus demandas de energía y materiales [3].

En la búsqueda de alternativas de solución a los problemas del cambio climático, la excesiva centralización del medio urbano y la escasez de alimentos, se estudian propuestas de adaptación de biosistemas productivos integrados en infraestructuras urbanas [4,5,6]. Los biosistemas integrados se consideran una alternativa para abordar problemáticas relacionadas con el exceso de contaminantes en la atmósfera, el tratamiento de aguas residuales, el suministro de energía y de alimentos en las grandes ciudades, así como para reducir los efectos negativos de la urbanización descontrolada: la pérdida de biodiversidad y las islas de calor urbanas [4,5,6].

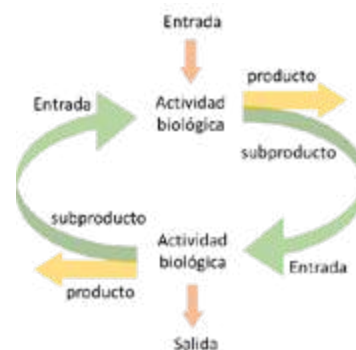


Figura 1. Se muestra un diagrama esquemático de los biosistemas integrados. Fuente: tomada y adaptada de [7].

Esto último se debe a que los biosistemas integrados, como microalgas, hidroponía, acuaponía, setas comestibles, biodigestores y sistemas agroecológicos, pueden establecer interrelaciones químico-biológicas entre sí, como se muestra en las Figuras 1 y 2. Esto da lugar a ciclos de entrada y salida de materiales y energía compartidos. Así, los biosistemas integrados facilitan la gestión de desechos orgánicos y aguas residuales, mientras que generan productos valiosos, como alimentos, biofertilizantes, compost, biogás y/o energía eléctrica.



Figura 2. Posibles acoplamientos biológicos entre sistemas microalgales, acuapónicos, hidropónicos, hongos comestibles y digestores. Fuente: elaboración propia.

Las primeras propuestas de su adaptación a la infraestructura urbana surgidas fueron diseños conceptuales que planteaban un futuro en el que estos biosistemas se adaptarían principalmente a techos y fachadas, otorgando autonomía energética o alimentaria a las edificaciones [8].

Las diversas propuestas al día de hoy abarcan aspectos como la estética, mejoras en la bioclimática de las construcciones que se traducen en ahorros energéticos, aislamiento sonoro, tratamiento de las aguas residuales urbanas, así como, mejoras en la calidad del aire y producción de alimentos al interior de las edificaciones. Adicionalmente, la gran variedad de configuraciones disponibles en los sistemas fotobiorreactores (FBR's), hidropónicos, acuapónicos y agroecológicos ofrece múltiples formas de hacerse uso en superficies horizontales, inclinadas y verticales, lo que permite su implementación en techos y fachadas [6]."

Un gran ejemplo es el potencial de la producción de alimentos urbanos mediante sistemas acuapónicos. Estos se utilizan ampliamente para el cultivo de especies como tilapia y salmón en granjas de cultivo comerciales. En los últimos años, ha crecido el interés en la adaptación de tales sistemas en espacios urbanos como soluciones alimentarias en zonas de bajos niveles de ingresos. Además, la tecnología acuapónica acoplada a los sistemas constructivos de los edificios puede contribuir a revalorizar el calor residual y las emisiones de CO₂ de las construcciones [9]. Entre los beneficios citados por algunos autores [9,10], se encuentran

una posible disminución del efecto de isla de calor urbana, así como, una reducción de las emisiones de CO₂ en la producción y de los costos operativos, al reducir las distancias de transporte de los productos finales y aumentando la diversidad y la calidad de productos en las localidades urbanas. De acuerdo con [9], los sistemas acuapónicos urbanos podrían incluso tener un efecto positivo en el ciclo del agua urbano al reducir la carga de contaminantes en las descargas a la red de alcantarillado urbano.

El caso de la integración entre microalgas e hidroponía se basa en el metabolismo de ambas biotecnologías: la fotosíntesis. Esto último se refiere a su capacidad de absorber energía solar, CO₂ y H₂O, así como macronutrientes (C, K, N, P) y micronutrientes, para realizar sus procesos metabólicos [11]. Esta similitud constituye el núcleo de su integración químico-biotecnológica. Por ejemplo, no es extraño ver crecimiento de microalgas en las aguas de recirculación de los sistemas hidropónicos. Lo que ha llamado la atención y ha derivado en el estudio de diversas especies vegetales, como lechuga (*Lactuca sativa*) [12, 13, 14], jitomate (*Solanum lycopersicum*) [15, 16], arúgula (*Eruca sativa*) [13], colinabo morado (*Brassica oleracea* var. *Gongylodes* [13]; en co-cultivo con especies microalgales como: *Chlorella vulgaris* [12, 14, 16, 17, 18, 19], *Scenedesmus quadricauda* [16], *Chlorella infusionum* [13, 15], *Synechocystis* sp. [17], *Arthrospira* sp. (Espirulina) [17].

Durante el desarrollo de esta investigación, se construye una herramienta de optimización para adaptar una serie de diversos biosistemas productivos a sitios específicos de una ciudad. Esta va dirigida a usuarios de perfiles distintos desde los generales hasta los técnicos (diseñadores, arquitectos) o estratégicos (tomadores de decisión), por lo que se busca sea una herramienta modular en etapas y capaz de mostrar de forma visual resultados de orden espacial, por lo que se busca que su implementación sea compatible con softwares de acceso abierto para facilitar su implementación.

La parte central de la herramienta se encuentra en el modelo de optimización matemática, cuya estructura integra diferentes variables de carácter tecnológico, paramétrico, económico y social. El objetivo de esta divulgación es describir la primera parte del modelo, que consiste en la integración de los biosistemas de microalgas e hidroponía para el tratamiento de aguas residuales domésticas y la obtención de vegetales y biofertilizantes.

1.1 Estructura del documento

Se describe el desarrollo de la primera parte del modelo en la sección 2. Materiales y métodos. Se comienza hablando de 2.1, la naturaleza del modelo; 2.2, la selección de la zona de estudio; y 2.3, la descripción del modelo, seguido de los 3. Resultados y la 4. Conclusión.

2. Materiales y métodos

2.1 Naturaleza del modelo

El modelo de optimización es un MINLP no lineal mixto; esto se debe a que su formulación permite incorporar variables discretas y continuas, sin relaciones lineales entre ellas, así como el uso de variables binarias y la priorización múltiple de objetivos. Este es modelado en GAMS versión 35 con el resolvente DICOPT en un PC con procesador i7 Gen 12, RAM de 64 GB y tarjeta gráfica dedicada Geforce RTX.

2.2 Selección de zona de estudio

La construcción del modelo incluye la etapa de integración de los datos obtenidos de plataformas climáticas, territoriales, socioeconómicas, las variables del modelo paramétrico del sitio seleccionado, y los datos técnicos y operacionales de los biosistemas elegidos. De acuerdo con [20], una de las propuestas de integración más viables actualmente es la de los techos de edificios residenciales. Estos últimos ofrecen una mayor exposición a la luz solar que otras locaciones en las ciudades. Este tipo de integraciones puede generar sinergias ambientales y energéticas que mejoren los rendimientos de ambos sistemas: el edificio residencial y el invernadero [21].

En el caso específico de este avance de investigación para el modelado del biosistema integrado hidroponía-microalgas, se utiliza el agua pluvial y residual proveniente de una unidad multifamiliar estándar en la ciudad de Santiago de Querétaro como estudio de caso.

La Figura 3 muestra el área total utilizable por edificio (b), que resulta en 225,46 m², que se modelará como zona de instalación del sistema de agua pluvial y de microalgas-hidroponía. Los datos del número de habitantes por edificio se obtienen conforme a las normativas de la CEA, que, en el caso de las Zonas Urbanas del Estado de Querétaro,

establecen 5 habitantes por vivienda en desarrollos habitacionales [22]. Tomando 15 departamentos por edificio, da un total de 150 personas por condominio (de dos edificios).



Figura 3. Determinación del área útil de cada edificio.

2.3 Descripción del modelo

La figura 4 muestra el ciclo que sigue el agua durante el funcionamiento integrado de ambos biosistemas. El cultivo vegetal modelado es el jitomate (*Solanum lycopersicum*) [15, 16], y el sistema de microalgas se modela con *Arthrospira sp.* (Espirulina).

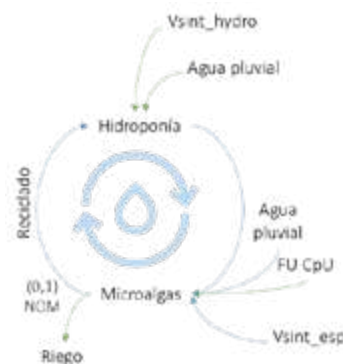


Figura 4: Diagrama de flujo de agua. Fuente: elaboración propia.

Como primer paso, se construye la corriente de agua general que compone todos los flujos de agua pluvial $FA_t^{(pluvial)}$, medios sintéticos $V_t^{sin.esp+hydro}$, el flujo de agua residual $FU_{b,t}$ y el reciclado W_t^{drain} , que se tratarán como corrientes de proceso entre ambos sistemas.

El agua pluvial $FA_t^{(pluvial)}$ recolectada de todos los edificios del fraccionamiento se calcula utilizando la ecuación (1). Los valores de la precipitación mensual promedio (de 1921 a 2021) se obtienen de la base de datos del Observatorio de CONAGUA para el municipio de Querétaro [23]. Mientras que la aportación al

alcantarillado sanitario se obtiene según se establece por la CEA como un porcentaje del gasto de consumo de agua potable, que para desarrollos habitacionales en Querétaro se toma como el 80% de la dotación del agua potable, considerando una pérdida del 20% en tubería o riego de áreas verdes [22] obteniendo un total de 160 l/hab·día.

$$FA_t^{(disp-plu)} = \sum_{i \in J} (area_j \cdot Prec_t \cdot n_j \cdot 0.001) \quad (1)$$

Donde:

- $FA_t^{(disp-plu)}$: Flujo de agua pluvial disponible en el periodo t (m³)
- $area_j$: Área de captación del elemento j (m²)
- $Prec_t$: Precipitación en el periodo t (mm)
- n_j : Eficiencia de captación del área j (adimensional)
- 0.001: Factor de conversión de milímetros a metros cúbicos
- $i \in J$: Conjunto de superficies o techos disponibles para captación:

Esta agua, con bajos niveles de nutrientes, se canaliza al sistema hidropónico y se mezcla con la corriente $V_t^{sin-hydro}$ que contiene una solución concentrada de nutrientes C_p y la corriente de salida del sistema de microalgas reciclada $W_t^{recycle}$ de acuerdo con la figura 4 y ecuación 2. Esta última es el agua tratada que no cumple los niveles máximos de contaminantes, por lo que requiere tratamiento adicional y se recirculará al sistema hidropónico. Esta corriente se describe por la ecuación 2:

$$W_t^{hydro} = FA_t^{pluvial-hydro} + V_t^{sin-hydro} + W_t^{recycle} \quad (2)$$

El modelo de medio sintético es para el cultivo de jitomate en sistemas hidropónicos con niveles de N de 200 mg/l, K de 250 mg/l, P de 50 mg/l y Mg de 50 mg/l, tal como lo proponen en [24]. Se modelan 4 nutrientes por simplicidad del modelo y para reducir los tiempos de computación. Mediante una función “si”, el modelo pondera los valores de las concentraciones de cada corriente, comparando la concentración final del medio con una concentración mínima y forzando la adición de más medio inorgánico hasta alcanzar los niveles mínimos requeridos para cada nutriente. La

concentración máxima se limita a un factor de 1,2 por encima de la concentración mínima.

Las ecuaciones 3 y 4 representan las restricciones para los niveles mínimos y máximos del medio hidropónico modelado:

$$Cp_{p,t}^{in-hydro} \geq Cp_p^{min-hydro} \quad (3)$$

$$Cp_{p,t}^{in-hydro} \leq Cp_p^{max-hydro} \quad (4)$$

Mientras que la ecuación (5) describe el cálculo de las concentraciones de salida a partir de las eficiencias de remoción reportadas en la literatura. Por ejemplo, en [24] se reportó que la eficiencia de absorción de nutrientes respecto de la cantidad total suministrada desde el trasplante hasta el final de la cosecha (85 días) fue de 30, 53, 47, 20 y 33 % para N, P, K, Ca y Mg, respectivamente.

$$Cp_{p,t}^{out-hydro} = Cp_{p,t}^{in-hydro} * (1 - \eta_p^{rem-hydro}) \quad (5)$$

Esta agua, si se descarga al medio ambiente, genera una concentración inadecuada de sales inorgánicas en los cuerpos de agua, lo que se conoce como eutrofización. Tal desequilibrio afecta la salud de los ecosistemas acuáticos.

Al término de este periodo de 85 días el agua de desecho del sistema hidropónico, que aún contiene niveles de algunos nutrientes, además de elementos orgánicos y trazas de metabolitos secundarios generados por el metabolismo de las plantas se mezcla con una fracción del agua pluvial $FA_t^{pluvial-esp}$, el agua residual concentrada en urea proveniente de cada edificio $FU_{b,t}$ y medio inorgánico $V_t^{sin-esp}$ para complementar el mínimo requerimiento nutricional de *Arthrospira sp.* [25].

Finalmente, el flujo saliente del sistema hidropónico se canaliza como entrada al sistema microalgal, como se muestra en la ecuación (6).

$$W_t^{hydro} = W_t^{drain} \quad (6)$$

Donde:

- W_t^{hydro} es el volumen de agua que circula en el sistema hidropónico durante el periodo t (m³),
- W_t^{drain} es el volumen de agua drenada o descargada del sistema hidropónico durante el

periodo t (m^3).

Sistema microalgal

El flujo de entrada al sistema microalgal está compuesto por la fracción de agua pluvial para *Espirulina* $FA_t^{pluvial-esp}$, el volumen de medio inorgánico para *Espirulina* $V_t^{sin-esp}$ y el agua drenada o descargada desde el sistema hidropónico W_t^{drain} , ecuación (7).

$$W_t^{esp} = FA_t^{pluvial-esp} + V_t^{sin-esp} + FU_{b,t} + W_t^{drain} \quad (7)$$

Se modelan fotobiorreactores cilíndricos de columna vertical tipo airlift para el sistema de microalgas, considerando un espacio entre reactores de 50 cm. Estas dimensiones se utilizan para calcular la única variable entera del modelo: el número total de reactores (NTR) que pueden instalarse en el área disponible por edificio.

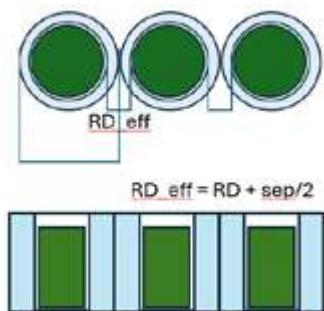


Figura 5. Espacio de separación entre fotobiorreactores. Fuente: elaboración propia.

Una vez determinado el NTR, se multiplica por su capacidad de tratamiento, considerando un tiempo de retención hidráulica de 1 día, según [25]. Se utiliza un factor de rendimiento de biomasa por litro de agua tratada [29] para estimar la cantidad de biomasa generada, ecuación (8).

$$Biomass_t = e = Y^{cv} * W_t^{esp} \quad (8)$$

Donde:

- $Biomass_t$ es la biomasa producida en el periodo t (kg),
- Y^{cv} es el rendimiento de conversión de biomasa por unidad de volumen tratado ($kg \cdot m^{-3}$),

- W_t^{esp} es el volumen de agua procesado en el sistema de microalgas durante el periodo t (m^3).

La biomasa microalgal generada se divide en biomasa sin tratamiento $B_{i,t}^{directo}$ y biomasa tratada $B_{i,t}^{tratado}$, ésta última se somete a un proceso de extrusión y secado. Tal biomasa puede utilizarse como biofertilizante con alta concentración de nitrógeno. Por ejemplo, en [26] aplicaron extractos de polisacáridos de *Arthrospira platensis* para riego (fitotrón) de cultivos de tomate en tierra observando un mayor número de nudos, contenido de carotenoides y actividad enzimática del N. En [27] aplicaron extracto rico en ficocianina (PRSE) de *Spirulina platensis* en cultivos en tierra de Lechuga (*Lactuca sativa*, Salanova) observando una mejora en la apariencia, densidad nutricional y vida útil del producto. En el caso de [28], aplicaron biomasa seca de *Arthrospira platensis* y *Chlorella vulgaris* al suelo en un invernadero para cultivos de maíz, lo que resultó en un mayor rendimiento de grano en comparación con los controles no inoculados.

Fijación de CO_2

La Figura 6 muestra el balance estequiométrico global de la formación de biomasa microalgal a partir de CO_2 , urea y fosfato, por elemento (C, H, O, N y P), para determinar la relación molar CO_2 : biomasa. Se obtuvo un sistema de ecuaciones de cinco incógnitas: a, b, c, d, y e. Se sustituyeron los valores obtenidos en la reacción estequiométrica y, a partir de los pesos moleculares, se obtuvieron 44 g de CO_2 consumidos por 37,6 g de biomasa generada.

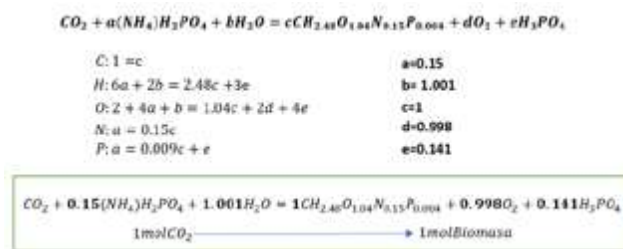


Figura 6. Balance estequiométrico de formación de biomasa. Fuente: elaboración propia.

De este cálculo se define un factor $CO_2^{biomass}$ que representa el rendimiento teórico de conversión de carbono inorgánico (CO_2) en carbono orgánico celular (biomasa), asumiendo condiciones de crecimiento fotosintético ideal y balance elemental cerrado.

Finalmente, se calcula la cantidad de CO_2 fijado por kg de biomasa mediante la ecuación (9).

$$CO2_t^{fix} = CO2^{biomass} * Biomass_t \quad (9)$$

Donde $CO2^{biomass}$ representa kilogramos de CO_2 fijado por kilogramo de biomasa seca. Se fija una meta anual de fijación de CO_2 que se determina calculando:

Donde:

- EF_{grid} es el factor de emisión de la red e indica cuántos kg de CO_2 se emiten por kWh (kg CO_2 /kWh),
- E_p es el consumo eléctrico per cápita (kWh/p·año),
- r es un factor de cobertura, este valor depende de cuánto del % emitido se busca fijar.

Esta meta anual se calcula con base en el consumo eléctrico por persona del edificio. Se toma por ahora como indicador indirecto de la sostenibilidad del biosistema, con referencia a la huella de carbono energética del edificio. Se fija como meta al menos un % del CO_2 emitido por el consumo de energía eléctrica de la unidad habitacional, definido como el factor r .

Cumplimiento de NOM

El flujo de salida después del tratamiento con microalgas es evaluado en cumplimiento de la NOM-001-SEMARNAT-1997, a través de una variable binaria que toma solo valores de (0,1), donde:

- Si 0, el agua no cumple la NOM para los niveles de N, P, K, Mg, entonces, se recicla reingresándola al sistema hidropónico para su retratamiento $W_t^{recycle}$.
- Si 1, el agua cumple la NOM-001-SEMARNAT-1997 para los niveles de N y K, entonces, es apta para riego $W_t^{riego-jardin}$.

El resto de los contaminantes se equilibra al agregar un volumen concentrado de un medio inorgánico.

$$Cp_{p,t}^{out.esp} \leq Cp_p^{max.nom} + M \cdot (1 - Z_{p,t}) \quad (11)$$

La ecuación 11 muestra el acoplamiento para la

variable binaria con la estrategia Big M, donde el término M es lo suficientemente grande como para garantizar la flexibilidad necesaria para cumplir la restricción. El término $Z_{p,t}$ permite prender o apagar la dosificación de un medio inorgánico concentrado, evitando que su concentración rebase el límite máximo permitido. De manera que el modelo va ajustando dinámicamente la dosificación y la dilución de los nutrientes a cada t de tiempo.

Costos

Entre los costos se incluyen los de tratamiento de biomasa C^{bio} , costos de operativos para cada sistema C_i^{oper} , costos del riego de agua de jardín C^{riego} y el costo del reciclaje $C^{recycle}$, los cuales se obtienen tomando en cuenta tarifas eléctricas, mano de obra, mantenimiento y consumo eléctrico e hídrico.

Asimismo, se calculan el volumen total de agua tratada al año, el volumen anual de agua tratada por habitante, la producción anual total de jitomate y el volumen de producción de jitomate por persona, fijando como mínimo de producción el estándar de nutrición de 14,6 kg/persona·año. En México, la NOM-043-SSA2-2012 respalda la orientación alimentaria para un mayor consumo de verduras y frutas.

La ecuación 12 muestra la función objetivo que maximiza el Flujo de Caja Anual Total (TAC), que refleja la diferencia entre los ingresos por la venta de biomasa, los ahorros en agua y fertilizantes, y los costos de operación de un año.

$$TAC = G^{ven.biomasa} + G^{ven.jit} - C^{costbytrtmnt} - C^{riego} - C^{recycle} - C^{hydro} - C^{sin.total} \quad (12)$$

Donde:

TAC es el flujo de Caja Anual Total (Total Annual Cashflow) que representa el beneficio económico neto anual del sistema (MXN·a⁻¹)

$G^{ven.biomasa}$ es el ingreso anual por la venta de biomasa microalgal (MXN ·a⁻¹)

$G^{ven.jit}$ es el ingreso anual por la venta de jitomate o productos hidropónicos (MXN·a⁻¹)

$C^{costbytrtmnt}$ es el costo anual por el tratamiento y secado de la biomasa (MXN·a⁻¹)

C^{riego} es el costo anual asociado al riego de áreas verdes con agua tratada ($MXN \cdot a^{-1}$)

$C^{recycle}$ es el costo anual del proceso de recirculación y bombeo de agua entre sistemas ($MXN \cdot a^{-1}$)

C^{hydro} es el costo anual de operación del sistema hidropónico ($MXN \cdot a^{-1}$)

$C^{sin.total}$ es el costo total anual de operación, mantenimiento y energía del sistema integrado ($MXN \cdot a^{-1}$)

3. Resultados

Debido a que el modelo se encuentra actualmente en construcción y calibración, los resultados que aquí se presentan corresponden a ejecuciones preliminares del sistema de ecuaciones que definen los balances de agua y de nutrientes, y a la validación de los parámetros de diseño.

Los cálculos iniciales muestran una disponibilidad anual promedio de 850-900 m^3 por edificio, considerando el área disponible por edificio de 225,45 m^2 y una precipitación anual promedio de 568 mm. Tal volumen de captura sería suficiente para cubrir el sistema hidropónico y el NTR.

El modelo global calcula el balance de flujos de agua y el de nutrientes. Se observa una disminución de los valores de (p), tanto en hidroponía como en microalgas. El valor del flujo de riego es mayor que el de reciclaje, lo que indica que la variable binaria, el cálculo de la concentración y el factor de remoción funcionan correctamente.

4. Conclusión

La primera versión del modelo muestra estabilidad en los balances de flujo y de nutrientes. En esta participación se consolida la parte conceptual del modelo y se inicia la integración matemática de los primeros biosistemas.

Los resultados mostrados corresponden a la etapa de pre-validación, que incluye los módulos de ecuaciones para flujos de agua en ambos sistemas, balance de nutrientes, consumo de CO_2 y producción de biomasa y vegetales. EN el caso de los nutrientes, se decide comenzar por N, P, K y Mg por simplicidad del

modelo. Los rendimientos de producción de biomasa y de consumo de CO_2 pueden mejorarse con base en cinéticas de crecimiento y de consumo de sustratos, incluyendo los fotoperiodos, y los balances de energía, lo cual constituye la segunda parte del desarrollo del modelo.

El ejercicio presente sienta las bases para la integración biotecnológica de ambas tecnologías para la producción de alimentos, la reducción de descargas contaminantes y la captura de CO_2 atmosférico. Una vez integrado, el modelo permitirá evaluar distintos escenarios de adaptación de biosistemas integrados en el espacio urbano, mejorando la toma de decisiones y las medidas de sostenibilidad urbana.

Los resultados preliminares son consistentes con los reportados por Talaei et al. (2021), quienes optimizaron sistemas de microalgas integrados a edificios para mejorar el desempeño energético y la captura de carbono. Sin embargo, a diferencia de este estudio, el presente modelo incorpora una función económica de optimización y la fijación de CO_2 como meta de sostenibilidad urbana, lo que representa un enfoque más integral para la toma de decisiones en contextos urbanos.

Agradecimientos

Los autores agradecen al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencia y Tecnología los recursos destinados mediante la beca de manutención otorgada a J.R. Uvera para la finalización de sus estudios de posgrado. Además, expresamos nuestro agradecimiento a la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Querétaro por el apoyo otorgado mediante la beca de matrícula para los estudios de posgrado de J.R. Uvera.

Conflictos de interés

Los autores declaran que no existen conflictos de interés.

5. Referencias bibliográficas

- [1] Aaronn Avit Ajeng, Noor Sharina Mohd Rosli, Rosazlin Abdullah, Jamilah Syafawati Yaacob, Ng Cai Qi, Show Pau Loke, Resource recovery from hydroponic wastewaters using microalgae-based biorefineries: A circular bioeconomy perspective, Journal of Biotechnology, Volume 360, 2022, Pages 11-22, ISSN 0168-1656, <https://doi.org/10.1016/j.jbiotec.2022.10.011>.
- [2] World Bank. (2023, April 3). Urban Development:

Overview. [Text/HTML]. World Bank. <https://www.bancomundial.org/es/topic/urbandevelopoment/overview>

[3] Rogers, R. (1997). Cities for a small planet. (1st ed.). Faber and Faber Limited.

<https://issuu.com/mattwilliams65/docs/cities-for-a-small-planet-architecture-urbanism-ar>

[4] Alfonso, Ciro & Mendoza, Serna & Cardona, Melva & Rodríguez, Nelson & Ricardo, Valencia & Álvarez-León, Ricardo. (2018). Biosistemas Integrados y sus Interrelaciones con el Desarrollo Sostenible y el Desarrollo Humano y Social. 2010- (L) Universidad de Manizales. Centro de Investigaciones en Medio Ambiente y Desarrollo (CIMAD). Libro. ISBN 978-958-99351-1-8.

[5] Warburton, K., Pillai-McGarry, U., & Ramage, D. (2002). Integrated biosystems for sustainable development. Proceedings of the InFoRM 2000 National Workshop on Integrated Food Production and Resource Management, 01.

[6] Mohammad Elrayies, G. (2018). Microalgae: Prospects for greener future buildings. [ebook] Port Said: ScienceDirect, pp.1175-1191. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032117311747>

[7] Foo, Jacky, Integrated Biosystems Networks. (2000) International Organization on Biotechnology and Bioengineering. Integrateddevelopment.org. Recuperado el 30 de octubre de 2024, de [http://www.integrateddevelopment.org/Integrated%20Bio-](http://www.integrateddevelopment.org/Integrated%20Bio-Systems%20%20A%20Global%20Perspective.htm)

[Systems%20%20A%20Global%20Perspective.htm](http://www.integrateddevelopment.org/Integrated%20Bio-Systems%20%20A%20Global%20Perspective.htm)

[8] Uvera, Jonathan. Fotocelda de uso doméstico para el cultivo de microalgas de alta proteína. Tesis de maestría. Diseño Industrial PDI-UNAM 2022

[9] Talaei, M., Mahdavinejad, M., Azari, R., Prieto, A., & Sangin, H. (2021). Multi-objective optimization of building-integrated microalgae photobioreactors for energy and daylighting performance. Journal of Building Engineering, 42, 102832.

<https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.102832>

[10] Yaman, Y., Tokuç, A., Deniz, İ., Ezan, M. A., Köktürk, G., Dalay, M. C., & Demirel, Z. (2025). Photobioreactor facade panels: Enhancing comfort, reducing energy use, and capturing carbon in temperate continental climates. Systems Microbiology and Biomanufacturing, 5(1), 357–370. <https://doi.org/10.1007/s43393-024-00300-9>

[11] Supraja, K. V., Behera, B., & Balasubramanian, P. (2020). Performance

evaluation of hydroponic system for co-cultivation of microalgae and tomato plant. Journal of Cleaner Production, 272, 122823. 9

[12] Ergun, O. & Dasgan, H. & Isik, O.. (2020). Effects of microalgae *Chlorella vulgaris* on hydroponically grown lettuce. Acta Horticulturae. 169-176. [10.17660/ActaHortic.2020.1273.23](https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2020.1273.23). 10

[13] Dasgan, H.Y., Aydoner, G., and Akyol, M. (2012). Use of some microorganisms as bio-fertilizers in soilless grown squash for saving chemical nutrients. Acta Hortic. 927, 155–162 <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2012.927.17>. 13

[14] Barone, V., Puglisi, I., Fragalà, F., Piero, A. R. L., Giuffrida, F., & Baglieri, A. (2019). Novel bioprocess for the cultivation of microalgae in hydroponic growing system of tomato plants. Journal of Applied Phycology, 31(1), 465-470. 7

[15] Faheed, F.A., and Fattah, Z.A. (2008). Effect of *Chlorella vulgaris* as biofertilizer on growth parameters and metabolic aspects of lettuce plant. Journal of Agriculture & Social Sciences 4, 165–169. 11

[16] Zodape, S.T., Gupta, A., Bhandari, S.C., Rawat, U.S., Chaudhary, D.R., Eswaran, K., and And Chikara, J. (2011). Foliar application of seaweed sap as biositulant for enhancement of yield and quality of tomato. J. Sci. Ind. Res. (India) 70, 215–219. 12

[17] Zhang, J., Wang, X., & Zhou, Q. (2017). Co-cultivation of *Chlorella* spp and tomato in a hydroponic system. Biomass and Bioenergy, 97, 132-138.

[18] Growth, Yield, Quality and Microbial Diversity in Hydroponic Vertical Farming – Effect of Phycocyanin-Rich *Spirulina* Extract <https://www.preprints.org/manuscript/202011.0354/v2>

[19] The Growth of Pak Choy (*Brassica rapa* L.) on the microalgae (*Spirulina platensis*) biomass-based nutrient solution

<https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/1230/1/012205/meta>

[20] Ackerman K (2012) The potential for urban agriculture in New York City: growing capacity, food security and green infrastructure report. Columbia University Urban Design Lab, New York

[21] Guimapang, K. (2020). University of Florida. Graduates Mani Karami and Drew Kauffman Create Photobioreactor Facade Systems for Algae Architecture. Consultado el 8 de enero 2021, de <https://archinect.com/features/article/150209394/university-of-floridagraduates-mani-karami-and-drew-kauffman-create-photobioreactor-facade-systems-for-algae-architecture>

[22] Comisión Estatal de Aguas del Estado de Querétaro. (2024). Norma Técnica para el diseño de

sistemas de agua potable, alcantarillado sanitario y saneamiento del Estado de Querétaro. Gobierno del Estado de Querétaro.

<https://www.ceaqueretaro.gob.mx/wp-content/uploads/2024/06/35.-Norma-Tecnica.pdf>

[23] Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). (2021). Registro mensual de precipitación pluvial: Estación Querétaro (Observatorio), periodo 1921–2021. Gobierno de México. <https://smn.conagua.gob.mx/es/climatologia/temperaturas-y-lluvias/resumenes-mensuales-de-precipitacion>

[24] Sánchez-del Castillo, F., González-Mora, R., Rodríguez-Dimas, N., Moreno-Pérez, E., & Alcántar-González, G. (2012). Efecto de la concentración de la solución nutritiva sobre el crecimiento y rendimiento de tomate (*Solanum lycopersicum* L.) en hidroponía. *Revista Chapingo Serie Horticultura*, 18(2), 167–175. <https://doi.org/10.5154/r.rchsh.2011.08.041>

[25] Bautista, A., & Hernández, R. (2020). Laboratorio de ecosíntesis: Arte y ciencia del cultivo de espirulina. Secretaría de Cultura, Gobierno de México.

[26] Rachidi, F., Benhima, R., Sbabou, L., & El Arroussi, H. (2020). *Microalgae polysaccharides bio-stimulating effect on tomato plants: Growth and metabolic distribution*. *Biotechnology Reports*, 25, e00426. <https://doi.org/10.1016/j.btre.2020.e00426>

[27] Lerer, L., & Kamaleson, C. (2020). *Growth, yield, and quality in hydroponic vertical farming – Effects of phycocyanin-rich Spirulina extract*. Preprint.

<https://www.preprints.org/manuscript/202011.0354/v1>

[28] Dineshkumar, R., Senthilkumar, A., & Natarajan, D. (2019). Effect of microalgal biomass application (*Spirulina* / *Chlorella*) on growth and yield of maize (*Zea mays* L.). *Journal of Algal Studies*, 5(2), 45-52.

[29] Zhai, J., Li, X., Li, W., Rahaman, M. H., et al. (2017). Optimization of biomass production and nutrients removal by *Spirulina platensis* from municipal wastewater. *Ecological Engineering*, 108, 83–92. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2017.07.023>

Estudio comparativo de algoritmos de desdoblamiento de fase espacial y aplicación en reconstrucción 3D

Comparative study of spatial phase unwrapping algorithms and their application in 3D reconstruction

Villafuerte Ruiz, Karla Lizeth*, Espinosa Bernal, Osmar Antonio* Pedraza Ortega, Jesús Carlos* Ramos Arreguín, Juan Manuel* Sotomayor Olmedo, Artemio* Aceves Fernández, Marco Antonio*

*Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Querétaro **
Querétaro, Querétaro

kvillafuerte24@alumnos.uaq.mx, oespinosa07@alumnos.uaq.mx, caryoko@yahoo.com,
juan.ramos@uaq.mx, artemio.sotomayor@uaq.edu.mx, marco.aceves@uaq.mx ;

ORCID (ORCID: [<https://orcid.org/0009-0004-9978-0795>], [<https://orcid.org/0000-0002-6730-2009>],
[<https://orcid.org/0000-0001-5125-8907>], [<https://orcid.org/0000-0002-2604-9692>],
[<https://orcid.org/0000-0001-8054-4654>], [<https://orcid.org/0000-0002-5455-0329>])

Resumen: Las técnicas de proyección de franjas son ampliamente utilizadas en perfilometría y se basan en un modelo matemático que relaciona el mapa de fase del patrón proyectado con la altura del objeto. Algunas permiten recuperar la superficie a partir de una sola imagen; sin embargo, como la fase está limitada a 2π , debe **desdoblarse** para obtener la altura del objeto. Este paso resulta crucial para una reconstrucción precisa, por lo que el presente estudio se centró en el análisis cualitativo y cuantitativo de diversos métodos tradicionales de desdoblamiento de fase aplicados a un conjunto de objetos sintéticos generados, con el propósito de evaluar su eficacia en términos de fidelidad, preservación estructural y consistencia frente a distintas geometrías. Los métodos fueron evaluados mediante métricas ampliamente reconocidas en el procesamiento de imágenes, como el error cuadrático medio, la relación señal-ruido de pico y la similitud estructural. Además, se realizó un análisis estadístico considerando todos los objetos en conjunto, con el fin de identificar tendencias consistentes y diferenciar el rendimiento de los algoritmos de manera más robusta. Los resultados mostraron que algunos métodos alcanzaron un desempeño sólido y estable al combinar bajo error, alta fidelidad y buena preservación estructural. Asimismo, la comparación visual de las reconstrucciones tridimensionales permitió observar cómo ciertas geometrías favorecieron o dificultaron el proceso de desdoblamiento. En conclusión, este trabajo ofrece una visión clara sobre las fortalezas y limitaciones de los métodos clásicos de desdoblamiento de fase espacial, aportando información relevante para el desarrollo de futuras investigaciones en el área.

Palabras clave: Desdoblamiento de fase espacial; Reconstrucción 3D; Perfilometría; proyección de franjas; Mapa de fase envuelto.

Abstract: Fringe projection techniques are widely used in profilometry and are based on a mathematical model that relates the phase map of the projected pattern to the object's height. Some methods allow the surface to be reconstructed from a single image; however, since the phase is limited to 2π , it must be unwrapped to obtain the object's height. This step is crucial for achieving an accurate reconstruction; therefore, the present study focused on the qualitative and quantitative analysis of various traditional phase unwrapping methods applied to a set of generated synthetic objects, aiming to evaluate their effectiveness in terms of fidelity, structural preservation, and consistency across different geometries. The methods were assessed using well-established image processing metrics, including mean squared error, peak signal-to-noise ratio, and structural similarity. In addition, a global statistical analysis was performed considering all objects together to identify consistent trends and more robustly differentiate the performance of the algorithms. The results showed that some methods achieved solid and stable performance by combining low error, high fidelity, and good structural preservation. Furthermore, visual comparison of the three-dimensional reconstructions revealed how certain geometries either favored or hindered the unwrapping process. In conclusion, this work provides a clear perspective on the strengths and limitations of classical phase unwrapping methods, offering relevant insights for the advancement and improvement of future research in the field.

Keywords: Spatial phase unwrapping; 3D reconstruction; profilometry; fringe projection; wrapped phase map.

1. Introducción

En las últimas décadas, **se investigó** ampliamente la idea de extraer la información 3D de una escena a partir de sus imágenes 2D. Se **implementaron** varias técnicas de medición con y sin contacto en numerosas aplicaciones científicas y de ingeniería para calcular la superficie 3D de un objeto. El principal objetivo es extraer la información útil de la profundidad de los objetos en una imagen de forma eficiente y automática. Esta información obtenida puede utilizarse para guiar diversos procesos, como el seguimiento de trayectorias en robótica, inspección automática de superficies, captura de modelos para prótesis médicas, ingeniería inversa, mapa de profundidad 3D para la navegación, y las aplicaciones de realidad virtual [1][2][3].

Entre las diversas técnicas tradicionales desarrolladas, una de las más utilizadas es el análisis de patrones de franjas o Fringe Projection Profilometry (FPP). Los algoritmos usados para el análisis de patrones de franjas pueden clasificarse en dos categorías: técnicas espaciales y temporales. Los algoritmos espaciales calculan la fase de un píxel en un patrón de franjas en función de sus píxeles vecinos. Ejemplos de una técnica espacial son: análisis de franjas por transformada de Fourier o transformada Wavelet, y demodulación de fase directa. Las técnicas espaciales requieren al menos un patrón de franjas para calcular los componentes de fase. Por otro lado, los algoritmos temporales requieren al menos tres imágenes para calcular los componentes de fase de un patrón de franjas. Ejemplos de técnicas temporales son el método de cambio de fase, método basado en código Gray, entre otros.

Todos los algoritmos de análisis de franjas se pueden dividir en diversas etapas de procesamiento, como; extracción o envoltimiento de fase (wrapped phase) y desenrollamiento de fase (phase unwrapping). La primera etapa extrae la fase de un patrón de franjas utilizando Fourier [1][4][5] o Wavelet [6][7][8], entre otros algoritmos. La fase producida por esta etapa se envuelve típicamente en el intervalo $(\pi, -\pi]$. La fase envuelta contiene cambios o brincos de fase de 2π , los cuales se pueden eliminar mediante el uso de algoritmos de desdoblamiento de fase.

Los algoritmos de desdoblamiento de fase se dividen en dos categorías: local y global. Los primeros encuentran los valores de fase desdoblados

integrando este valor a lo largo de una determinada trayectoria, y también se denominan algoritmos de seguimiento de trayectoria [9]-[12]. Los segundos localizan la fase desdoblada minimizando una función de error global y también se denominan algoritmos de norma mínima [13]-[19].

En este trabajo, se presentan un estudio comparativo entre diferentes algoritmos de desdoblamiento de fase locales y globales, con el propósito de verificar cual es el que presenta un mejor desempeño de forma cualitativa y cuantitativa **en objetos sintéticos**, mediante la observación de los resultados obtenidos, así como de la implementación de las métricas correspondientes. Este estudio servirá para poder seleccionar el método con mejor desempeño, para su implementación en la perfilometría de Fourier y perfilometría Wavelet, así como cualquier método que requiera desdoblamiento de fase espacial.

2. Materiales y métodos

La metodología general seguida en este trabajo se resume en la Fig. 1, donde se describe de manera esquemática el flujo completo del trabajo. Este diagrama complementa la explicación detallada que se presenta a continuación, facilitando la comprensión de las etapas desarrolladas.

La base de datos utilizada en este trabajo se construyó mediante la generación de objetos sintéticos en Blender (versión 4.3.2). Se emplearon modelos 3D sintéticos obtenidos de la plataforma Turbosquid, a partir de recursos de libre acceso. Se seleccionaron seis geometrías distintas, diseñadas para representar variedad en texturas, alturas y formas superficiales. Estas geometrías fueron elegidas de manera que no presentaran huecos internos, dado que el tipo de material modelado aplicado en Blender (spline) para generar el ground truth se dibuja desde el interior del objeto, lo que permite una representación continua de la superficie.

Para cada objeto se generaron cuatro imágenes fundamentales, como se muestra en la Fig. 2.

- La representación renderizada del objeto.
- La máscara binaria (obtenida mediante un esquema de iluminación dirigido para separar el objeto del fondo).
- El mapa de ground truth (a partir de la asignación de un material tipo spline que codifica la altura superficial).
- La proyección de franjas sinusoidales sobre el objeto, simulando un patrón de iluminación estructurada como en un sistema experimental de perfilometría.

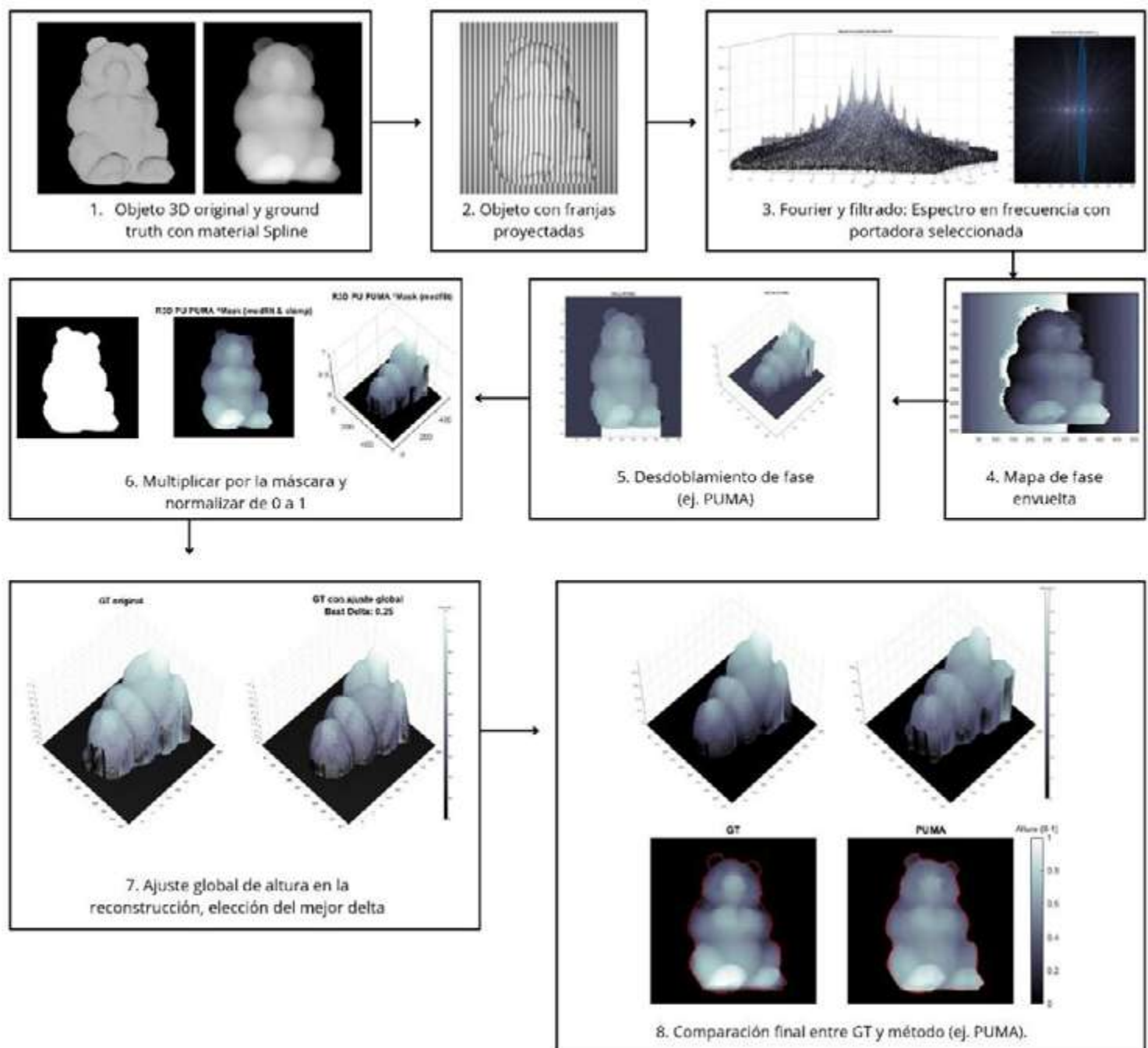


Figura 1. Diagrama metodológico de la reconstrucción de fase: Se muestra el flujo del procedimiento aplicado: (1) adquisición del objeto 3D y su ground truth; (2) proyección de franjas; (3) transformada de Fourier y filtrado con selección de portadora; (4) obtención del mapa de fase envuelta; (5) desdoblamiento de fase mediante un método específico (ejemplo: PUMA); (6) aplicación de la máscara binaria y normalización de 0 a 1; (7) ajuste global de altura en la reconstrucción y selección del mejor delta; y (8) comparación final entre la reconstrucción y el ground truth.

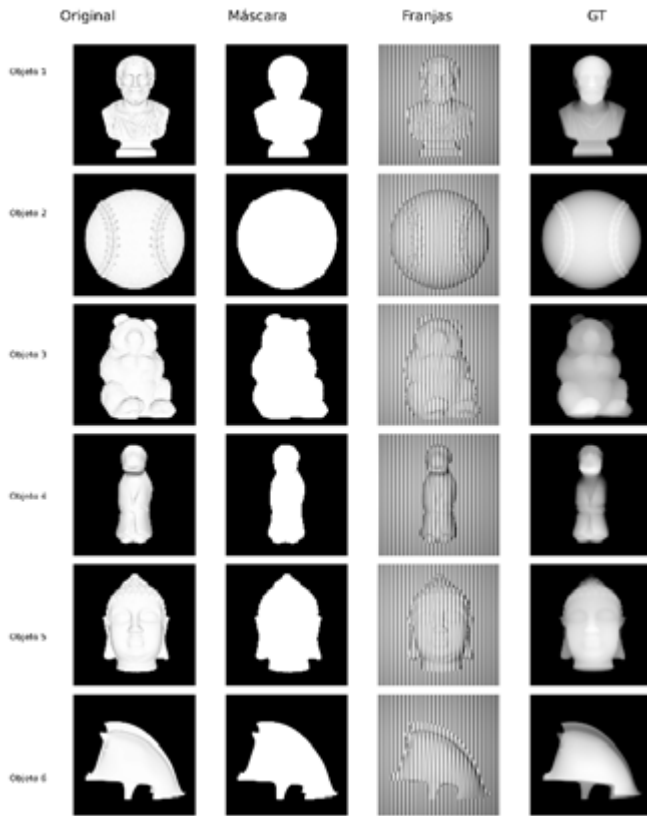


Figura 2. Se presentan los seis objetos utilizados para la evaluación experimental, mostrando para cada uno, la imagen del objeto original, la máscara binaria correspondiente, la imagen con franjas proyectadas y su respectivo ground truth (GT).

Los mapas de fase se obtuvieron a partir de las imágenes con proyección de franjas mediante perfilometría de Fourier bidimensional: se extrajo el espectro de amplitud, se seleccionó y filtró la frecuencia portadora f_0 , y tras la Transformada Inversa de Fourier se recuperó el mapa de fase envuelto. Posteriormente, se aplicaron los métodos de desdoblamiento de fase y se multiplicó por la máscara binaria correspondiente al objeto para delimitar la región de interés.

En la segunda etapa, desarrollada en MATLAB, los métodos de desdoblamiento implementados fueron: Itoh [9], Ghiglia [10], Zhao [11], Constantini [12], Herraiz [13], PUMA [15], PEARLS [16] y Martínez-Carranza [18]. Estos métodos se describen con mayor detalle en la sección 2.3.

Para cada objeto se realizó un barrido de valores de Δ (delta) en el rango 0-0.5 con pasos de 0.05. Este parámetro actúa como un ajuste global de altura en la reconstrucción de fase, corrigiendo el desplazamiento vertical que se produce al transferir el ground truth desde Blender hacia

MATLAB. En otras palabras, Δ compensa el offset de nivelación para que la comparación con el ground truth refleje únicamente las diferencias de forma.

Con el fin de identificar el mejor Δ global y evaluar la reconstrucción de los métodos, se definió una **evaluación** compuesta de las tres **métricas** empleadas:

- Error cuadrático medio en imágenes (IMMSE)
- Relación señal a ruido pico (PSNR)
- Índice de similitud estructural (SSIM)

2.1. Métricas

- El Error Cuadrático Medio en Imágenes (IMMSE) [19]. **Es** utilizado para evaluar la calidad de la reconstrucción de los objetos, comparando la imagen original (ground truth) con la imagen reconstruida después de aplicar el desdoblamiento de fase. La fórmula del IMMSE se basa en el cálculo del error cuadrático medio:

$$IMMSE = \frac{1}{mn} \sum_{x=1}^m \sum_{y=1}^n [I(x,y) - K(x,y)]^2 \quad (1)$$

Donde:

$I(x,y)$: Imagen original

$K(x,y)$: Imagen procesada

m : Número de renglón

n : Número de columna

$K(x,y)$ es el valor del píxel correspondiente en la imagen reconstruida. El *IMMSE* proporciona una medida de que tan similares son las dos imágenes, siendo valores más pequeños indicativos de una mejor reconstrucción.

- La Relación Señal-Ruido de Pico (PSNR) [19], **Se** utiliza para evaluar la calidad de las imágenes comprimidas o reconstruidas. El PSNR mide la relación entre la potencia máxima de una señal (la imagen original) y el ruido que afecta la calidad de su representación (la imagen reconstruida). La definición es:

$$PSNR = 10 * \log_{10} \left(\frac{Max^2}{IMMSE} \right) \quad (2)$$

Donde:

Max: Valor máximo posible del píxel en la imagen

IMMSE: Error Cuadrático Medio en Imágenes

Un PSNR más alto indica que la imagen reconstruida es

más similar a la original, es decir, que tiene menos ruido. Valores típicos de PSNR para imágenes de alta calidad están en el rango de 30 a 50 dB.

- **Índice** de Similaridad Estructural (SSIM) [20]. Indica la medición de similitud entre dos imágenes. Es decir, es una medición de la predicción de la calidad de la reconstrucción en una imagen, en comparación con la imagen original.

$$SSIM(x, y) = l(x, y)^\alpha + c(x, y)^\beta + s(x, y)^\gamma \quad (3)$$

Donde:

$l(x, y)$: luminancia de la imagen

$c(x, y)$: contraste de la imagen

$s(x, y)$: estructura de una imagen

SSIM es un modelo basado en la percepción que considera la degradación de la imagen como un cambio percibido en la información estructural, al tiempo que incorpora fenómenos perceptuales importantes, incluidos términos de enmascaramiento de luminancia y de enmascaramiento de contraste.

Cada métrica se normalizó previamente entre 0 y 1 dentro de la máscara del objeto (fondo en 0, altura en 1). Posteriormente, se calculó un puntaje global como combinación lineal ponderada (IMMSE: 0.3, PSNR: 0.3, SSIM: 0.4). Para cada método, el valor de Δ que maximizó este puntaje se consideró como el delta óptimo y fue utilizado en la comparación final.

2.2. Algoritmos de desdoblamiento de fase

Itoh

El algoritmo propuesto por Itoh en 1982 [9] plantea que el proceso de desdoblamiento de fase puede formularse a partir de la comparación entre las diferencias de fase real y su equivalente envuelto. La relación se expresa como

$$\Delta\phi_i = W(\Delta\psi_i), \quad |\Delta\phi_i| < \pi \quad (4)$$

Donde:

Φ : fase desenvuelta

Ψ : fase medida o envuelta

W : operador de envoltura que restringe los valores de la fase al intervalo $(-\pi, \pi]$.

En el caso unidimensional, la condición establece que la diferencia de fase real puede recuperarse de la diferencia envuelta siempre que dicha variación sea menor que π . Para dos dimensiones, esta condición se extiende a las direcciones x , **así como** y , de manera que el desdoblamiento se obtiene integrando el gradiente de fase reconstruido en ambas direcciones. El método se apoya en la continuidad local de la fase como supuesto fundamental, lo que implica que en presencia de discontinuidades o ruido elevado pueden introducirse errores en el resultado. Su sencillez y rapidez de implementación lo han consolidado como un punto de partida clave para el desarrollo de técnicas posteriores de desdoblamiento de fase.

Ghiglia y Romero

Ghiglia y Romero **propusieron** un método robusto que utiliza transformadas rápidas y métodos iterativos para realizar el desdoblamiento de fase 2D, tanto ponderado como no ponderado. Su formulación en el sentido de mínimos cuadrados es equivalente a resolver la ecuación de Poisson: en el caso no ponderado se aplica directamente la transformada de coseno discreta rápida (DCT), mientras que el caso ponderado introduce una matriz de pesos que requiere métodos iterativos, como la iteración de Picard o el gradiente conjugado preconditionado (PCG). El método se caracteriza por su robustez y eficiencia en grandes mallas, aunque la versión ponderada implica mayor costo computacional y memoria [10].

Zhao

Zhao, Chen y Tan **propusieron** un algoritmo de desdoblamiento de fase orientado a la medición de formas tridimensionales, basado en el uso de dos distribuciones de fase con distinta precisión. La fase de menor resolución se emplea para asignar las órdenes de franja y , posteriormente, se corrige punto por punto el valor de la fase más precisa, lo que permite obtener resultados correctos incluso en presencia de discontinuidades y ruido. El método se distingue por su simplicidad y eficiencia, aunque presenta cierta sensibilidad al ruido en el cálculo inicial y depende de la consistencia entre los dos perfiles de fase [11].

Costantini

El método propuesto por Costantini modela el desenvolvimiento de fase como un problema global de optimización con variables enteras, explotando la naturaleza discreta de los errores (múltiplos de 2π). Para resolverlo de manera eficiente, lo transforma en un problema de flujo de costo mínimo en una red, lo que permite corregir inconsistencias minimizando la energía asociada a los errores. A diferencia de los enfoques de mínimos cuadrados, este método evita la dispersión de errores y ofrece mayor robustez y precisión incluso en presencia de ruido o discontinuidades [12].

Herráez

En 2002, Herráez *et al.* [13] propusieron un algoritmo rápido de desenvolvimiento de fase bidimensional clasificado dentro de los quality-guided path algorithms. El método calcula una función de confiabilidad basada en segundas diferencias de la fase local y prioriza el desenvolvimiento en aquellas regiones más fiables. A diferencia de otros algoritmos de ruta guiada, no utiliza trayectorias continuas, sino que ordena y procesa las aristas según su fiabilidad, lo que reduce la propagación de errores y mejora la robustez frente a ruido y discontinuidades.

PUMA

Bioucas-Dias y Valadão desarrollaron PUMA (Phase Unwrapping Max-flow/Min-cut), un algoritmo que formula el desenvolvimiento como un problema de minimización de energía en un grafo. Para potenciales convexos, ofrece soluciones exactas usando cortes de grafo, mientras que para potenciales no convexos emplea aproximaciones basadas en majorize-minimize (MM, mayorizar-minimizar) y saltos múltiples. Este método destaca por su robustez ante ruido y discontinuidades, aunque el caso no convexo es NP-hard y requiere soluciones aproximadas [15].

PEARLS

Bioucas-Dias *et al.* introdujeron PEARLS (Phase Estimation using Adaptive Regularization based on Local Smoothing) como un enfoque en dos etapas:

primero aplica una reducción de ruido local adaptativa mediante aproximación polinómica y selección de ventana con el criterio ICI, y después utiliza PUMA para desenvolver la fase. Este esquema atenúa fuertemente el ruido mientras preserva detalles y discontinuidades, lo que facilita el desenvolvimiento robusto. Su principal limitación es la mayor complejidad computacional, dominada por la estimación adaptativa y el posterior uso de PUMA [16].

Martínez-Carranza

Martínez-Carranza *et al.* [18] propusieron un método de desenvolvimiento de fase bidimensional basado en la ecuación de transporte de intensidad (TIE), el cual evita la propagación de ondas al calcular directamente la derivada axial de la intensidad a partir de la fase envuelta mediante la aproximación de Fresnel. La fase absoluta se obtiene resolviendo el Laplaciano con transformadas de Fourier e imponiendo condiciones de contorno de Neumann mediante mirror-padding. Asimismo, se incorpora un esquema iterativo que mejora la precisión en presencia de ruido o aliasing. Este enfoque es robusto, independiente de la ruta y menos costoso que técnicas TIE tradicionales, aunque su versión de un solo paso presenta menor precisión que el método de mínimos cuadrados y puede requerir mayor tiempo computacional en escenarios iterativos o con ruido severo.

3. Resultados y discusión

La sección de resultados se **dividió** en dos **partes** principales. En la primera parte se realiza un análisis cualitativo y cuantitativo de ciertos objetos seleccionados (en este caso, los objetos 3, 5 y 6), con el objetivo de examinar con mayor detalle cómo se comportan los distintos métodos de desdoblamiento de fase frente a diferentes geometrías y características de superficie. Estos casos permiten observar con precisión cómo la complejidad del objeto influye en la fidelidad de las reconstrucciones y en las métricas de error obtenidas. Este análisis se apoya tanto en las representaciones tridimensionales generadas como en los valores cuantitativos calculados, lo que ofrece una visión combinada de desempeño visual y numérico. De manera adicional, se incorporaron gráficas comparativas de líneas que reúnen los resultados de todos los objetos, lo que permitió detectar patrones de consistencia y variabilidad entre algoritmos. Gracias a este contraste fue posible

identificar cuáles métodos se mantienen robustos bajo distintas geometrías y cuáles exhiben debilidades específicas asociadas a la complejidad de la superficie.

En la segunda parte, se presenta un análisis estadístico global, en el que se consideran en conjunto los seis objetos evaluados. En este apartado se calcularon los valores promedio y las desviaciones estándar de cada métrica, lo que brinda un panorama más general y confiable del rendimiento de los algoritmos. Este enfoque permite trascender la observación puntual de casos aislados y ofrece criterios más sólidos para determinar tendencias de desempeño. A partir de esta integración se evidenció con mayor claridad cuáles métodos sobresalen en términos de robustez, fidelidad y preservación estructural, y cuáles se posicionan de manera sistemática con un rendimiento menos favorable. Con ello se obtiene una visión integral del comportamiento de los algoritmos evaluados, que complementa y refuerza los hallazgos identificados en el análisis individual.

1.1. Evaluación por objeto

La primera parte se centra en el estudio detallado de tres objetos sintéticos específicos (objetos 3, 5 y 6), seleccionados por su relevancia debido a la complejidad geométrica que presentan y a la variabilidad observada en los resultados de reconstrucción. Estos casos resultan especialmente útiles porque permiten explorar no solo el comportamiento general de los algoritmos, sino también su capacidad de adaptación frente a particularidades de forma y superficie.

En la Fig. 3 se muestran las gráficas con los valores de las métricas calculadas para los objetos analizados, lo que ofrece una base numérica sólida para contrastar de forma directa el rendimiento de los diferentes métodos. Esta información permite corroborar visualmente lo observado en las reconstrucciones y facilita la identificación de tendencias de desempeño más allá de las percepciones cualitativas.

Posteriormente, en la Fig. 5 se muestran los mapas reconstruidos en formato tridimensional tipo *mesh* para cada método, acompañados de su representación bidimensional. En esta última se incluye un contorno en color rojo que delimita la región de evaluación establecida mediante la máscara binaria.

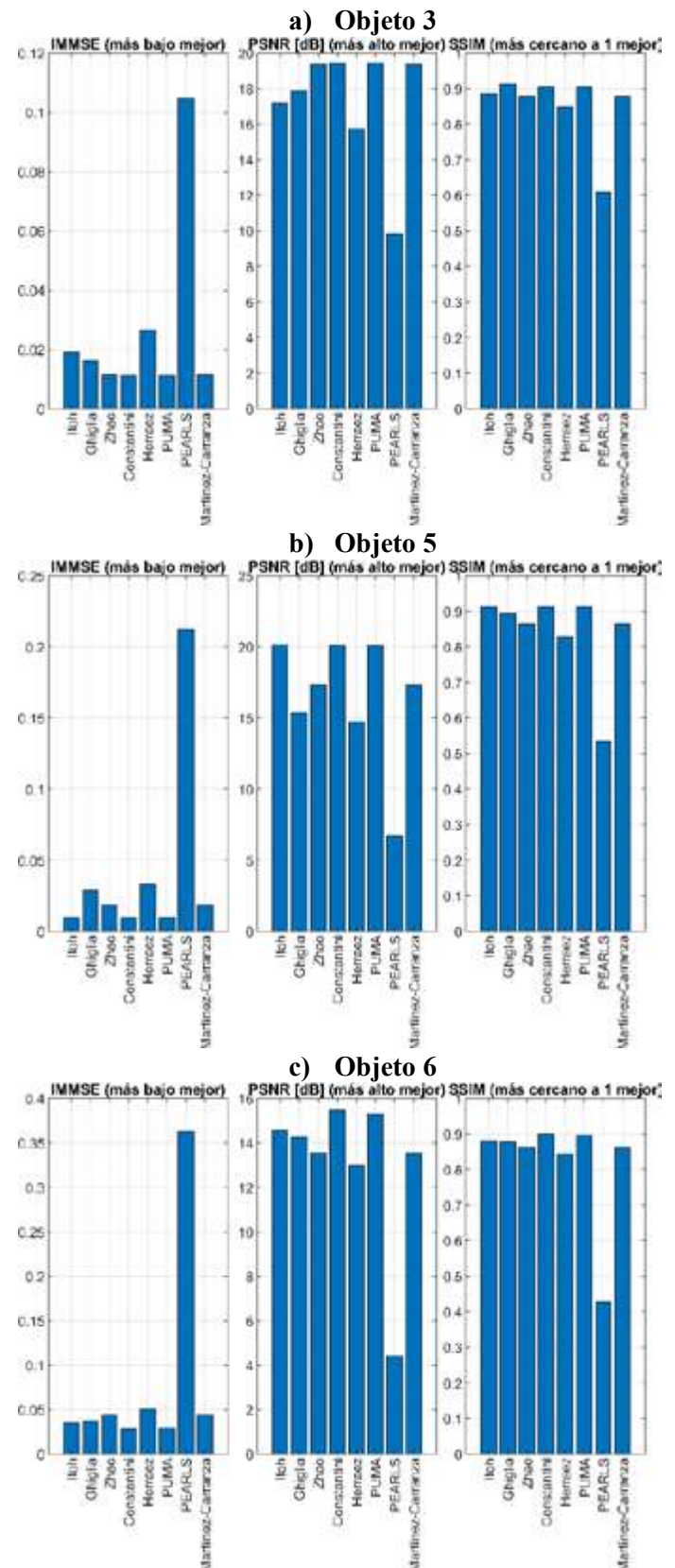


Figura 3. Resultados de IMMSE, PSNR y SSIM para los objetos (a) 3, (b) 5 y (c) 6 en cada método de desdoblamiento de fase.

Objeto 3

En la Fig. 3a, correspondiente a las métricas cuantitativas, se observa que los métodos con menor error en IMMSE fueron Constantini (0.0113) y PUMA (0.0113), junto con Zhao/Andreas (0.0116), lo cual indica un alto grado de fidelidad respecto al ground truth. En contraste, PEARLS presenta un valor muy elevado (0.1046), casi un orden de magnitud mayor, lo que refleja un desempeño claramente inferior. En términos de PSNR, nuevamente sobresalen Constantini (19.45 dB) y PUMA (19.44 dB), seguidos de Zhao/Andreas (19.35 dB), mientras que PEARLS cae a 9.80 dB, confirmando su baja calidad en la reconstrucción. Finalmente, en SSIM, que evalúa la similitud estructural, el mejor resultado lo obtiene Ghiglia (0.912), seguido de Constantini (0.906) y PUMA (0.905). Esto sugiere que, aunque Ghiglia no es el mejor en IMMSE, logra preservar de manera más efectiva la estructura interna del objeto.

La Fig. 5a (*mesh 3D*) permite visualizar cómo se traducen estos valores en la superficie reconstruida. Los métodos de mejor desempeño (Constantini, PUMA y Ghiglia) muestran una superficie continua y suave, con relieves más cercanos al GT. En cambio, métodos como Herraiez, y, de manera más pronunciada, PEARLS, presentan irregularidades y artefactos que generan una topografía discontinua y poco realista.

Por último, en la Fig. 5b se evidencia con mayor claridad la capacidad de cada método para preservar la silueta y los bordes del oso. Constantini, PUMA y Ghiglia mantienen la forma de manera más estable y fiel al GT, mientras que Herraiez presenta rupturas en el contorno y PEARLS exhibe deformaciones notorias, confirmando así los valores bajos de sus métricas.

En conjunto, estos resultados muestran que Constantini y PUMA son los métodos más consistentes al combinar bajo error, alta fidelidad y buena preservación estructural, mientras que Ghiglia, aunque con un error algo mayor, resalta en SSIM. Por el contrario, PEARLS se posiciona como el método de peor desempeño global, tanto en las métricas como en la visualización.

Objeto 5

En términos de reconstrucción visual (Figs. 4c y 4d), se aprecia que métodos como Itoh, Constantini y PUMA logran aproximaciones muy cercanas al GT, manteniendo una superficie uniforme y con menos artefactos visibles. También Ghiglia logra preservar la

estructura, aunque con cierta pérdida de detalle. En contraste, algoritmos como Herraiez y especialmente PEARLS muestran distorsiones notorias y discontinuidades en la superficie del objeto, lo que afecta la percepción global de la forma.

Las métricas cuantitativas (Fig. 3b) confirman estas observaciones. El IMMSE más bajo se obtuvo con Itoh (0.0097), muy cercano a Constantini (0.0098) y PUMA (0.0098), lo que indica alta fidelidad respecto al GT. Por el contrario, PEARLS presentó el error más alto (0.2125), un valor casi veinte veces mayor. En la métrica PSNR, nuevamente destacan Itoh (20.12 dB), Constantini (20.10 dB) y PUMA (20.09 dB), superando los 20 dB, lo que refleja un alto nivel de preservación de la señal, mientras que PEARLS mostró el valor más bajo (6.72 dB), con una caída significativa en la relación señal-ruido. Finalmente, en SSIM, los mejores métodos alcanzaron valores cercanos a 0.912 (Itoh, Constantini y PUMA), confirmando su capacidad para preservar la estructura del objeto, mientras que PEARLS se mantuvo en 0.536, evidenciando su pobre desempeño estructural.

Los resultados muestran que Itoh, Constantini y PUMA son los métodos más consistentes para el objeto 5, alcanzando una reconstrucción robusta tanto en términos de error, fidelidad y similitud estructural. PEARLS, en contraste, confirma su bajo desempeño con métricas muy inferiores y claras deficiencias en la reconstrucción visual.

Objeto 6

En términos cuantitativos (Fig. 3c), el método PUMA alcanzó el menor error cuadrático medio (IMMSE $\approx$ 0.011), acompañado de un PSNR de 20.3 dB y un SSIM de 0.91, lo que confirma su capacidad para preservar tanto la fidelidad global como la similitud estructural con respecto al ground truth. Por el contrario, el algoritmo PEARLS mostró el peor desempeño con un IMMSE de 0.106, un PSNR de apenas 9.8 dB y un SSIM de 0.61, reflejando una reconstrucción deficiente y con pérdida de estructura. Métodos como Itoh (IMMSE $\approx$ 0.019; SSIM $\approx$ 0.88) y Constantini (IMMSE $\approx$ 0.011; PSNR $\approx$ 19.7 dB) se situaron en un rango intermedio, mostrando un equilibrio entre error bajo y preservación de la forma. En contraste, Herraiez y Ghiglia presentaron un rendimiento moderado, con errores superiores y menor similitud estructural frente al GT.

La visualización en 2D (Fig. 5d) respalda estas

tendencias. El método PUMA reproduce de manera más uniforme la silueta del objeto, con contornos alineados al ground truth y mínimas distorsiones internas. Itoh y Constantini también ofrecen reconstrucciones razonablemente fieles, aunque con ligeros desajustes en las zonas de mayor curvatura. En cambio, PEARLS exhibe un sombreado heterogéneo y pérdida clara de detalles, lo que coincide con su bajo desempeño en las métricas.

En la reconstrucción 3D (Fig. 5e), estas diferencias se hacen aún más evidentes. PUMA mantiene una superficie homogénea y continua, reproduciendo de manera adecuada los volúmenes principales del objeto 6. Itoh y Constantini presentan reconstrucciones relativamente **estables**, pero con pequeñas irregularidades en regiones específicas. Herraiez y Ghiglia, aunque logran representar la forma general, introducen discontinuidades y superficies menos suaves. Finalmente, PEARLS muestra múltiples irregularidades volumétricas y distorsiones en la geometría, confirmando el deterioro estructural ya anticipado por sus valores bajos de PSNR y SSIM.

Tanto las métricas cuantitativas como las visualizaciones en 2D y 3D coinciden en señalar a PUMA como el método más robusto para este objeto, seguido de cerca por Itoh y Constantini, mientras que PEARLS se posiciona consistentemente como el de menor calidad en todos los criterios de evaluación.

Tendencias comparativas por objeto

Además de las observaciones generales, resulta interesante notar que ciertos objetos destacaron en métricas específicas. En la Fig. 4 se observa que el objeto 5 alcanzó los mejores resultados en IMMSE y PSNR, particularmente con los métodos Itoh, Constantini y PUMA, lo que sugiere que su geometría relativamente uniforme favorece una reconstrucción más precisa y con menor nivel de ruido. Por su parte, el objeto 6 obtuvo los valores más altos en SSIM, principalmente con PUMA e Itoh, evidenciando una mejor preservación de la estructura y los contornos pese a su mayor complejidad geométrica. Este comportamiento muestra que la calidad de las reconstrucciones no depende solo del error global, sino también de la capacidad de los métodos para adaptarse a diferentes formas y características superficiales.

En contraste, el objeto 3 presentó en general las métricas más bajas, especialmente en métodos como PEARLS y Herraiez, lo que indica que su geometría resultó más desafiante para la mayoría de los algoritmos. Este hallazgo resulta interesante porque evidencia que ciertos objetos pueden resaltar las debilidades estructurales de algunos métodos, haciendo necesario considerar no solo los promedios globales, sino también los casos particulares donde la complejidad de la forma compromete la calidad de la reconstrucción.

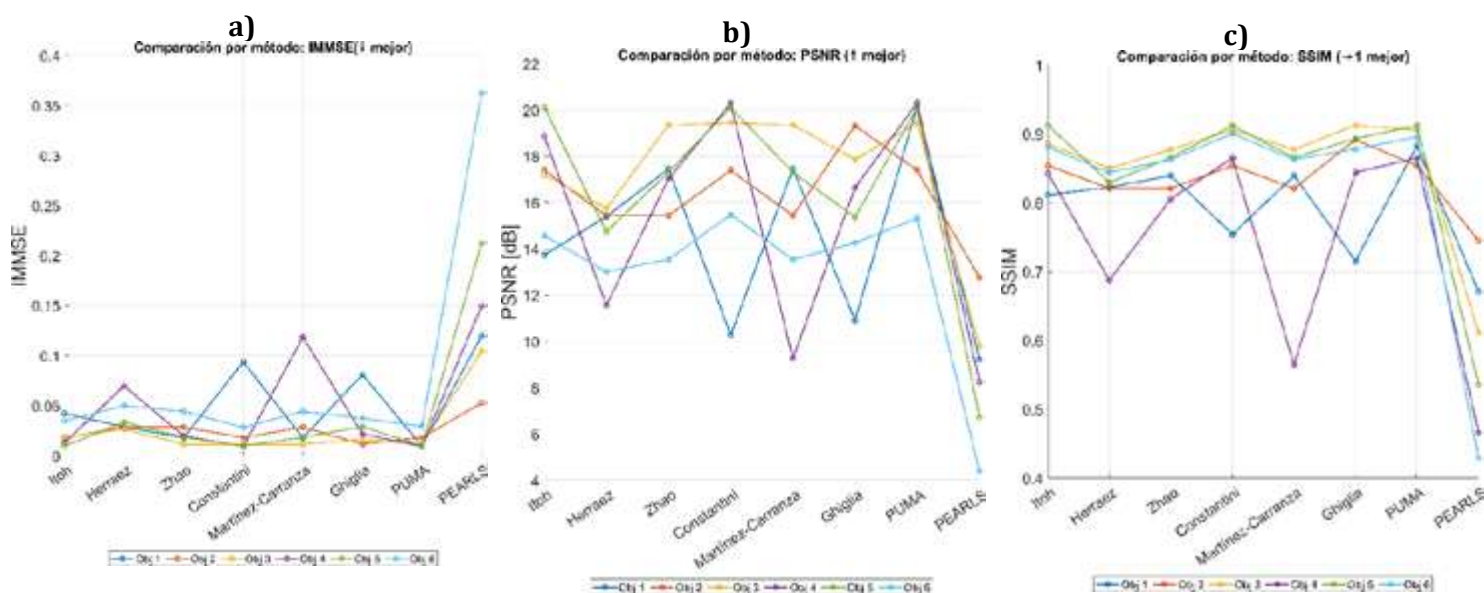
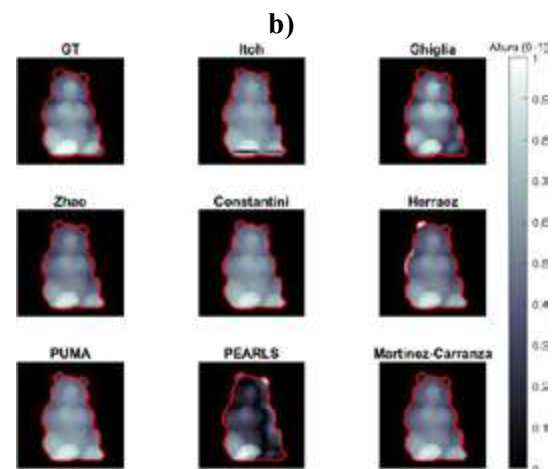
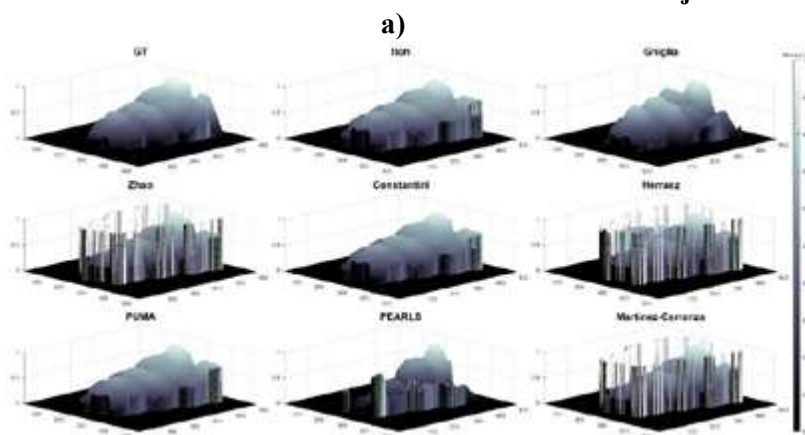
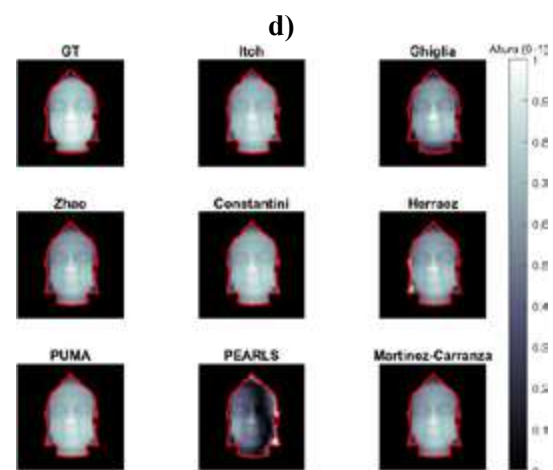
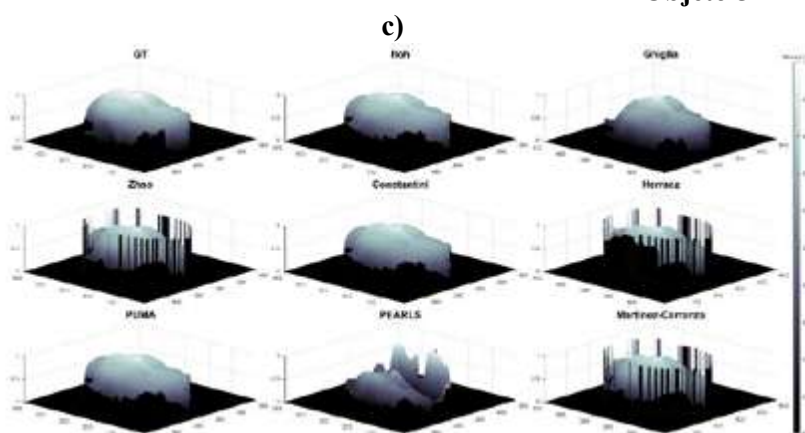


Figura 4. Gráficas comparativas de las métricas de evaluación (a) IMMSE, (b) PSNR y (c) SSIM obtenidas para los objetos 3, 5 y 6 en cada uno de los métodos de desdoblamiento de fase. Cada curva corresponde a un objeto y permite observar las diferencias de desempeño.

Objeto 3



Objeto 5



Objeto 6

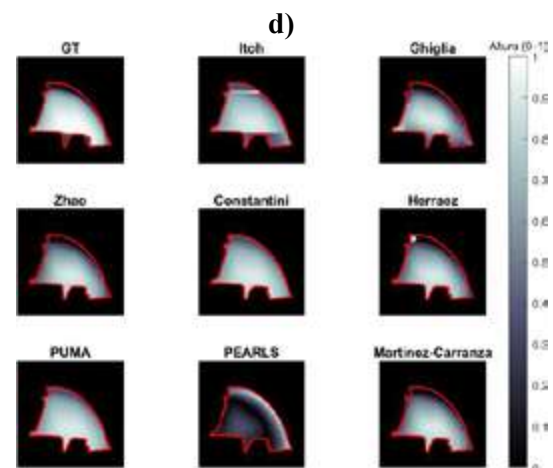
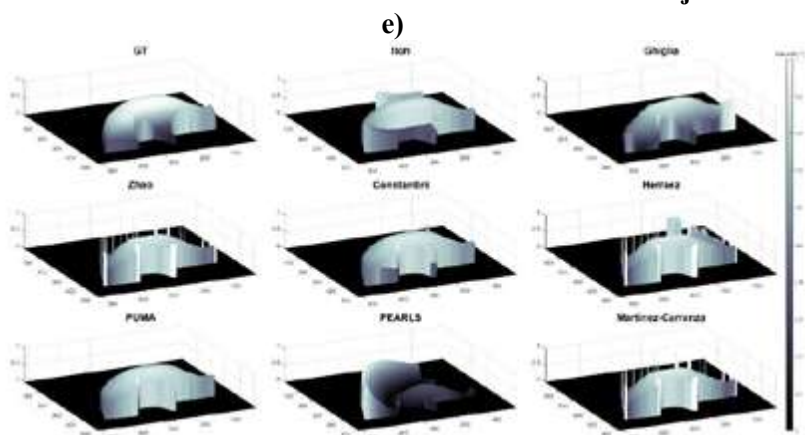


Figura 5. Reconstrucciones de los objetos 3, 5 y 6. A la izquierda se muestran las superficies en formato mesh y a la derecha las vistas bidimensionales, donde se incluye en rojo el contorno definido por la máscara binaria utilizada para la evaluación de métricas. El orden de presentación, de izquierda a derecha y de arriba hacia abajo, corresponde primero al ground truth (GT) y después a los métodos evaluados: Itoh, Ghiglia, Zhao, Costantini, Herraiz, PUMA, PEARLS y Martínez-Carranza.

4.1. Evaluación estadística global

La segunda parte del análisis corresponde a la evaluación estadística global, en la cual se consideran los seis objetos sintéticos procesados. A diferencia del estudio puntual de los objetos individuales, este apartado busca identificar tendencias generales de desempeño de los algoritmos de desdoblamiento de fase, mediante el cálculo de valores promedios y desviaciones estándar de las métricas IMMSE, PSNR y SSIM, siempre bajo el delta óptimo determinado para cada objeto.

En las Fig. 5 se presentan los resultados globales en forma gráfica, mientras que la Tabla 1 resume los valores cuantitativos promedio y sus respectivas desviaciones estándar.

En términos de IMMSE (Fig. 6a), el método PUMA obtuvo el mejor desempeño con un valor promedio de 0.0146 ± 0.0080 , lo que refleja su capacidad para minimizar el error respecto al ground truth. Le siguen Itoh (0.0229 ± 0.0129) y Zhao (0.0235 ± 0.0115), que también mantienen un nivel bajo de error. En contraste, PEARLS mostró el mayor valor de error (0.1671 ± 0.1094), evidenciando un rendimiento considerablemente inferior.

En la métrica PSNR (Fig. 6), que evalúa la fidelidad en términos de relación señal-ruido, PUMA también destacó con el valor más alto (18.78 ± 2.02 dB), seguido de Constantini (17.16 ± 3.85 dB) e Itoh (16.98 ± 2.45 dB). Por el contrario, PEARLS se ubicó nuevamente como el método de peor desempeño con un valor promedio de apenas 8.53 ± 2.84 dB, confirmando la baja calidad de sus reconstrucciones.

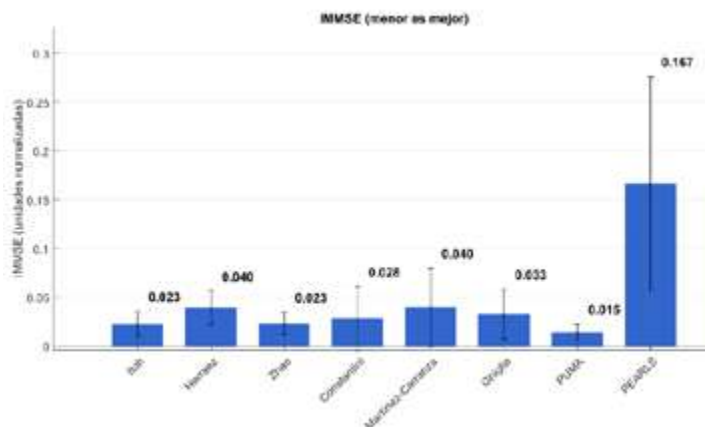
Finalmente, en SSIM (Fig. 6c), que mide la similitud estructural, los mejores métodos fueron PUMA (0.886 ± 0.023), Itoh (0.864 ± 0.036) y Ghiglia (0.856 ± 0.072). Estos resultados sugieren que dichos algoritmos logran preservar de mejor manera la geometría y los detalles internos de los objetos. Por su parte, PEARLS alcanzó un valor promedio de 0.576 ± 0.122 , considerablemente menor al resto, lo que indica una pobre preservación de la estructura.

La evaluación estadística global confirma que PUMA se posiciona como el método más robusto y consistente, al obtener sistemáticamente los mejores valores en las tres métricas. Itoh, Zhao y Constantini mostraron también un desempeño competitivo, especialmente en IMMSE y SSIM, mientras que PEARLS presentó las mayores deficiencias en todos los indicadores, reafirmando las observaciones ya señaladas en los análisis individuales.

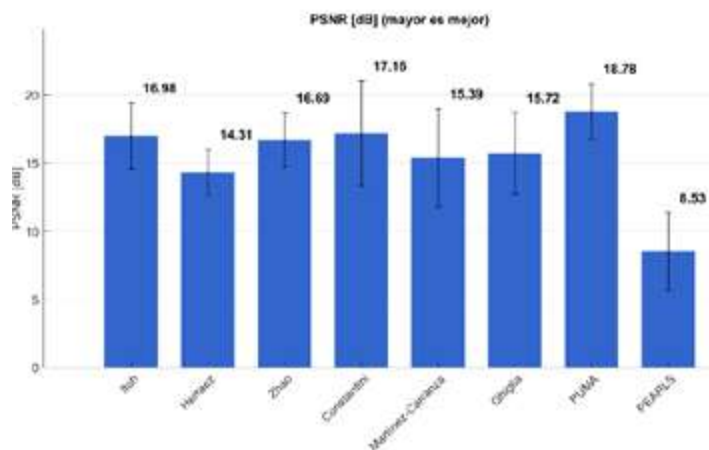
Método	IMMSE promedio	IMMSE Desviación estándar	PSNR promedio	PSNR Desviación estándar	SSIM promedio	SSIM Desviación estándar
Martínez-Carranza	0.0399	0.0402	15.3922	3.5973	0.8052	0.1193
Constantini	0.0285	0.0328	17.1643	3.8462	0.8653	0.0592
Ghiglia	0.0329	0.0254	15.7247	2.9605	0.8557	0.0724
Herraez	0.0396	0.0171	14.3129	1.6706	0.8090	0.0606
Itoh	0.0229	0.0129	16.9759	2.4488	0.8644	0.0358
PEARLS	<u>0.1671</u>	0.1094	<u>8.5259</u>	2.8407	<u>0.5762</u>	0.1219
PUMA	0.0146	0.0080	18.7850	2.0181	0.8858	0.0229
Zhao	0.0235	0.0115	16.6875	1.9840	0.8453	0.0282

Tabla 1. Valores promedio y desviación estándar de las métricas IMMSE, PSNR y SSIM obtenidas para los seis objetos sintéticos evaluados, considerando el delta óptimo en cada caso. Los valores en negritas indican el mejor desempeño en cada métrica, mientras que los valores subrayados y en cursiva corresponden al peor resultado.

a)



b)



c)

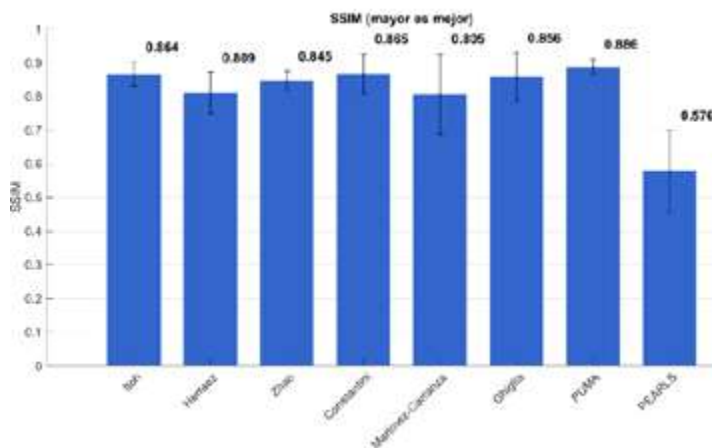


Figura 6. Comparación del desempeño promedio de los métodos de desdoblamiento de fase evaluados en seis objetos sintéticos. Se presentan los valores medios y desviaciones estándar para las métricas a) IMMSE (menor es mejor), b) PSNR (mayor es mejor) y c) SSIM (cercano a 1 es mejor).

4. Conclusiones y trabajo futuro

El análisis realizado permitió comparar de manera sistemática distintos métodos tradicionales de desdoblamiento de fase aplicados a objetos sintéticos. Los resultados individuales mostraron que algoritmos como Constantini, Itoh y, de manera destacada, PUMA lograron un desempeño consistente al combinar bajo error, alta fidelidad y buena preservación estructural, mientras que PEARLS evidenció limitaciones notorias en todas las métricas y visualizaciones. La evaluación estadística global confirmó estas tendencias, posicionando a PUMA como el método más robusto y estable, seguido por Itoh, Zhao y Constantini, que también mostraron competitividad en determinados escenarios. Estos hallazgos refuerzan la importancia de considerar tanto métricas cuantitativas como análisis visuales al valorar la eficacia de los algoritmos de desdoblamiento de fase.

Los resultados de este análisis comparativo contribuyen a la comprensión de los métodos clásicos y establecen una base sólida para futuras mejoras mediante enfoques híbridos.

Como trabajo futuro, se plantea explorar el potencial de enfoques basados en redes neuronales convolucionales con el fin de superar las limitaciones observadas en los métodos tradicionales, una vez entrenadas las redes neuronales con objetos sintéticos en ambientes controlados el siguiente paso sería validar su desempeño utilizando objetos reales, para comprobar la robustez de los métodos en contextos más cercanos a la realidad. Este proceso de validación experimental no solo fortalecerá la aplicabilidad práctica de los métodos de desdoblamiento de fase, sino que también representa un puente entre la simulación computacional y los sistemas ópticos reales utilizados en perfilometría. El empleo de técnicas de aprendizaje automático podría permitir una mejor reducción del error y una mayor preservación de la estructura en los mapas de fase, así como ofrecer soluciones más adaptables frente a diferentes condiciones de ruido, iluminación y geometrías complejas.

5. Referencias bibliográficas

- [1] J. C. Pedraza-Ortega et al., "A 3D Sensor Based on a Profilometrical Approach," *Sensors*, vol. 9, no. 12, pp. 10326–10340, Dec. 2009, doi: <https://doi.org/10.3390/s91210326>.
- [2] Alireza Kamran-Pishhesari, Amin Moniri-Morad, and Javad Sattarvand, "Applications of 3D Reconstruction in Virtual Reality-Based Teleoperation: A Review in the Mining Industry," *Technologies (Basel)*, vol. 12, no. 3, pp. 40–40, Mar. 2024, doi: <https://doi.org/10.3390/technologies12030040>.
- [3] J. Qian et al., "High-resolution real-time 360° 3D surface defect inspection with fringe projection profilometry," *Optics and Lasers in Engineering*, vol. 137, pp. 106382–106382, Feb. 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2020.106382>.
- [4] Z. Wang, "Single-shot 3D Reconstruction by Fusion of Fourier Transform Profilometry and Line Clustering," *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing*, vol. 18, no. 3, pp. 325–335, Apr. 2024, doi: <https://doi.org/10.1109/jstsp.2024.3400010>.
- [5] X. Su and W. Chen, "Fourier transform profilometry", *Optics and Lasers in Engineering*, vol. 35, no. 5, pp. 263–284, May 2001, doi: [https://doi.org/10.1016/s0143-8166\(01\)00023-9](https://doi.org/10.1016/s0143-8166(01)00023-9).
- [6] Claudia-Victoria López-Torres, Sebastián Salazar Colores, K. Kells, Jesús-Carlos Pedraza-Ortega, and Juan-Manuel Ramos-Arreguin, "Improving 3D reconstruction accuracy in wavelet transform profilometry by reducing shadow effects," *IET image processing*, vol. 14, no. 2, pp. 310–317, Feb. 2020, doi: <https://doi.org/10.1049/iet-ipr.2019.0854>.
- [7] J. Zhong and J. Weng, "Spatial carrier-fringe pattern analysis by means of wavelet transform: wavelet transform profilometry," *Applied Optics*, vol. 43, no. 26, p. 4993, Sep. 2004, doi: <https://doi.org/10.1364/ao.43.004993>.
- [8] M. A. Gdeisat, D. R. Burton, and M. J. Lalor, "Eliminating the zero spectrum in Fourier transform profilometry using a two-dimensional continuous wavelet transform," *Optics Communications*, vol. 266, no. 2, pp. 482–489, Oct. 2006, doi: <https://doi.org/10.1016/j.optcom.2006.05.070>.
- [9] K. Itoh, "Analysis of the phase unwrapping algorithm," *Applied Optics*, vol. 21, no. 14, p. 2470, Jul. 1982, doi: <https://doi.org/10.1364/ao.21.002470>.
- [10] D. C. Ghiglia and L. A. Romero, "Robust two-dimensional weighted and unweighted phase unwrapping that uses fast transforms and iterative methods," *Journal of the Optical Society of America*, vol. 11, no. 1, pp. 107–107, Jan. 1994, doi: <https://doi.org/10.1364/josaa.11.000107>.
- [11] H. Zhao, W. Chen, and Y. Tan, "Phase-unwrapping algorithm for the measurement of three-dimensional object shapes," *Applied Optics*, vol. 33, no. 20, p. 4497, Jul. 1994, doi: <https://doi.org/10.1364/ao.33.004497>.
- [12] M. Costantini, "A novel phase unwrapping method based on network programming," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 36, no. 3, pp. 813–821, May 1998, doi: <https://doi.org/10.1109/36.673674>.
- [13] M. A. Herráez, D. R. Burton, M. J. Lalor, and M. A. Gdeisat, "Fast two-dimensional phase-unwrapping algorithm based on sorting by reliability following a noncontinuous path," *Applied Optics*, vol. 41, no. 35, p. 7437, Dec. 2002, doi: <https://doi.org/10.1364/ao.41.007437>.
- [14] R. M. Goldstein, H. A. Zebker, and C. L. Werner, "Satellite radar interferometry: Two-dimensional phase unwrapping," *Radio Science*, vol. 23, no. 4, pp. 713–720, Jul. 1988, doi: <https://doi.org/10.1029/rs023i004p00713>.
- [15] J. M. Bioucas-Dias and G. Valadao, "Phase Unwrapping via Graph Cuts," *IEEE Transactions on Image Processing*, vol. 16, no. 3, pp. 698–709, Mar. 2007, doi: <https://doi.org/10.1109/tip.2006.888351>.
- [16] J. Bioucas-Dias, Vladimir Katkovnik, Jaakko Astola, and K. Egiazarian, "Absolute phase estimation: adaptive local denoising and global unwrapping," *Applied Optics*, vol. 47, no. 29, pp. 5358–5358, Oct. 2008, doi: <https://doi.org/10.1364/ao.47.005358>.
- [17] Q. Kemao, "Two-dimensional windowed Fourier transform for fringe pattern analysis: Principles, applications and implementations," *Optics and Lasers in Engineering*, vol. 45, no. 2, pp. 304–317, Feb. 2007, doi: <https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2005.10.012>.
- [18] J. Martinez-Carranza, K. Falaggis, and T. Kozacki, "Fast and accurate phase-unwrapping algorithm based on the transport of intensity equation," *Applied Optics*, vol. 56, no. 25, p. 7079, Aug. 2017, doi: <https://doi.org/10.1364/ao.56.007079>.
- [19] S. Krig, *Computer vision metrics: survey, taxonomy and analysis of computer vision, visual neuroscience, and deep learning*. Switzerland: Springer, 2016.
- [20] Z. Wang, A. C. Bovik, H. R. Sheikh, and E. P. Simoncelli, "Image Quality Assessment: From Error Visibility to Structural Similarity," *IEEE Transactions on Image Processing*, vol. 13, no. 4, pp. 600–612, Apr. 2004, doi: <https://doi.org/10.1109/tip.2003.819861>.

Articulaciones críticas entre teoría *queer*, espacialidad y enfoques interseccionales-decoloniales en la arquitectura

Critical Articulations between *Queer* Theory, Spatiality, and Intersectional-Decolonial Approaches in Architecture

Hernández Montes, Luis Daniel y Loredó Cansino, Reina

Maestría en Arquitectura, Facultad de Ingeniería

Universidad Autónoma de Querétaro

Querétaro, México

ld.hernandezmontes@gmail.com reina.loredo@uaq.mx

<https://orcid.org/0009-0008-3997-1492> <https://orcid.org/0000-0003-4190-6565>

Resumen: El artículo presenta una revisión crítica, de tipo comparativo-conceptual, orientada a articular tres bloques teóricos: teoría *queer* y de género, estudios arquitectónicos y de la espacialidad, y enfoques interseccionales-decoloniales. El objetivo es analizar cómo estos marcos se relacionan y qué aportes ofrecen al pensamiento arquitectónico contemporáneo. La metodología consistió en la recopilación y sistematización de libros y artículos especializados, organizados en una matriz que permitió reconocer patrones, tensiones y vacíos. Los resultados muestran que los cruces entre los tres bloques configuran un campo de pensamiento emergente: el diálogo *queer*-espacialidad desplaza la atención de la forma al uso y a la corporalidad; el cruce espacialidad-decolonialidad visibiliza jerarquías epistémicas y plantea nuevas pedagogías del diseño; y las articulaciones triádicas consolidan criterios para prácticas situadas y éticas del habitar. Se evidencia además la creciente incidencia de las producciones latinoamericanas en la redefinición crítica de la disciplina. En conjunto, el estudio sugiere que la arquitectura puede repensarse como una práctica de mediación cultural que reconoce la diversidad identitaria y los afectos como dimensiones constitutivas del espacio.

Palabras clave: ARQ; Arquitectura; Teoría Queer; Espacialidad; Decolonialidad

Abstract: The article presents a critical review, based on a comparative-conceptual analysis, aimed at articulating three theoretical frameworks: queer and gender theory, architectural and spatial studies, and intersectional-decolonial approaches. The objective is to analyze how these frameworks relate to one another and what contributions they offer to contemporary architectural thought. The methodology consisted of collecting and systematizing specialized books and articles, organized into a matrix that enabled the identification of patterns, tensions, and gaps. The results show that the intersections between the three frameworks outline an emerging field of critical thought: the queer-spatiality dialogue shifts attention from form to use and embodiment; the spatiality-decolonial intersection makes epistemic hierarchies visible and proposes new pedagogies of design; and the triadic articulations consolidate criteria for situated and ethical practices of inhabiting. The analysis also highlights the growing influence of Latin American scholarship in redefining the discipline from more situated and inclusive perspectives. Overall, the study suggests that architecture can be reimagined as a practice of cultural mediation, one that recognizes identity diversity and affect as constitutive dimensions of space.

Keywords: ARQ; Arquitectura; Teoría Queer; Espacialidad; Decolonialidad

1. Introducción

La disciplina arquitectónica ha sido históricamente configurada desde paradigmas normativos y binarios que han privilegiado la

funcionalidad productiva y el orden social capitalista por encima de la diversidad de experiencias y corporalidades. Esta visión, arraigada en la modernidad, ha tendido a invisibilizar prácticas espaciales disidentes, reproduciendo jerarquías en el entorno construido [1], [2]. La arquitectura, en tanto disciplina y realidad

material, se ha desarrollado bajo estas lógicas, generando un vacío en torno a la inclusión de identidades disidentes y a la problematización de los binarismos que estructuran la vida cotidiana.

En años recientes, distintos campos del conocimiento han tensionado este marco restrictivo. La teoría *queer* y de género han abierto un horizonte crítico para comprender cómo las identidades no normativas desafían los límites disciplinares y resignifican el espacio [3], [4]. Paralelamente, los estudios arquitectónicos y de la espacialidad, particularmente aquellos seleccionados desde una postura crítica hacia la producción social del espacio, han puesto de relieve las apropiaciones, resignificaciones y desigualdades que lo atraviesan [1], [5]. Desde esta perspectiva, se establece un vínculo más claro con enfoques interseccionales y decoloniales, que cuestionan jerarquías epistémicas y lógicas coloniales presentes tanto en la producción de conocimiento como en la práctica proyectual [6], [7].

Sin embargo, estos marcos suelen analizarse de manera aislada. Existen estudios *queer* que problematizan normatividades espaciales [3], investigaciones decoloniales que abordan la ciudad y el territorio [6], y análisis espaciales que examinan procesos de apropiación y exclusión [5]. No obstante, son escasos los trabajos que buscan articularlos en un mismo plano de análisis, especialmente en México, donde la producción académica que cruza abiertamente estos tres enfoques sigue siendo limitada en comparación con lo que ocurre en países de Sudamérica, como Chile o Argentina [8].

En este contexto, la importancia de articular estos marcos radica en cuestionar la idea homogeneizante de la arquitectura contemporánea, especialmente aquella guiada por la lógica del consumo y el capital, donde los entornos habitables se han vuelto cada vez más estandarizados. La diversidad corporal y experiencial aparece entonces como una oportunidad para recuperar la heterogeneidad perdida en muchas ocasiones: observar cómo colectivos disidentes fuera de la norma habitan, adaptan o reconfiguran espacios puede revelar formas alternativas de pensar la identidad, la función y la forma en la arquitectura.

Estudiar estas prácticas permite imaginar una arquitectura que no solo responda a un modelo universal de habitante (blanco, heterosexual, con recursos y perteneciente a una familia nuclear), sino que acoja modos de vida múltiples, cambiantes y en tensión con lo que damos por hecho. En este sentido, los espacios *queer* y trans amplían la mirada hacia la diferencia, problematizando

también el concepto mismo de identidad, mostrando que en el “no tener una identidad fija” también se produce una forma de existencia espacial. La ambigüedad y la mezcla pueden ser formas productivas de conocimiento y, en este caso, de diseño.

La premisa que orienta este trabajo es que el cruce entre teoría *queer* y de género, estudios arquitectónicos y de la espacialidad, y enfoques interseccionales y decoloniales permite identificar tensiones y vacíos en la literatura, y empieza a abrir la disciplina hacia nuevas formas de proyectar y habitar más plurales y conscientes de la diversidad identitaria [7], [9].

Para alcanzar este propósito, el artículo se estructura en cuatro secciones. En primer lugar, se describe la metodología de la revisión crítica y el análisis comparativo-conceptual utilizado para organizar la literatura. En segundo lugar, se presentan los resultados de la revisión divididos en los tres bloques mencionados. Posteriormente, en la discusión, se analizan las articulaciones críticas entre los bloques, considerando tanto las relaciones en pares como la triangulación que los une, y se propone cómo estas articulaciones pueden dialogar con la arquitectura entendida como realidad material. Finalmente, en las conclusiones, se sintetizan los principales aportes de la revisión, sus limitaciones y las líneas futuras de investigación.

2. Materiales y métodos

Este artículo se elaboró a partir de una revisión crítica sistémica de literatura, entendida como un proceso flexible que permite explorar, seleccionar y articular distintos enfoques teóricos con el fin de generar nuevas lecturas sobre la disciplina arquitectónica. La revisión no se planteó como un levantamiento exhaustivo ni como un ejercicio de conteo, sino como un recorrido guiado por una postura crítica hacia las relaciones entre espacio, poder y diversidad.

La búsqueda de fuentes se realizó en distintas etapas. En primer lugar, se recurrió a bases de datos académicas y catálogos universitarios (Scopus, Google Scholar, SciELO, RedALyC, Latindex, CLACSO, TDX, DOAJ, y repositorios institucionales (UAQ/UNAM)) seleccionando textos que problematizan la producción del espacio desde perspectivas *queer*, interseccionales o decoloniales. Paralelamente, el proceso incluyó la revisión de referencias contenidas en los propios textos: al leer un libro o artículo, se exploraban sus bibliografías para localizar nuevas conexiones y autores relevantes. Esta práctica (que en muchos casos amplió el horizonte más allá de lo inicialmente previsto) permitió integrar tanto

textos clásicos de referencia como aportaciones recientes (2020–2025), asegurando un balance entre fundamentos conceptuales y debates actuales. A pesar de lo anterior, la revisión enfrenta limitaciones. La concentración de fuentes en bases de datos académicas deja fuera publicaciones independientes, manifiestos, etc. Esta omisión no solo es técnica, sino epistemológica, pues revela los mecanismos mediante los cuales los discursos son legitimados o invisibilizados

3. Resultados

El material recopilado se organizó en una matriz de sistematización donde cada texto fue clasificado dentro de tres bloques: teoría *queer* y de género, estudios arquitectónicos y de la espacialidad, y enfoques interseccionales y decoloniales. Esta clasificación no es rígida (varios textos habitan más de un bloque), pero permite presentar cada uno de forma introductoria para clarificar su objeto, sus preguntas y sus herramientas.

A diferencia de una revisión bibliográfica tradicional, esta matriz no se limitó a contar fuentes, sino que buscó reconocer los aportes conceptuales que cada bloque ofrece al pensamiento arquitectónico contemporáneo. Más que un registro numérico, el análisis intenta mostrar cómo estos conjuntos de textos desplazan los límites

disciplinares, proponiendo nuevas maneras de leer la relación entre cuerpo, espacio y poder.

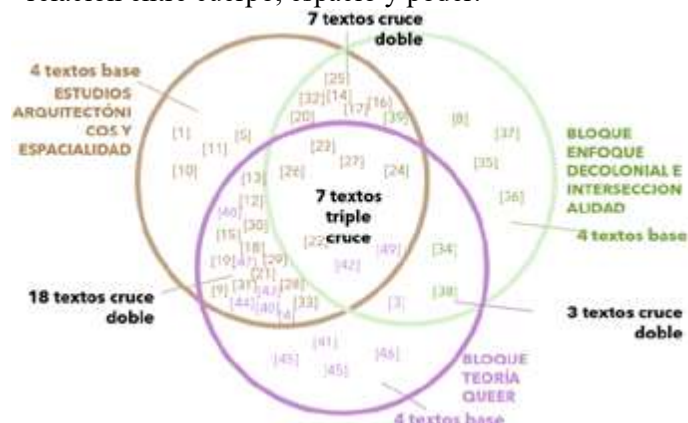


Figura 1. Diagrama de Venn que ilustra la interrelación entre los tres bloques teóricos. Elaboración propia.

Se trata, en ese sentido, de un ejercicio comparativo y articulador más que confrontativo, orientado a reconocer tanto los patrones como los vacíos en la literatura. Esta lectura transversal abre caminos para una discusión crítica sobre la arquitectura y la espacialidad, entendidas como campos donde lo social y lo material se co-producen constantemente.

La Tabla 1 sintetiza los principales aportes conceptuales de cada bloque, señalando su orientación teórica.

Tabla 1. División de textos por bloque y orientación teórica. Elaboración propia.

Bloque	Descripción y énfasis conceptual	Textos	Total
Estudios arquitectónicos y de la espacialidad	Exploran el espacio como producto social y como campo de disputa simbólica y material. Este bloque reúne teorías que entienden la espacialidad desde procesos de apropiación, producción y significación, y que evidencian cómo las configuraciones materiales sostienen o transforman las relaciones de poder.	[1],[5],[9],[10],[11],[12],[13],[14],[15],[16],[17],[18],[19],[20],[21],[22],[23],[24],[25],[26],[27],[28],[29],[30],[31],[32],[33]	27 Textos
Enfoques interseccionales y decoloniales	Cuestionan las jerarquías epistémicas y coloniales que estructuran tanto la disciplina como su enseñanza. Plantean la necesidad de repensar la arquitectura desde conocimientos situados, reconociendo cómo raza, género, clase y territorio configuran modos desiguales de habitar.	[6],[7],[8],[34],[35],[36],[37],[38],[39]	9 textos
Teoría queer y de género	Desestabiliza los límites normativos de la disciplina al incorporar la performatividad del cuerpo y los afectos como dimensiones críticas del espacio. Muestra cómo las identidades no normativas reorientan el uso y el significado de los lugares, visibilizando que toda espacialidad implica una política del cuerpo.	[3],[4],[40],[41],[42],[43],[44],[45],[46],[47],[48],[49]	12 textos

Por su parte, la Figura 1 un diagrama de Venn, ilustra gráficamente las zonas de intersección entre los tres marcos. Esta visualización permite comprender la naturaleza porosa del corpus y anticipa los cruces conceptuales que se desarrollarán más adelante.

A partir de esta organización, los siguientes apartados (3.1, 3.2 y 3.3) describen de manera individual cada bloque teórico, precisando sus fundamentos, alcances y aportes para la arquitectura. Posteriormente, en la sección de discusión, se analizan los puntos de encuentro y las articulaciones que emergen al ponerlos en diálogo.

3.1 Bloque teoría *queer* y de género

¿Qué es lo *queer* y qué es el género?

El término *queer* surge para cuestionar las categorías estables de identidad y las normas que determinan qué cuerpos, deseos y comportamientos se consideran legítimos. Más que una identidad, lo *queer* es una posición crítica frente a la normalización; un modo de pensar y vivir que desarma las fronteras entre lo masculino y lo femenino, lo público y lo privado, lo natural y lo construido. Por su parte, el género se entiende no como una esencia biológica, sino como una construcción social y performativa. Desde esta perspectiva, las disidencias de género (personas trans, no binarias o que simplemente no encajan en las categorías normativas) revelan la fragilidad de ese sistema y abren nuevas posibilidades para pensar el cuerpo y el espacio.

Qué mira.

La teoría *queer* y de género parte de que el cuerpo es performativo y, por tanto, produce espacio: los usos, gestos y trayectorias reiteradas cargan de sentido los lugares y pueden desestabilizar normas.

Cómo lo trabaja.

Traslada nociones como performatividad, orientación y visibilidad/ocultamiento al análisis espacial, enfocándose en los límites, umbrales e interfaces (lo íntimo/público, lo visible/velado). La performatividad, entendida según Butler [3] como el modo en que los actos, gestos y usos cotidianos producen aquello que aparentan expresar, permite reconocer que el cuerpo no solo ocupa el espacio, sino que lo crea mediante sus repeticiones.

Por su parte, la noción de orientación, desarrollada por Ahmed [4], alude a la manera en que los cuerpos se dirigen y se disponen en el mundo, revelando qué lugares los acogen y cuáles los rechazan. Estar “orientado” hacia ciertos objetos, afectos o personas significa también estar desorientado respecto de otros, y esa diferencia se traduce en espacialidades de acceso o exclusión.

Finalmente, los afectos, lejos de entenderse como emociones individuales, se conciben como fuerzas relacionales que circulan entre cuerpos, materiales y ambientes, condicionando cómo se perciben y experimentan los lugares.

En conjunto, estas nociones permiten observar cómo la materialidad y la organización del espacio orientan o restringen cuerpos, trayectorias y formas de vida [47].

¿Para qué puede servir en una disciplina como la arquitectura?

La arquitectura puede leerse como un campo de orientaciones donde la materialidad, la escala y el programa reproducen o cuestionan las normas sociales que regulan el cuerpo. En el ámbito proyectual, estos conceptos invitan a diseñar dispositivos materiales, programáticos o simbólicos que no den por sentadas las formas de uso, sino que abran espacio a la ambigüedad, al encuentro y a lo diverso [49].

El espacio no posee una estética “*queer*” en sí mismo: se vuelve *queer* cuando interrumpe la norma, cuando desacomoda los patrones de habitar y de mirar. Pensar desde esta clave no implica crear una nueva categoría formal, sino asumir la inestabilidad y la diferencia como condiciones constitutivas del diseño.

3.2 Bloque Estudios arquitectónicos y de la espacialidad

¿Qué es la espacialidad?

En los estudios críticos de la arquitectura, la *espacialidad* no se refiere únicamente a la forma física o compositiva de los lugares, sino al conjunto de relaciones sociales, simbólicas y materiales que los producen. Pensar la espacialidad implica reconocer que el espacio no es un fondo neutro donde ocurre la vida, sino un campo de fuerzas, donde se inscriben y disputan significados, jerarquías y afectos. Autores como Lefebvre en [1] y Heidegger en [10], sentaron las bases de esta comprensión, mostrando que cada entorno construido refleja y refuerza el orden social que lo origina.

Qué mira.

Los estudios de la espacialidad observan cómo los espacios se producen y transforman a través de la acción y la interacción humanas. Analizan procesos de apropiación, uso y resignificación, y examinan cómo las configuraciones materiales pueden reproducir desigualdades o habilitar formas alternativas de convivencia.

Cómo lo trabaja.

Este enfoque recurre a conceptos como la producción del espacio, la apropiación y la relacionalidad para explicar que los lugares no existen de manera independiente, se construyen socialmente. Si bien desplaza la mirada más allá de la forma arquitectónica, reconoce que es precisamente en el objeto arquitectónico donde estas relaciones se materializan: en él se inscriben las rutinas cotidianas, las dinámicas de pertenencia y las formas de control o exclusión que configuran la vida social.

Analizar la espacialidad implicaría comprender cómo el espacio habitado traduce y condiciona prácticas y, al mismo tiempo, cómo el diseño arquitectónico puede potenciar o transformar esas dinámicas. De este modo, el interés no se separa del hacer arquitectónico, sino que lo amplía, al considerar que toda decisión formal o programática participa de una red más amplia de relaciones sociales y simbólicas.

3.3 Bloque enfoques interseccionales y decoloniales

¿Qué son la interseccionalidad y la decolonialidad?

La *interseccionalidad*, formulada por Kimberlé Crenshaw en [6], se concibe como una perspectiva analítica y una herramienta conceptual para comprender cómo distintas estructuras de opresión (género, raza, clase, sexualidad, corporalidad) no actúan de manera separada, sino que se entrecruzan y se refuerzan mutuamente. Así, cada experiencia está marcada por múltiples sistemas de poder que se superponen y producen formas específicas de exclusión o privilegio.

La *decolonialidad*, en cambio, se entiende como un enfoque epistemológico y político que busca cuestionar la manera en que se ha construido el conocimiento moderno y sus pretensiones de universalidad. Autores como Mignolo en [8] y Quijano en [35] proponen que la colonialidad no terminó con el colonialismo, sino que persiste en la organización del saber, la economía y la cultura. En arquitectura, esto sería reconocer que gran parte del

pensamiento disciplinar se ha desarrollado desde una perspectiva eurocéntrica, masculina y blanca, que ha marginado otras formas de pensar y habitar el espacio.

Ambos marcos, al entrelazarse, permiten leer la arquitectura y el territorio como espacios atravesados por jerarquías históricas y epistémicas, y abren la posibilidad de construir una práctica más plural, situada y consciente de sus condiciones de producción.

Qué mira.

Este bloque se centra en las formas en que el poder económico, político, racial y de género se inscribe en el espacio. Examina cómo la colonialidad del poder organiza el territorio, define centros y periferias, y determina quién tiene derecho a ocupar o transformar el entorno. También, en ciertos estudios cruzados, observa cómo las desigualdades estructurales se materializan en el acceso a la vivienda, los servicios o la representación simbólica dentro del paisaje urbano.

Cómo lo trabaja.

Recurre a herramientas conceptuales como la desobediencia epistémica [8], las epistemologías del Sur [37] y el diseño pluriversal [7], que proponen reconocer la validez de saberes no hegemónicos y situar la práctica arquitectónica desde contextos locales y experiencias comunitarias.

En lugar de asumir una teoría única, este enfoque busca descentrar el punto de vista disciplinar, incorporando formas diversas de construir, habitar y proyectar. Desde esta perspectiva, la arquitectura puede operar como una práctica de escucha, diálogo y co-diseño, capaz de traducir saberes subalternos y modos de vida no normativos en decisiones espaciales concretas.

¿Para qué sirve en arquitectura?

Estos enfoques invitan a cuestionar desde dónde se diseña y para quién se diseña. Incorporar una mirada interseccional y decolonial permite reconocer que los entornos construidos no son neutrales, sino que reflejan y pueden reproducir las desigualdades sociales. En la práctica proyectual, esto se traduce en la necesidad de generar procesos participativos, diseños relacionales y criterios de justicia espacial que atiendan la diversidad de cuerpos, saberes y territorios.

A nivel pedagógico, estos marcos abren la posibilidad de formar arquitectos más conscientes de su posición, capaces de identificar las estructuras históricas que condicionan su quehacer y de imaginar alternativas desde los márgenes.

3.4 Cruces y distribución del

corpus

A partir de la sistematización del corpus, fue posible observar no solo la especificidad de cada bloque, sino también las zonas de contacto que emergen entre ellos. Estos cruces conceptuales revelan que los límites entre la teoría *queer*, la espacialidad y la decolonialidad son porosos, y que su articulación produce nuevas formas de lectura sobre la arquitectura. Identificar estos puntos de intersección permite dimensionar la riqueza y complejidad del campo, al mostrar cómo distintos enfoques convergen en torno a problemáticas comunes vinculadas al poder, la representación y el habitar.

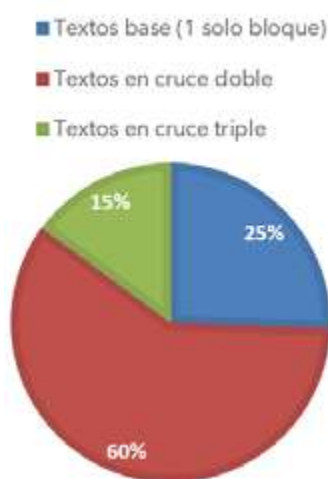


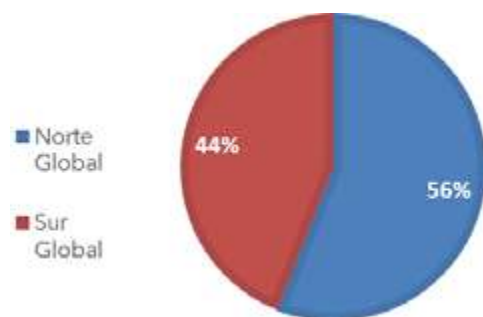
Figura 2. Distribución de los textos según tipo de cruce. El campo opera por articulaciones, no por bloques aislados. Elaboración Propia

La Figura 2 muestra la distribución del corpus según el grado de cruce entre bloques teóricos. Más de la mitad de los textos (59.6 %) articulan dos enfoques simultáneamente, mientras que un 14.9 % aborda explícitamente los tres. Esto confirma que los campos de la teoría *queer*, la espacialidad y la decolonialidad pueden entrelazarse sin tener que operar como áreas aisladas, lo que refuerza la pertinencia del análisis comparativo-conceptual realizado.

Esta tendencia sugiere que resulta metodológicamente más accesible establecer vínculos entre pares (por ejemplo, entre teoría *queer* y espacialidad, o entre decolonialidad e interseccionalidad) que construir un diálogo triádico plenamente integrado. Ello puede explicarse por la naturaleza fragmentaria del campo y por las diferencias epistemológicas entre los marcos.

No obstante, el hecho de que existan textos que alcanzan el cruce triple demuestra la emergencia de un terreno común donde estas perspectivas comienzan a entrelazarse, consolidando la pertinencia del análisis comparativo-conceptual realizado.

La Figura 3 muestra la distribución regional de los textos analizados: el 44 % proviene del Sur Global (principalmente América Latina), mientras que el 56 % se origina en instituciones del Norte Global. Si bien esta proporción mantiene la hegemonía editorial y académica del Norte, evidencia también un desplazamiento paulatino en la geografía del pensamiento arquitectónico crítico. La presencia creciente de producciones latinoamericanas, y en menor medida africanas o asiáticas, señala que las reflexiones sobre género, cuerpo y espacio ya no se generan exclusivamente desde los centros académicos tradicionales, sino desde territorios históricamente relegados en la producción de conocimiento. Este reequilibrio, aunque aún incipiente, plantea un giro epistémico relevante: pensar la arquitectura desde el Sur no implica únicamente diversificar los casos de estudio, sino modificar las condiciones desde las que se interpreta el espacio, incorporando experiencias locales, memorias colectivas y prácticas comunitarias que cuestionan la universalidad de los paradigmas modernos. Así, la composición regional del corpus confirma que la crítica arquitectónica contemporánea se encuentra en un proceso de descentramiento, donde los márgenes comienzan a producir teoría y no solo a ilustrarla. A partir de este mapeo de cruces y procedencias, la sección siguiente examina sus



implicaciones conceptuales y proyectuales.

Figura 3. Distribución de los textos según región (Norte y Sur global). Evidencia descentramiento epistémico en curso. Elaboración propia.

4. Discusión

En la sección anterior se presentaron los tres bloques teóricos que estructuran el corpus de esta revisión. En cada uno se explicó su concepto central, las

herramientas con las que trabaja y su pertinencia dentro de la arquitectura.

A partir de ello, la presente discusión analiza qué sucede al poner en relación estos marcos, es decir, qué tensiones, convergencias y aportes emergen del cruce entre ellos. Estas articulaciones no pretenden construir una teoría unificada, sino revelar los puntos de encuentro que abren nuevas posibilidades para pensar y proyectar la arquitectura desde una mirada crítica, situada y plural.

La Tabla 2 sintetiza estos cruces por pares, destacando los conceptos articuladores más frecuentes que servirán como punto de partida para la interpretación crítica desarrollada en los apartados siguientes.

Tabla 2. Cruces por pares con conteo, referencias representativas y conceptos-puente. Elaboración propia.

Par de bloques	No de textos	Referencias	Conceptos-puente identificados
Teoría queer y de género ↔ Espacialidad/ arquitectura	18	[4], [9], [12], [13], [15], [18], [19], [21], [28], [29], [30], [31], [33], [20], [43], [44], [47],[48]	Performatividad del cuerpo; apropiación espacial; orientación/uso del espacio; resignificación; corporalidad situada
Teoría queer y de género ↔ Interseccional/ decolonial	3	[3], [34], [38]	Conocimiento situado; frontera; multiplicidad de ejes de opresión; colonialidad del género
Espacialidad/ arquitectura ↔ Interseccional/ decolonial	7	[14], [16],[17], [20], [25], [32], [39]	Colonialidad del espacio; lugar/marginalidad; pedagogía y contexto; jerarquías territoriales; pluriversalidad

4.1 Cruce Teoría *queer* y de género con Estudios arquitectónicos y de la espacialidad

Este cruce, el más nutrido del corpus con 18 textos según la, muestra cómo los estudios *queer*, al dialogar con la noción de espacialidad, desplazan la comprensión del espacio desde su forma hacia sus usos. Más que definir nuevas tipologías, estas perspectivas nos enseñan que el cuerpo, sus trayectorias y sus gestos cotidianos producen arquitecturas efímeras que cuestionan las normas disciplinares.

La *espacialidad queer* redefine y pone el foco en nociones como límite, privacidad y visibilidad. En este marco, la performatividad del cuerpo, planteada por Butler [3] y desarrollada en arquitectura por autoras como Bonnevier [12] o Betsky [40], permite entender que cada acto de uso es también un acto de rediseño, una reconfiguración constante del espacio. De este modo, la arquitectura ya no es concebida como objeto cerrado, se asume como proceso relacional y performativo, donde los cuerpos se vuelven agentes proyectuales que modifican la forma y el habitar.

Estas ideas se concretan en estudios que abordan la *queerificación* de espacios cotidianos como viviendas, baños o bares, mostrando cómo los cuerpos disidentes producen nuevas narrativas espaciales al reapropiar lo que se les niega [41 - 42] y [44]. En conjunto, este cruce revela que la arquitectura condiciona las prácticas del cuerpo, y puede ser transformada por ellas, abriendo un horizonte donde el diseño se concibe como un acto vivo y situado.

Operativamente, esto se traduce en criterios de proyecto que habilitan variación de usos (programas no fijados), umbrales modulables (entre lo íntimo/público) y dispositivos de visibilidad/ocultamiento que reconozcan trayectorias corporales no normativas.

4.2 Cruce Teoría *queer* y de género con enfoque Interseccional y Decolonial

Aunque menos numeroso (Tabla 2), este cruce constituye la base epistemológica del campo. Si bien la mayoría de los textos seleccionados no abordan directamente la arquitectura o el espacio construido, sí permiten comprender las raíces compartidas entre la teoría *queer*, la interseccionalidad y la decolonialidad, en tanto perspectivas críticas que cuestionan las jerarquías heredadas del pensamiento moderno y colonial.

La teoría *queer*, desde su origen, comparte con los enfoques decoloniales la crítica a las estructuras dicotómicas del conocimiento occidental (hombre/mujer, naturaleza/cultura, razón/emoción, cuerpo/mente) que organizan tanto las identidades como las prácticas sociales. Butler, en [3], y Crenshaw, en [6],

muestran cómo género, raza y clase actúan de manera entrelazada en la producción de subjetividades y desigualdades. Por su parte, Haraway, en [34], propone superar esas divisiones a través de lo híbrido y lo interdependiente, mientras que Mendoza en [38] lleva esta discusión al terreno del pensamiento situado latinoamericano, preguntándose si los sujetos subalternos pueden salvarnos desde sus propias epistemologías.

En conjunto, estos textos señalan que las normas de género y sexualidad son tecnologías de poder heredadas del colonialismo, que no solo organizan los cuerpos sino también las formas de conocer y habitar el mundo. La teoría *queer*, al entrelazarse con los marcos interseccional y decolonial, amplía su alcance político y epistémico, al reconocer que las luchas por la identidad no pueden desvincularse de las luchas contra la colonialidad y el racismo estructural.

Desde esta convergencia, lo *queer* adquiere una dimensión de desobediencia epistémica [8]: un gesto de resistencia frente a los sistemas de saber que dictan qué vidas, qué cuerpos y qué territorios merecen ser reconocidos. Esta forma de pensamiento se sitúa desde los márgenes y propone una metodología que valora el conocimiento encarnado, las memorias espaciales subalternas y las narrativas que surgen fuera de los centros de poder.

En arquitectura, este cruce no traduce aún los conceptos al espacio material, pero prepara el terreno para hacerlo. Al cuestionar quién produce el conocimiento arquitectónico y desde qué cuerpos o experiencias, abre la posibilidad de una práctica crítica que piense el diseño como un acto de traducción entre saberes marginados y formas materiales. Así, más que representar identidades disidentes, se trata de intervenir las condiciones epistemológicas y simbólicas que determinan quién puede habitar, cómo y desde dónde.

4.3 Cruce Estudios arquitectónicos y de la espacialidad con enfoque Interseccional y Decolonial

Este cruce muestra que las desigualdades espaciales no se expresan únicamente en la forma o en la distribución física, también en los modos de producir, habitar y legitimar el conocimiento arquitectónico. Más que una crítica abstracta, esta lectura se traduce en prácticas proyectuales y

pedagógicas que buscan dismantelar jerarquías de saber y abrir la disciplina a epistemologías situadas.

Autores como Mignolo en [8] y De Sousa Santos en [37] cuestionan la idea de una modernidad universal y proponen reconocer la multiplicidad de conocimientos localizados. En arquitectura, esto implica aceptar que las formas de construir, enseñar y habitar del Sur Global no son derivaciones periféricas del canon, sino saberes autónomos que pueden redefinir la práctica proyectual. Ejemplos como [17] que analiza las *Escuelas de Artes Plásticas* de Ricardo Porro en Cuba y cómo fueron leídas desde un canon eurocentrado, revelan que incluso las arquitecturas producidas desde la subalternidad pueden ser deslegitimadas cuando no responden a los parámetros del Norte Global. Esta observación interpela directamente al quehacer arquitectónico latinoamericano, obligándolo a reconocer su posición geopolítica en la producción de conocimiento.

De forma complementaria, en [14], Shields propone la noción de *topologías culturales*, entendiendo el espacio como una red de significados sociales donde se inscriben valores, memorias y prácticas. Esta lectura, al conectarse con los enfoques decoloniales, permite pensar cómo las relaciones de poder se materializan en la cultura y el territorio, y cómo pueden ser subvertidas mediante usos y apropiaciones alternativas. En sintonía, en la tesis de Padilla [25], se introduce la idea del *lugar como espacio moral*, subrayando que cada configuración espacial conlleva decisiones éticas que definen quién puede ocuparlo y bajo qué condiciones.

Otros aportes como [20] plantean una arquitectura que incorpore la interseccionalidad como marco operativo, es decir, no solo como análisis social, sino como principio de diseño que reconozca la diversidad de cuerpos y experiencias. En [32], por su parte, se propone el concepto de *Espacios de posibilidad radical*, donde el diseño se concibe como práctica que surge desde y para la interseccionalidad, abriendo un horizonte de transformación material y simbólica.

En conjunto, estos textos articulan una comprensión del espacio como construcción cultural y política. La espacialidad crítica reconoce que el entorno no solo refleja desigualdades, sino que las produce y puede reconfigurarlas. Por ello, el diseño, la enseñanza y la investigación se vuelven herramientas de redistribución epistémica, capaces de incorporar saberes locales, perspectivas feministas y experiencias subalternas

4.4 Cruce triádico

La articulación de los tres bloques amplía el horizonte crítico de la arquitectura: lo *queer* visibiliza las normas de género y sexualidad; lo interseccional-decolonial sitúa esas normas dentro de jerarquías

históricas y globales, y la espacialidad muestra su inscripción material.

Los siete textos triádicos (Tabla 2) comparten una vocación situada que desplaza el foco desde los objetos y tipologías hacia los regímenes, prácticas y materialidades donde género, colonialidad y espacio se co-constituyen.

Aunque sus aproximaciones son diversas, todos comparten la voluntad de pensar la arquitectura como práctica crítica, donde lo corporal, lo simbólico y lo territorial se entrelazan.

En el texto [27], se aborda el espacio doméstico como sistema de cuidados que desafía la cis-heteronormatividad y la familia nuclear. Desde Chile, propone una lectura interseccional y feminista que resignifica el habitar cotidiano como práctica política.

La tesis [22], amplía este horizonte al analizar cómo las experiencias de exclusión espacial producen nuevas formas de inclusión y redefinen la noción de lo público.

Por su parte, la tesis [23], materializa estas ideas en un proyecto arquitectónico que incorpora la corporalidad, la memoria y el deseo como motores de diseño, integrando así los tres enfoques desde una práctica situada en el Sur Global.

Otros textos, como [26] y [32], muestran cómo desde el Norte Global comienzan a emerger discursos que dialogan con la mirada del Sur: ambos proponen una ética del cuidado y una apertura hacia formas de habitar interdependientes, desafiando la neutralidad disciplinar.

En esa misma línea, el texto [42] de Betsky, revisita su obra de 1997 [40] reconociendo las limitaciones de su análisis original, centrado en la experiencia masculina gay, para incorporar ahora perspectivas interseccionales de raza, clase y género.

Finalmente [49] introduce la noción de “pensar desde los márgenes” como ejercicio de desplazamiento epistemológico, donde la crítica *queer* y decolonial convergen para repensar los modos de proyectar.

En conjunto, estos trabajos evidencian que la triada no busca integrar perspectivas de manera armónica, sino asumir sus fricciones como condición productiva del pensamiento arquitectónico.

En el contexto latinoamericano, esta articulación adquiere una relevancia particular al poner en diálogo marcos teóricos globales con realidades marcadas por desigualdad y violencia estructural.

5. Conclusiones

Esta revisión crítica permitió articular tres marcos que, si bien suelen estudiarse por separado, convergen en una preocupación común: la forma en que el espacio refleja, sostiene y puede transformar las estructuras de poder. La teoría *queer* y de género aporta herramientas para desnaturalizar la norma y pensar el cuerpo como agente espacial; los enfoques interseccionales y decoloniales amplían esa mirada al situar el espacio dentro de jerarquías históricas y globales; y los estudios de la espacialidad ofrecen las claves conceptuales para entender cómo estas desigualdades se inscriben materialmente en la arquitectura.

El análisis comparativo-conceptual de los textos mostró que los cruces entre estos marcos no solo enriquecen la reflexión teórica, sino que también trazan un campo emergente de pensamiento arquitectónico crítico. Los aportes provenientes del Sur Global, en especial de América Latina, revelan un desplazamiento hacia epistemologías situadas, donde la práctica arquitectónica se concibe como herramienta de resistencia y resignificación. Estas aproximaciones desafían los límites disciplinares tradicionales y plantean la posibilidad de una arquitectura que piense desde las diferencias, y no a pesar de ellas.

Metodológicamente, el uso de una matriz de sistematización permitió visualizar la densidad de los cruces conceptuales y reconocer a ciertos autores como puentes entre paradigmas. Al mismo tiempo, con las matrices conceptuales se corre el riesgo de cristalizar categorías que en la práctica son móviles y contingentes. Las fronteras entre enfoques no siempre son claras; en ocasiones se superponen o contradicen, lo que exige lecturas flexibles, no generalizables y atentas a la especificidad de cada caso. Este tipo de análisis evidencia que el conocimiento arquitectónico puede generarse no solo desde la práctica proyectual, sino también desde el cruce de discursos críticos y experiencias diversas.

En conjunto, los hallazgos sugieren que el pensamiento arquitectónico contemporáneo se encuentra en un punto de inflexión: abandonar la pretensión de universalidad para abrirse a una multiplicidad de modos de habitar. Comprender la arquitectura desde esta perspectiva implica reconocer que toda espacialidad es política, y que cada espacio (material o simbólico) encarna decisiones sobre quién puede ocuparlo y cómo. Desde esta conciencia, la arquitectura puede pensarse no solo como disciplina técnica, sino como práctica ética y cultural

comprometida con la diversidad identitaria y la justicia espacial.

A nivel docente, el estudio sugiere currículos y ejercicios de taller que incorporen indagaciones situadas (cuerpo-espacio, memorias locales, co-diseño). En el proceso proyectual, orienta protocolos de escucha y validación de saberes no hegemónicos, y métodos de iteración con usuarios/as diversos. En el proyecto, propone criterios: (a) flexibilidad programática (espacios con más de un modo válido de uso), (b) dispositivos de ambigüedad (límite, visibilidad/ocultamiento, reconfiguración temporal), y (c) diseño del cuidado (accesos, mantenimiento, seguridad afectiva) como parte del desempeño arquitectónico. Estos desplazamientos convierten la arquitectura en una práctica ética y situada, capaz de redistribuir agencia y sentido en el habitar.

Futuras líneas de investigación podrían profundizar en la dimensión proyectual de estas articulaciones, explorando cómo los criterios de diseño pueden incorporar nociones de performatividad, interdependencia y desobediencia epistémica dentro de los procesos de creación arquitectónica. Esta apertura invita a pensar la arquitectura no solo como una práctica de representación, sino como un ejercicio crítico de traducción entre cuerpos, saberes y espacios. En esa dirección, los principios derivados de los estudios *queer*, interseccionales y decoloniales pueden orientar nuevas metodologías proyectuales que cuestionen las jerarquías disciplinares y propicien modos de habitar más flexibles, éticos y expansivos.

Fuentes de financiamiento

Los autores agradecen a la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI) por el apoyo brindado para la realización de este trabajo.

Agradecimientos

Durante la preparación de este manuscrito, se utilizó la herramienta de ChatGPT (GPT-5) con el propósito de apoyo en la revisión de ortografía y coherencia textual. Los autores han revisado y editado el contenido generado y asumen plena responsabilidad por el contenido de esta publicación.

Conflictos de interés

Los autores declaran que no existen conflictos de interés.

Los financiadores no tuvieron participación en el diseño del estudio; en la recolección, análisis o interpretación de los datos; en la redacción del manuscrito; ni en la decisión de publicar los resultados.

6. Referencias bibliográficas

- [1] H. Lefebvre, *La producción del espacio*. Madrid: Capitán Swing, 2013 (orig. 1974).
- [2] P. Bourdieu, *La distinción*. Madrid: Taurus, 1988.
- [3] J. Butler, *Cuerpos que importan*. Buenos Aires: Paidós, 2002 (orig. 1993).
- [4] S. Ahmed, *What's the Use? On the Uses of Use*. Durham: Duke University Press, 2019.
- [5] T. Vidal and E. Pol, "La apropiación del espacio: una propuesta teórica para la psicología ambiental," *Revista de Psicología Social*, vol. 20, no. 1, pp. 5–20, 2005.
- [6] K. Crenshaw, "Mapping the Margins: Intersectionality, Identity Politics, and Violence against Women of Color," in *The Public Nature of Private Violence*, M. A. Fineman and R. Mykitiuk, Eds. New York: Routledge, 1994, pp. 93–118.
- [7] A. Escobar, *Designs for the Pluriverse: Radical Interdependence, Autonomy, and the Making of Worlds*. Durham: Duke University Press, 2018.
- [8] W. Mignolo, *Desobediencia epistémica: Retórica de la modernidad, lógica de la colonialidad y gramática de la descolonialidad*. Buenos Aires: Ediciones del Signo, 2010.
- [9] L. Kern, *Feminist City: A Field Guide*. Toronto: Between the Lines, 2019.
- [10] M. Heidegger, "Construir, habitar, pensar," en *Conferencias y artículos*, trad. E. Barjau. Barcelona: Ediciones del Serbal, 1994, pp. 121–139.
- [11] G. Bachelard, *La poétique de l'espace*. Paris: Presses Universitaires de France, 1957.
- [12] K. Bonnevier, *Behind Straight Curtains: Towards a Queer Feminist Theory of Architecture*. Gothenburg, Suecia: Acta Universitatis Gothoburgensis, 2007.
- [13] B. Benedicto, "Queer space in the ruins of dictatorship architecture," *Gender, Place & Culture*, vol. 21, no. 3, Duke University Press, EE.UU. 2014.
- [14] R. Shields, *Spatial Questions: Cultural Topologies and Social Spatialisations*. Inglaterra: Sage Publications, 2013.
- [15] F. Quesada López, *Arquitecturas del devenir: Ensayos sobre la performatividad del espacio*. Madrid, España: Ediciones Asimétricas, 2014.
- [16] J. Caballero Galván, "Los criterios de diseño arquitectónico de la vivienda moderna desde la

- perspectiva de género”, México, *Debate Feminista*, vol. 51, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.df.2016.03.002>
- [17] Y. Farrés Delgado, “Arquitectura y decolonialidad: algunas ideas sobre la Escuela de Artes Plásticas de Ricardo Porro,” *Aisthesis*, no. 60, Bogotá, Colombia, dic. 2016.
- [18] S. Salazar Barrón, “La ciudad y el género: la producción urbana del espacio heterosexual,” *Bitácora Arquitectura*, no. 33, pp. 98–103, 2016.
- [19] G. Barton y H. Harriss, “Gendered, Non-Gendered, Re-Gendered Tools for Spatial Production,” *Architecture and Culture*, vol. 5, no. 3, pp. 475–485, 2017. <https://doi.org/10.1080/20507828.2017.1383796>
- [20] L. Bachman y C. Bachman, “Intersectionality, oppression, and opportunity in architecture: Claiming the social complex,” en *ARCC 2017: Architecture of Complexity*, sesión 1A, Houston, TX, 2017.
- [21] T. Gough, “Trans-architecture,” *Footprint*, vol. 11, no. 2, 2017. <https://doi.org/10.7480/footprint.11.2.1901>
- [22] D. K. Padilla Herrera, *Los espacios otros en las ciudades latinoamericanas: Redefinición de la inclusión desde la exclusión espacial*. Monterrey, México: Universidad Autónoma de Nuevo León, 2019.
- [23] C. Bañados Bay-Schmith, *Rosa: espacio para el desarrollo de las artes y la identidad cuir*. Universidad de Chile, Facultad de Arquitectura y Urbanismo, 2020.
- [24] B. Q. Son, “Twelve Tableaux: Tales of a Queer Architecture,” *Safe Space Zine*, no. 6, 2021.
- [25] D. K. Padilla-Herrera, “¿El lugar como espacio moral? Reflexiones sobre los usos en arquitectura y el espacio público,” *Revista de Arquitectura (Bogotá)*, vol. 24, no. 1, pp. 24–32, 2022. <https://doi.org/10.14718/RevArq.2022.24.1.3244>
- [26] M. Anderson y S. Saeidi, “A Manifesto for Kind Architecture,” *Safe Space Zine*, no. 6, Noruega 2021.
- [27] F. Barthou, *Domesticidad subversiva: (re)pensar el espacio doméstico*. Santiago, Chile: Pontificia Universidad Católica de Chile, 2022.
- [28] P. Brandolini Robertone, “Diseñando torcido / Designing askew: Aproximaciones queer a la arquitectura y el diseño,” en *Las políticas de la planta / The Politics of the Plan*, Eje 1, Argentina, 2022
- [29] S. Marchant, “Vestir, revestir, travestir / Dressing, coating, cross-dressing,” *ARQ (Santiago)*, no. 112, Chile, 2022.
- [30] M. Moreno, “Construir espacios urbanos desde las geografías de género y de las sexualidades,” *GeoGraphos*, vol. 14, Argentina, 2023. <https://doi.org/10.14198/GEOGRA2023.14.1.07>
- [31] R. Acuña-Delgado, R. M. Guerrero-Valdebenito, M. Alarcón-Rodríguez y M. A. Delpino-Chamy, “Tensiones en las formas de habitar de disidencias sexuales y de género en el espacio público del centro urbano de Concepción,” *Revista RU*, vol. 26, no. 48, pp. 42–55, Chile, 2023. <https://doi.org/10.22320/07183607.2023.26.48.04>
- [32] A. Ziaee, “Spaces of Radical Possibility: Designing for and from Intersectionality,” *Trends in Higher Education*, vol. 3, no. 4, pp. 1109–1120, 2024, doi:10.3390/higheredu3040065. <https://doi.org/10.3390/higheredu3040065>
- [33] D. Maldonado, “Ciudades y pornoespacio. Reflexiones teóricas sobre urbanismo alternativo,” en *TRANSHUMANO. Consecuencias humanas de una revolución tecnológica*, Labýrinthos Editores, 2024.
- [34] D. J. Haraway, “A Cyborg Manifesto: Science, Technology, and Socialist-Feminism in the Late Twentieth Century,” en *Simians, Cyborgs and Women: The Reinvention of Nature*. New York: Routledge, 1991.
- [35] A. Quijano, “Colonialidad y modernidad/racionalidad,” en *Los conquistados: 1492 y la población indígena de las Américas*, H. Bonilla, Ed. Quito, Ecuador: FLACSO, 1992.
- [36] R. Grosfoguel, “Transmodernity, Border Thinking, and Global Coloniality,” *Review (Fernand Braudel Center)*, vol. 29, no. 2, pp. 167–187, 2006.
- [37] B. de Sousa Santos, *Introducción: las epistemologías del Sur*. Buenos Aires / Coimbra: CLACSO / Centro de Estudos Sociais, 2011.
- [38] B. Mendoza, “Can the subaltern save us?,” *Tapuya: Latin American Science, Technology and Society*, vol. 1, no. 1, pp. 109–122, 2018. <https://doi.org/10.1080/25729861.2018.1551462>
- [39] C. Ortiz, P. Tavlou, M. Siqueira y G. Testori, “Decolonising urban knowledge(s): An ordinary imperative in extraordinary times,” *City*, vol. 29, no. 2, pp. 1–17, 2025. <https://doi.org/10.1080/13604813.2025.2470540>
- [40] A. Betsky, *Queer Space: Architecture and Same-Sex Desire*. New York, NY: William Morrow & Co., 1997.
- [41] L. Crawford, *Transgender Architectonics: The Shape of Change in Modernist Space*. Londres, Inglaterra: Routledge, 2016.

- [42] A. Betsky, "Queer Space Revisited," *Footprint*, vol. 11, no. 2, pp. 61–68, 2017. doi: 10.7480/footprint.11.2.1899
- [43] A. Holder, "Five Points Toward a Queer Architecture; Or, Notes on 'Mario Banana No. 1'," *Log*, no. 41, EE. UU., 2017.
- [44] J. Sanders, "From Stud to Stalled! Architecture In Transition," *Log*, no. 41, pp. 145–154, EE. UU., 2017.
- [45] X. Kokoula, "Opening up Bodyspace: Perspectives from Posthuman and Feminist Theory," *Footprint*, vol. 11, no. 2, 2017.
- [46] S. Ahmed, *Queer Phenomenology: Orientations, Objects, Others*. Durham, NC: Duke University Press, 2006.
- [47] J. A. Díaz Hernández, "Cuerpos, signos y espacios: sobre la arquitectura panóptica de la segregación urinaria," *RELIES: Revista del Laboratorio Iberoamericano para el Estudio Sociohistórico de las Sexualidades*, no. 3, pp. 5–30, México, 2020.
- [48] D. R. Islas Vela, "La Geografía Queer o Geografía Contrasexual: de las corporeidades a la queerificación. El proceso de queerificación de la Zona Rosa en la Ciudad de México," en *Espacios, géneros y sexualidades. Reflexiones feministas de las diferencias espaciales*, P. Soto, Coord. México: Universidad Autónoma Metropolitana, 2020.
- [49] M. Cordier-Jouanne, "Queer(ing) Architecture: Architectural Thinking from the Margins," *Safe Space Zine*, no. 6, Noruega, 2021.

Microbiological evaluation of polyvinyl alcohol nanofibers with urea for controlled nitrogen release

Margarita G., Garcia-Barajas¹, Juan de Dios, Galindo-De-La-Rosa¹, Claudia E. Perez-Garcia², Angélica, Feregrino-Perez¹, Alejandra, Álvarez-López¹, Vanesa, Vallejo-Becerra¹

¹ División de Investigación y Posgrados, Facultad. de Ingeniería, Universidad Autónoma de Querétaro, Querétaro, Qro., México C.P. 76010

² Facultad. de química, Universidad Autónoma de Querétaro, Querétaro, Qro., México C.P. 76010

Abstract: The development of biodegradable polymeric materials capable of releasing nutrients in a controlled manner represents a key strategy for advancing sustainable agriculture. This study evaluates the structural and microbiological properties of polyvinyl alcohol (PVA) fibers loaded with urea. The fibers with a 0.09 g urea loading exhibited a slightly higher density compared to those with 0.36 g, while the average diameter of pure PVA fibers (161.4 nm) decreased to 124.6 nm and 95.4 nm with the incorporation of 0.09 g and 0.36 g of urea, respectively. These reductions are attributed to an increase in the electrical conductivity of the solutions with higher ionic content, which promotes greater jet stretching during the electrospinning process. The infrared spectroscopy (FTIR) analysis revealed a non-characteristic amide band, suggesting the formation of chemical bonds between the functional groups of PVA and urea. Microbiological tests performed on bacteriological agar showed no inhibition halos, confirming the microbiological compatibility of the material. Overall, these findings demonstrate that PVA–urea nanofibers do not negatively affect the microbiota and are promising for agricultural applications as controlled-release nitrogen fertilizers, contributing to greater nutrient-use efficiency and reduced environmental impact.

Keywords: NAN, nanofibers, polyvinyl alcohol, antibacterial effect, urea, controlled release

1. Introduction

The development of biodegradable polymeric materials capable of releasing nutrients in a controlled manner represents one of the most promising strategies for sustainable agriculture. In this context, electrospun nanofibers have emerged as advanced encapsulation systems thanks to their high surface area, porosity, and adjustable morphology, which allow modulation of the release kinetics of active compounds and improvement in fertilizer-use efficiency [1].

Unlike conventional coatings, nanofibrous systems offer sustained nutrient release and greater interaction with the environment, reducing losses due to leaching or volatilization. Their production through electrospinning enables the combination of natural and synthetic polymers, generating biodegradable matrices capable of

transporting organic molecules, ions, or even beneficial microorganisms, thereby expanding their usefulness in agricultural and environmental applications [2].

Among the most studied synthetic polymers is PVA, due to its biocompatibility, controllable solubility, and ease of processing. PVA allows the fabrication of stable nanofibers with good mechanical integrity and the capacity to incorporate nitrogenous agents such as urea, achieving slow and sustained release systems. Recent studies have demonstrated that the addition of urea modifies the structure of PVA, affecting the swelling, porosity, and degradability of the material [3][5]. These properties make it an ideal candidate for the design of smart fertilizers capable of gradually releasing nitrogen and reducing the environmental impact associated with the excessive use of conventional fertilizers [6].

However, the increasing use of nanomaterials

in agriculture raises questions about their interaction with soil ecosystems. Polymeric nanocomposites introduced into the soil can modify microbial structure, alter biogeochemical processes, and affect the natural balance of the nitrogen and carbon cycles [7][8]. It has been documented that metallic or polymeric nanomaterials can induce the generation of reactive oxygen species, cause oxidative stress, and decrease soil microbial diversity—especially in nitrogen-fixing bacteria and mycorrhizal fungi [9][8]. Silver nanoparticles or metal oxides have shown harmful effects on bacterial communities, reducing the abundance of beneficial genera such as *Bacillus* and *Pseudomonas*, and even promoting the proliferation of phytopathogenic microorganisms [10]. Such alterations can have consequences for soil fertility and the functioning of agricultural ecosystems [8].

The effects of polymeric nanofibers on soil microbiota are still poorly understood. Although biomedical studies have shown that PVA fibers modified with metal nanoparticles exhibit strong bactericidal activity against *Escherichia coli* and *Staphylococcus aureus* [1][2], such properties-beneficial in clinical contexts could be counterproductive in agricultural soils, where microbial diversity is essential for mineralization and nutrient recycling. For example, Kyuchyuk et al. [2] observed that electrospun polyester/PEO fibers containing quinoline compounds inhibited both phytopathogenic and beneficial microorganisms, demonstrating that even biocompatible materials can alter microbial communities of agricultural importance.

Likewise, studies on the release of nanomaterials into soils suggest that, although some polymers are biodegradable, their incomplete degradation or subproducts can modify parameters such as pH, nutrient availability, and microbial structure, thus compromising ecological stability [7][9].

Since soil microorganisms act as mediators in decomposition and fertility processes, assessing the microbiological compatibility of new materials is essential to ensure the safety of their agricultural use.

Therefore, the potential impact of PVA-urea nanofibers on microbiota represents a crucial line of research to determine whether the application of these materials as controlled-release fertilizers is harmless or, conversely, alters processes such as nitrification,

biological nitrogen fixation, or organic matter decomposition [10].

In this context, the present work proposes experimental evaluation of the possible antimicrobial effect of PVA nanofibers containing urea at concentrations of 0.09 g and 0.36 g, obtained by electrospinning. The fibers will be placed on solid media with bacteriological agar inoculated with environmental microorganisms, observing the formation of inhibition zones or changes in bacterial growth. The main objective is to determine the microbiological compatibility and environmental safety of PVA-urea nanofibers as controlled nitrogen-release systems, providing scientific information that enables their responsible implementation within sustainable agriculture and smart fertilization strategies.

2. Materials and Methods

Fabrication of Urea-Loaded PVA Nanofibers

Polyvinyl alcohol nanofibers were fabricated from an aqueous polymer solution containing 10% (w/v) PVA, prepared by dissolving 0.09 g and 0.36 g of urea, respectively, into the PVA solution. The electrospinning process was performed at an applied voltage of 20 kV with a constant feed rate of 900 $\mu\text{L h}^{-1}$, ensuring the formation of uniform, continuous nanofibers suitable for subsequent characterization and microbiological evaluation. The 0.36 g urea concentration used in the fibers corresponds to the optimal urea amount required for 80 cm^2 of soil. Reducing this concentration to one-fourth of the original value aims to achieve a more efficient use of nitrogen, minimizing excess fertilizer while maintaining adequate nutrient availability for plants. For the fiber formation, an Inovenso NanoSpinner 24 — Multinozzle Electrospinning Machine was used.

Scanning electron microscopy (SEM)

For the morphological characterization of the fibers, a scanning electron microscopy (SEM) analysis was performed to confirm the uniformity and surface structure of the material. The observations were carried out using a Hitachi SU8230 ultra-high-resolution cold field emission scanning electron microscope.

Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR)

The chemical characterization of the nanofibers was carried out using Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR) in order to identify the functional groups present and to confirm the presence of urea within the nanofibers.

The spectra were obtained using a PerkinElmer Spectrum

Two FTIR spectrophotometer, in the range of 4000 to 400 cm^{-1} . The samples were analyzed in the form of a thin film.

Diameter distribution and average size.

A total of 25 randomly selected fibers were evaluated at a 2 μm scale and analyzed using **ImageJ** software to determine their average diameters and distribution.

Microbiological assays

5 g of peat moss were weighed and mixed with 20 mL of distilled water to obtain the microbial inoculum. Bacteriological agar was used as the culture medium for plate inoculation.

The PVA membranes were cut into 6 mm diameter discs and placed on the surface of the culture medium. Three concentrations of urea-loaded PVA nanofibers (0.036 g and 0.09 g) were evaluated. For the first concentration, four discs per plate were placed; for the second, four discs arranged in three layers each; and for the third, four discs arranged in five layers.

Subsequently, 500 μL of the inoculum were added to each plate, which were then incubated for 48 hours at 37 $^{\circ}\text{C}$.

Effect on colony-forming bacterial growth.

Bacteria were quantified by counting colony-forming units (CFU) at the third dilution. A volume of 500 μL of the prepared microbial inoculum was plated in triplicate using the previously tested concentrations to determine whether any alteration in microbial growth occurred.

The plates were incubated for 48 hours, after which the developed bacterial colonies were counted.

Statistical analysis.

The average and standard deviations of each treatment were calculated, and a multiple comparison test of Tukey was subsequently performed to determine significant differences among treatments.

3. Results

Urea-Loaded PVA Nanofibers

The synthesis of PVA fibers resulted in thin white

films with an apparently uniform surface, as shown in Figure 1.



Figure 1. Electrospun PVA nanofibers obtained from a 10% (w/v) solution under an applied voltage of 20 kV and a feed rate of 900 $\mu\text{L h}^{-1}$.

Table 1 presents the measurements of thickness and density of the obtained fibers. The thickness did not show significant variations among the different urea loadings; however, slight differences were observed in density, which corresponds to the relationship between mass and volume. Considering that the volume remained relatively constant for both formulations, the determining variable was the mass.

The decrease observed in fiber density can be attributed to an increase in the electrical conductivity of the solution caused by the higher urea concentration. This rise in conductivity generates more free charges within the fluid under the applied electric field, increasing the surface charge density at the needle tip. Consequently, the electrostatic force acting on the jet becomes stronger, leading to greater stretching of the material during the electrospinning process.

As a result, the fibers are distributed more extensively over the collector plate, allowing the material to cover a larger area and form thinner films.

Table 1. Thickness and density parameters of electrospun PVA/urea nanofiber films.

	Thickness		Density	
	Average (mm)	standard deviation	Average (mg/mm ³)	standard deviation
0.09 Urea/PVA	0.0066	0.00055	0.3789	0.1306
0.36 Urea/PVA	0.0063	0.0055	0.3789	0.1132

Scanning electron microscopy (SEM)

The scanning electron microscopy (SEM) micrographs and the corresponding diameter distribution histograms (Fig. 2) show that the electrospun fibers. The PVA fibers presented average diameters ranging between 100 and 200 nm, whereas the urea-loaded fibers (0.09 g and 0.36 g) exhibited a notable reduction in diameter, with a substantial proportion of fibers below 100 nm.

Table 2 presents the average fiber diameter values obtained for each electrospun nanofiber formulation. A clear trend is observed in which the fiber diameter decreases as the urea concentration incorporated into the PVA matrix increases. This behavior confirms the modulatory effect of urea on the morphological properties of materials, particularly its influence on fiber fineness.

Table 2. Average diameter of electrospun PVA and PVA/urea nanofibers obtained at different urea concentrations.

PVA (nm)	0.09 Urea/PVA (nm)	0.36 Urea/PVA (nm)
161.4	124.6	95.44

The decrease in fiber diameter with increasing urea concentration can be associated with stronger molecular interactions between the hydroxyl (–OH) groups of PVA and the amide (–NH₂) groups of urea, promoting better polymer chain alignment during

electrospinning [11]. This results in thinner fibers, whose surface characteristics may have biologically relevant implications.

Nanofibers with diameters below 100 nm possess an exceptionally high surface-area-to-volume ratio, which enhances their potential to interact with microorganisms, enzymes, and soil compounds. At this scale, minor variations in surface chemistry can influence bacterial adhesion, nutrient diffusion, and biodegradation processes. Recent studies have suggested that the nanoscale structuring of polymeric materials can affect microbial activity by providing more reactive surfaces or by altering the local availability of water and nutrient factors that are crucial for maintaining soil microbiome stability [12].

In the present study, the formulation containing 0.36 g of urea produced the thinnest fibers, most of which measured below 100 nm, potentially enhancing physical and chemical interactions with soil microorganisms. This finding suggests that nanoscale dimensions may not only influence the structural properties of the material but also their interface with living systems, emphasizing the importance of evaluating the microbiological compatibility of these nanofibers before their agricultural application.

Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR)

The FTIR spectra of the PVA nanofibers and PVA/urea composites (Fig. 3) show the characteristic vibrational bands of both components, confirming the successful incorporation of urea into the polymeric matrix. The blue dotted lines correspond to the typical bands of urea, located around 1680 cm⁻¹ (C=O stretching) and 1460 cm⁻¹ (N–H bending), while the red dashed line indicates the O–H stretching band of PVA, centered approximately at 3400 cm⁻¹.

An additional band near 3150 cm⁻¹ is also observed, which is not commonly reported for primary or secondary amides. This band can be attributed to the formation of interactions between the hydroxyl (–OH) groups of PVA and the amide (–NH₂) groups of urea. Such interactions modify the local electronic environment, resulting in shifts and broadening of the vibrational bands. However, not all amino groups participate in these interactions, as evidenced by the persistence of the standard N–H stretching band around 3400 cm⁻¹, corresponding to free or weakly bonded urea molecules.

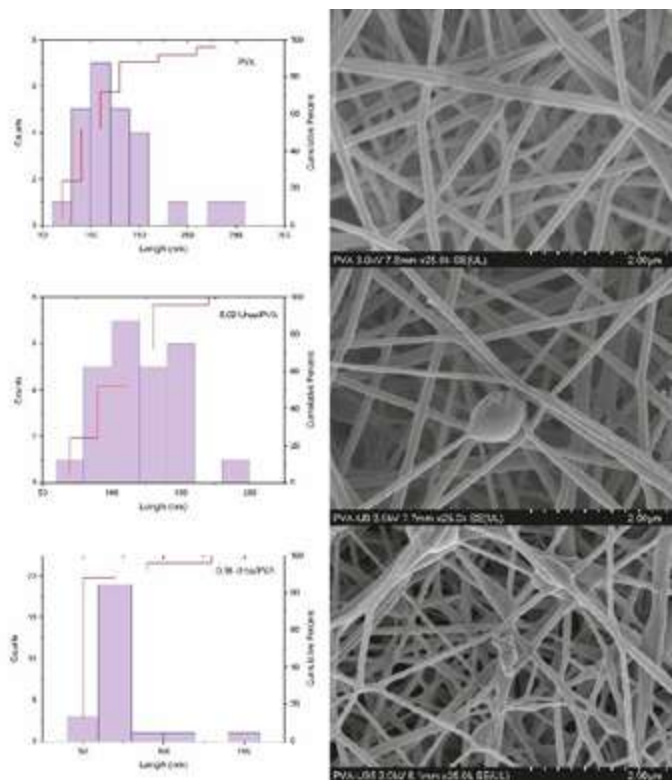


Figure 2. Scanning Electron Microscopy (SEM) micrographs and fiber diameter distributions of electrospun polyvinyl alcohol (PVA) nanofibers and urea/PVA composites at concentrations of 0.09 g and 0.036g

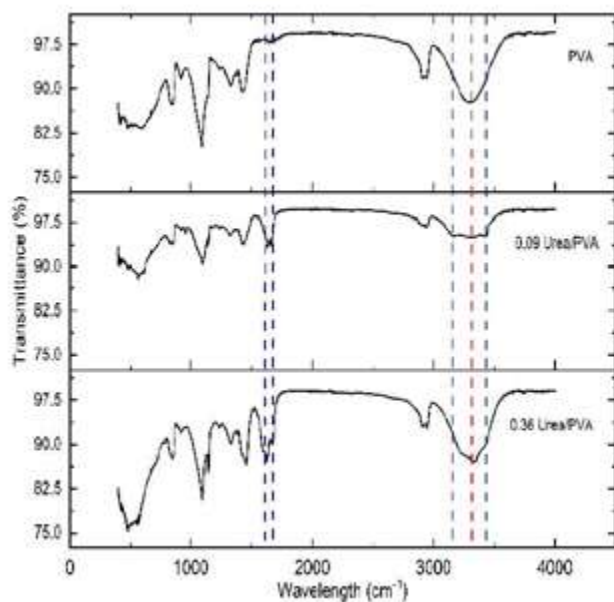


Figure 3. Fourier Transform Infrared (FTIR) spectra of the PVA nanofibers and urea/PVA composites at concentrations of 0.09g and 0.36g.

The broadening of the O–H band in urea-containing samples further supports the presence of

interactions between amino and hydroxyl groups, indicating stronger molecular coupling and a partial disruption of the intramolecular hydrogen bonds of PVA. This suggests the insertion of urea molecules between the polymer chains. Such interactions may affect the crystallinity, chain mobility, and thermal stability of the material, promoting the formation of a more amorphous and flexible matrix [13][14].

Additionally, the intensity of the C=O band around 1680 cm^{-1} increases as the urea concentration rises (0.09 g and 0.36 g), confirming the presence of urea embedded within the nanofibers. This behavior is consistent with previous studies reporting that the incorporation of nitrogen-containing compounds into PVA matrices produces similar spectral changes associated with hydrogen bond formation and specific molecular interactions [15][16]

Overall, the FTIR results demonstrate that the broadening of the O–H region, the appearance of a new band at 3150 cm^{-1} , and the shift of the amide bands provide clear evidence of molecular interactions between PVA and urea. These findings indicate that urea is not merely physically embedded but is chemically associated with the polymer matrix through hydrogen bonding, which may influence the mechanical behavior, biodegradability, and nitrogen release dynamics of the material under agricultural conditions.

Microbiological assays

In Table 3, the treatments considered in the study are detailed, along with the fiber weights and the number of layers used, to evaluate the effect of mass and multilayer structure on microbiological behavior.

Table 3. Weights of PVA/urea nanofibers at different concentrations and number of layers used.

	0.09 Urea/Pva			0.36 Urea/Pva		
	(mg)			(mg)		
	1	2		1	2	3
1 layer	2.8	2.0	1.9	1.3	1.1	0.8
3 layers	5.1	6.2	4.8	3.5	4.3	2.8
5 layers	9.7	11.7	13.2	5.6	4.8	3.2

At the end of the incubation period, bacterial growth was observed in all samples, with no inhibition halos around the material. In an agar diffusion assay (halo method or zone of inhibition), the appearance of a clear

halo indicates that an agent released from the material has diffused into the agar and reached a concentration sufficient to prevent bacterial growth in the surrounding area

Figure 4 shows the bacterial growth observed in nanofibers loaded with 0.09 g of urea across the three evaluated layer levels. It can be seen that none of the treatments exhibit the formation of inhibition halos, confirming the absence of a detectable antimicrobial effect under the experimental conditions.

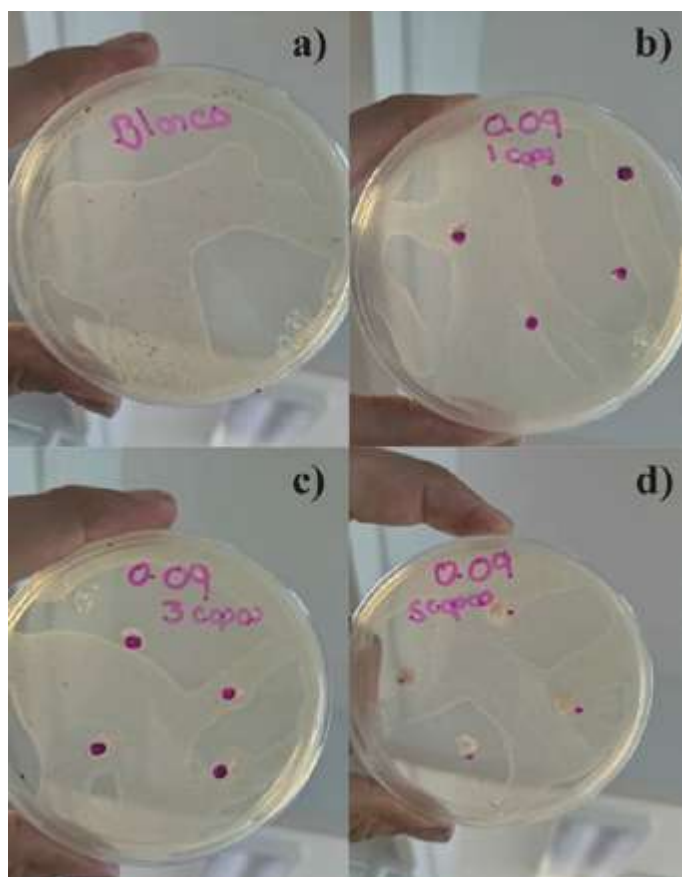


Figure 4. Evaluation of bacterial growth in PVA nanofibers loaded with 0.09 g of urea at different layer numbers — a) Control, b) 1 layer, c) 3 layers, d) 5 layers

The results corresponding to the nanofibers loaded with 0.36 g of urea are presented in Figure 5. The bacterial growth observed in this treatment showed a behavior like that of the fibers loaded with 0.09 g of urea, exhibiting the absence of inhibiting halos in all samples. The absence of halos in the experiment suggests that the PVA nanofibers, at the concentrations and configurations tested (one, three, or five layers), did not release a sufficient amount of

a diffusible active agent to produce a detectable inhibitory effect using this method.

The use of multiple layers is intended to increase the total load of the material and enhance the probability of detectable release: more layers imply a greater mass of the potential agent and may favor the formation of a concentration gradient that facilitates diffusion into the surrounding environment. This multilayer strategy can also modulate the release kinetics, with outer layers releasing more rapidly and inner layers acting as a long-term reservoir, as reported in studies of multilayer antimicrobial nanofibrous materials

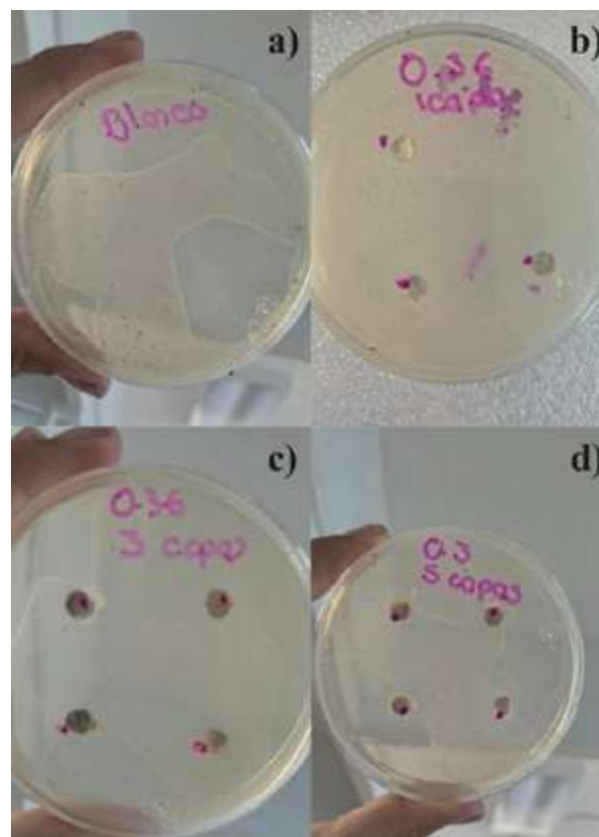


Figure 5. Evaluation of bacterial growth in PVA nanofibers loaded with 0.36 g of urea at different layer numbers — a) Control, b) 1 layer, c) 3 layers, d) 5 layers.

In this case, even for the sample with five layers, no inhibition halos were observed, reinforcing the conclusion that the material does not exhibit a diffusible antimicrobial effect under the tested conditions. This finding suggests that the incorporation of the material does not produce adverse effects on the evaluated microbiota and that the nanofibers could be considered biocompatible, as they do not inhibit the growth of the present microorganisms.

Effect on colony-forming bacterial growth.

The effect of fibers at different concentrations is shown in Figure 6, where it can be observed that in none of the treatments did the number of colony-forming units decrease; instead, they increased compared to the control. The increase in bacterial populations observed after the incorporation of the PVA–urea material can be considered beneficial for soil health and agricultural productivity. Soil bacteria perform essential functions that support the sustainability of the edaphic ecosystem. They participate in nutrient cycling, promoting the decomposition of organic matter and the mineralization of nitrogen and phosphorus, thereby increasing nutrient availability for plants [17][18].

Moreover, plant growth-promoting bacteria (PGPB) colonize the rhizosphere, enhancing nutrient uptake, producing phytohormones, and mitigating abiotic stress in plants [19][20]. These interactions may enhance the efficiency of controlled-release systems, such as those based on PVA–urea, by fostering an active and functional microbial environment.

In addition, bacteria contribute to the formation of soil aggregates, improving soil structure, aeration, and water-holding capacity [21]. A balanced increase in microbial activity may also reduce the need for fertilizers or pesticides by maintaining natural fertility and limiting the proliferation of pathogens [22]

Similarly, in degraded soils, the recovery of bacterial communities has been shown to restore biological fertility and nutrient recycling processes [19]. In this context, the PVA–urea material could act as a gradual source of carbon and nitrogen, selectively stimulating beneficial bacterial populations. As noted by Ohio State University, “flourishing microbial populations increase soil productivity and crop yields over time” [23]

Overall, these results indicate that the bacterial increase associated with PVA–urea is not an adverse effect, but rather an opportunity to enhance soil microbial functionality and strengthen its role in sustainable agricultural productivity.

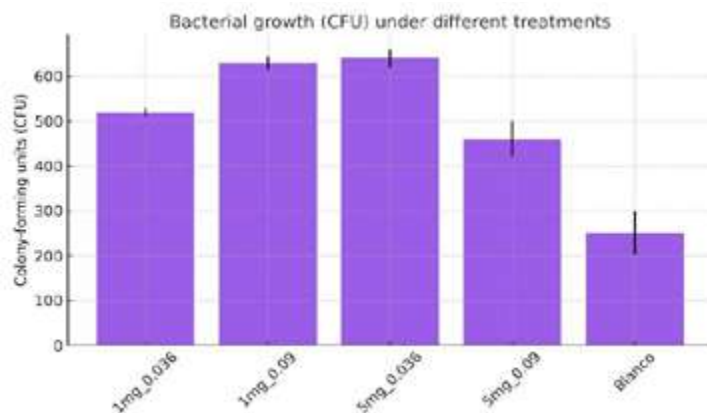


Figure 6. Bacterial growth (CFU) under different treatments.

Similarly, the formulation with low PVA and low urea concentrations promoted a balanced and moderate stimulation of microbial metabolism, ensuring adequate nutrient supply without causing osmotic or pH stress [17]. In contrast, unbalanced formulations (those with high urea and low PVA or high PVA and low urea) created unfavorable conditions: the former led to rapid nitrogen release and alkalinization, while the latter resulted in carbon excess and nitrogen limitation [18][22]

Table 4 presents the results of the Tukey’s multiple comparison test, which revealed that all treatments showed significant differences compared to the control. The most effective treatments were 5 mg of PVA with 0.036 g of urea and 1 mg of PVA with 0.09 g of urea.

The treatments with both higher and lower PVA–urea contents exhibited the highest bacterial counts (CFU). This behavior can be attributed to the carbon–nitrogen (C/N) balance and the nutrient release kinetics regulated by the PVA matrix.

In the formulation containing higher PVA and urea concentrations, the denser polymeric network enabled a gradual nitrogen release, preventing ammonia peaks and maintaining a stable microenvironment for bacterial colonization. PVA, being hydrophilic and partially biodegradable, provides available carbon sources and surface area for biofilm formation, thereby supporting microbial proliferation [19][21]

Table 4. Tukey test for bacterial growth (CFU) under different PVA–urea treatments.

Treatment		χ	σ	Tuckey
5mg	PVA0.36	644.7	28.9	A
1mg	PVA0.09	633.3	12.7	A
1mg	PVA0.09	515.7	12.7	B
5mg	PVA0.36	456.7	43.2	C
Control		249	43.1	D

X = average , σ = standard deviation

4. Discusión

The obtained results demonstrate that the electrospun PVA nanofibers loaded with urea exhibit uniform morphologies with nanometric diameters, showing a notable reduction in fiber size as the urea concentration increases. Previous studies have indicated that variations in fiber diameter are strongly correlated with changes in the electrical conductivity of the electrospinning solution [8] [11] [24].

The incorporation of urea into the polymer matrix was confirmed by FTIR spectroscopy. The emergence of a new band near 3150 cm^{-1} and the broadening of the O–H stretching region indicate bonding between PVA and urea molecules. Such interactions are known to reduce crystallinity and increase polymer flexibility which may facilitate faster degradation and more efficient nutrient release in humid environments [13]. This structural modulation is particularly relevant for agricultural applications seeking gradual nitrogen delivery without compromising the integrity of the material.

The multilayer arrangement of nanofibers (one, three, and five layers) did not alter the microbiological results. Although multilayer configurations could theoretically increase the total mass of the active component and promote diffusion gradients, no differences were detected among the evaluated treatments.

Microbiological assays demonstrated that PVA fibers, even at nanometric dimensions, did not exhibit inhibition of bacterial growth. However, a modification in bacterial growth dynamics cannot be ruled out and should be further investigated. It is important to consider quantitative analyses, such as colony-forming unit (CFU) counts and CO_2 production measurements, to better understand the interaction and behavior of the fibers in biological systems.

Another relevant factor is the degradation of the material, for which leachate assays in plant cultures could provide valuable insights into the interaction between the fibers and the biological environment, allowing the assessment of their stability and potential impact on soil microbiota.

Nevertheless, this study acknowledges certain limitations. The microbiological tests were performed under controlled laboratory conditions using a general environmental inoculum. Future research should include soil-based assays with complex microbial communities, monitoring changes in ammonium release, enzymatic activity, and pH during material degradation. Additionally, kinetic studies on nitrogen release under variable humidity and temperature could provide further insight into the field performance of these nanofibers.

Overall, the findings confirm that PVA–urea nanofibers are structurally stable, chemically interactive, and microbiologically compatible, supporting their potential as controlled-release fertilizers for sustainable agriculture. The results presented in Figure 6 and Table 4 demonstrate that the incorporation of PVA–urea fibers did not inhibit microbial growth; instead, it promoted an increase in colony-forming bacterial populations compared to the control. This behavior suggests that the material not only ensures effective nutrient release but also fosters a beneficial soil microbiome.

5. Conclusions

The present study successfully achieved its main objective: to evaluate the microbiological compatibility of urea-loaded PVA nanofibers synthesized by electrospinning, to determine their feasibility as controlled nitrogen-release systems for sustainable agricultural applications.

The results showed that the incorporation of urea led to a decrease in fiber diameter, reaching the nanometric scale.

The FTIR spectroscopic analysis evidenced molecular interactions between the hydroxyl groups of PVA and the amide groups of urea, indicating the formation of hydrogen bonds that modify the material. These interactions not only confirm the effective incorporation of urea into the polymeric matrix but also suggest a potential influence on nutrient release kinetics and relevant structural changes in the material.

Microbiological tests revealed the absence of inhibition halos in all evaluated treatments, demonstrating that the nanofibers exhibit no inhibitory activity.

The findings of this study support that urea-loaded PVA nanofibers are a safe and efficient material for controlled nitrogen release, contributing to improved nutrient-use efficiency and reduced environmental impact associated with the excessive use of conventional fertilizers. It is recommended that further studies be conducted under soil conditions to evaluate long-term degradation and nitrogen-release behavior, as well as their influence on more complex microbial communities.

Acknowledgments.

The authors gratefully acknowledge the financial support provided by the Secretariat of Science, Humanities, Technology, and Innovation (SECIHTI) for the completion of this work

Conflict of Interest.

The authors declare that there are no conflicts of interest.

Statement on the Use of Artificial Intelligence Tools

During the preparation of this manuscript, the authors used ChatGPT (OpenAI, GPT-5) to assist with translation and linguistic editing. The authors reviewed, revised, and approved all generated content and take full responsibility for the final version of the manuscript.

Abbreviations

PVA: Polyvinyl alcohol

FTIR: Fourier Transform Infrared Spectroscopy

SEM: Scanning Electron Microscopy

6. References

- [1] K. Maliszewska and T. Czapka, "Antibacterial and biodegradable electrospun nanofibers for agricultural and biomedical applications," *Materials Today Sustainability*, vol. 20, 2022.
- [2] D. Kyuchyuk, E. Nikolova, and T. Tsvetanov, "Electrospun polyester/PEO nanofibers loaded with quinoline derivatives: Biocompatibility and antimicrobial performance," *Journal of Environmental Chemical Engineering*, vol. 11, 2023.
- [3] A. A. Najim, A. H. Al-Obaidi, and A. J. Al-Khafaji, "Effect of urea on the physical properties of electrospun PVA nanofibers," *Journal of Applied Polymer Science*, vol. 139, no. 45, p. e53217, 2022.
- [4] G. C. Türkoğlu, N. Khomarloo, E. Mohsenzadeh, D. N. Gospodinova, M. Neznakomova, and F. Salaün, "PVA-based electrospun materials—A promising route to designing nanofiber mats with desired morphological shape—A review," *International Journal of Molecular Sciences*, vol. 25, no. 3, p. 1668, 2024.
- [5] R. R. Mohamed, A. Abdel-Moneim, and S. A. El-Sayed, "Influence of urea on hydrogen bonding and crystallinity in poly(vinyl alcohol) blends," *Journal of Polymer Research*, vol. 25, no. 6, pp. 1–12, 2018.
- [6] A. Rajah, J. Yeo, and M. Tan, "Designing sustainable polymer systems for controlled nutrient release: A review," *Sustainable Materials and Technologies*, vol. 38, p. e00988, 2025.
- [7] Z. Khan, M. Ahmad, and N. Iqbal, "Nanocomposite fertilizers and their effects on soil microbial diversity," *Soil Biology & Biochemistry*, vol. 165, p. 108532, 2022.
- [8] S. Das, P. Kumar, and A. Singh, "Impacts of nanomaterials on soil microbial ecology and nutrient cycling," *Environmental Nanotechnology, Monitoring & Management*, vol. 27, p. 101940, 2025.
- [9] P. Khanna, S. Chowdhury, and M. Barman, "Toxicological interactions between nanoparticles and soil microbiota: Mechanisms and environmental implications," *Science of the Total Environment*, vol. 782, p. 146908, 2021.
- [10] S. Sillen, H. Thijs, and J. Colpaert, "Microbial responses to engineered nanomaterials in soil: Ecological risks and resilience," *Applied Soil Ecology*, vol. 153, p. 103620, 2020.
- [11] N. N. Inayah, A. Kusumaatmaja, and R. Murtafi'atin, "Slow-release fertilizer behavior of polyvinyl alcohol (PVA)/urea/TiO₂ nanofiber membrane," *Polymers for Advanced Technologies*, vol. 35, no. 7, p. e6472, 2024.
- [12] M. Abrigo, P. Kingshott, and S. L. McArthur, "Bacterial response to different surface chemistries fabricated by plasma polymerization on electrospun nanofibers," *Biointerphases*, vol. 10, no. 4, 2015.
- [13] A. Aflatounian, M. Sharzehee, and H. A. Mashroteh,

- “Preparation of stable polyvinyl alcohol/polyurea hydrogel using oligomeric compounds containing urea-bonded,” *Results in Materials*, vol. 22, p. 100564, 2024.
- [14] F. D. Manshadi, M. Sharzehee, S. A. Mirjalili, and A. Vaez, “Degradable hybrid hydrogel scaffolds consisting of protein and polysaccharide compounds based on a PVA polymer modified with urea oligomers for liver cells,” *International Journal of Biological Macromolecules*, p. 144550, 2025.
- [15] M. A. Mohamed, M. F. Abdel-Aziz, and A. M. Abdel-Rahman, “Chitosan–urea nanocomposite as a slow-release fertilizer for improved nitrogen efficiency and plant growth,” *Journal of Applied Polymer Science*, vol. 135, no. 15, pp. 46271–46280, 2018.
- [16] R. Najim, A. S. Mahmood, and H. K. Abbas, “Synthesis and characterization of PVA–urea composite films for agricultural controlled-release applications,” *Materials Today: Proceedings*, vol. 62, pp. 3251–3258, 2022.
- [17] Y. Wang, J. Liu, and F. Zhang, “Microbial nitrogen transformations and soil fertility improvement in sustainable agricultural systems,” *Applied Soil Ecology*, vol. 195, p. 104890, 2024.
- [18] L. Chen, S. Wu, and H. Zhou, “Role of soil bacteria in nutrient cycling and plant growth promotion under changing environmental conditions,” *Frontiers in Microbiology*, vol. 15, p. 1375423, 2024.
- [19] M. A. Khan, P. Sharma, and R. Singh, “Plant growth-promoting rhizobacteria: Mechanisms and agricultural applications,” *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, vol. 186, no. 2, pp. 245–258, 2023.
- [20] S. Kumar, “Microbial inoculants in sustainable agriculture: Enhancing nutrient uptake and stress tolerance,” *Agronomy*, vol. 15, no. 3, p. 567, 2025.
- [21] Q. Zhao, X. Li, and T. Huang, “Bacterial community dynamics and soil aggregate stability in response to biofertilizer application,” *Soil Biology and Biochemistry*, vol. 189, p. 109585, 2025.
- [22] L. Maciel-Rodríguez, R. Torres-López, and J. M. García, “Interactions between soil microorganisms and nutrient management: Toward reduced chemical inputs,” *Environmental Microbiology Reports*, vol. 17, no. 1, pp. 56–69, 2025.
- [23] Ohio State University Extension, “Flourishing microbial populations increase soil productivity and crop yields over time,” *Extension Bulletin*, Columbus, OH, USA, 2023.
- [24] I. Hassounah, N. Shehata, A. Hudson, B. Orler, and K. Meehan, “Characteristics and 3D formation of PVA and PEO electrospun nanofibers with embedded urea,” *Journal of Applied Polymer Science*, vol. 131, no. 3, 2014.

Estudio DFT de complejos prepoliméricos en polímeros molecularmente impresos para piocianina

DFT Analysis of Prepolymeric complexes in Molecularly Imprinted Polymers for Pyocyanin Recognition

M. G. Magallón-Méndez¹, Álvarez-López Alejandra¹, M. A. Cortés-Cuán², Carlos Saldaña³, Carlos M Cortés-Romero⁴, Beatriz Liliana España-Sánchez⁵ y María de los Ángeles Cuán Hernández^{1*}

¹Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Querétaro, Campus Aeropuerto, Carretera a Chichimequillas S/N, Ejido Bolaños, Querétaro 76140, México

²UMDI-Facultad de Ciencias, Universidad Nacional Autónoma de México Campus Juriquilla, Querétaro, México

³Facultad de Ciencias Naturales, Universidad Autónoma de Querétaro, Av. De las Ciencias S/N, Querétaro 76220, México

⁴Facultad de Química, Universidad Autónoma de Querétaro, Centro Universitario, Cerro de las Campanas, C.P. 76010, Santiago de Querétaro, Querétaro, México.

⁵Tecnológico de Monterrey, Institute of Advanced Materials for Sustainable Manufacturing Av. Eugenio Garza Sada 2501 Sur, Tecnológico, 64700 Monterrey, N.L.

Resumen: Se desarrolló un estudio teórico orientado al diseño de un polímero molecularmente impreso con capacidad para estabilizar y reconocer selectivamente a la piocianina. Se emplearon cálculos basados en la teoría del funcional de la densidad utilizando el nivel M06-2X y el conjunto de base 6-31+G(d,p), considerando simulaciones en fase gaseosa y en solvente acetonitrilo para reproducir las condiciones experimentales de prepolimerización. Se realizaron optimizaciones geométricas de las moléculas individuales y de los complejos formados entre la molécula plantilla y los componentes del sistema, conformado por ácido metacrílico como monómero funcional y divinilbenceno como agente reticulante. Se evaluaron las energías de interacción y de Gibbs, así como parámetros estructurales como distancias, ángulos de enlace, y orbitales HOMO-LUMO con el fin de determinar la estabilidad y afinidad de los complejos. El análisis permitió identificar configuraciones estables caracterizadas por enlaces de hidrógeno predominantes en los complejos con ácido metacrílico e interacciones aromáticas de tipo π - π en los complejos con divinilbenceno.

Palabras clave: NAN, Polímeros molecularmente impresos; Piocianina; Energía de interacción; Teoría del funcional de la densidad.

Abstract: A theoretical study was conducted aimed at the rational design of a molecularly imprinted polymer capable of stabilizing and selectively recognizing pyocyanin. Calculations based on density functional theory were performed using the M06-2X level and the 6-31+G(d,p) basis set, considering both gas-phase and acetonitrile solvent simulations to reproduce the experimental prepolymerization conditions. Geometric optimizations were carried out for the individual molecules and for the complexes formed between the template molecule and the system components, consisting of methacrylic acid as the functional monomer and divinylbenzene as the cross-linking agent. Interaction and Gibbs free energies were evaluated, as well as structural parameters such as bond lengths and bond angles, and HOMO-LUMO orbitals, to determine the stability and affinity of the complexes. The analysis revealed stable configurations characterized by predominant hydrogen bonds in the complexes with methacrylic acid and π - π interactions in the complexes with divinylbenzene.

Keywords: NAN, molecularly imprinted polymers; Pyocyanin; Interaction energy; Density functional theory.

1. Introducción

La piocianina (PYO) es un metabolito secundario de la familia de las fenazinas, producido por la bacteria Gramnegativa *Pseudomonas aeruginosa* [1]. Esta especie es un patógeno oportunista asociado a

infecciones nosocomiales, especialmente graves en personas inmunocomprometidas [2]. En el contexto clínico, las infecciones pueden originarse por la colonización de superficies y dispositivos médicos sobre todo los asociados a ventilación mecánica [3].

Está bien documentado que la piocianina tiene un

rol clave en la patogénesis de esta bacteria, promoviendo la formación de biofilms [4], [5] y favoreciendo la generación de especies reactivas de oxígeno (ROS) que generan daño celular del organismo huésped [4], [6]. Sin embargo, también se le han atribuido propiedades bioactivas de interés como la actividad antitumoral en células de cáncer de mama [1] y actividad antimicrobiana ante cepas multirresistentes a antibióticos como *E.coli* y *S. aureus* [7], generando interés sobre su posible aplicación biomédica. No obstante, su toxicidad, sensibilidad al pH, luz y su alta difusión en medios biológicos [8] representan retos que limitan uso directo y motivan la búsqueda de estrategias para su estabilización y liberación.

Entre las distintas estrategias desarrolladas, destaca el uso de polímeros molecularmente impresos (MIPs por sus siglas en inglés), los cuales son materiales sintéticos capaces de reconocer una molécula objetivo (también denominada plantilla) mediante sitios de unión específicos creados durante el proceso de polimerización [9]. Estos materiales han sido utilizados como plataformas inteligentes de liberación controlada y dirigida de gran variedad de fármacos [10], [11], [12], [13], [14] así como para el desarrollo de sensores de detección indirecta de *Pseudomonas aeruginosa* [15], [16].

La elección de monómeros y reticulante en un MIP es esencial pues influye en las interacciones que se tendrán con el analito de interés lo que determina su precisión y selectividad. Esto indirectamente impacta en su aplicación y las condiciones de uso. El encontrar la combinación de monómero y reticulante más favorable puede ser un trabajo costoso tanto en tiempo como en recursos. Por ello, la simulación computacional se ha consolidado como una herramienta valiosa para predecir las interacciones plantilla-monómero y orientar la formulación [17], [18], [19], [20]. Además de permitir detectar las combinaciones más favorables también se ha utilizado para discernir el solvente a utilizar, permitiendo mejorar las condiciones experimentales [21].

En la simulación computacional, la selección del nivel de teoría adecuado resulta fundamental para obtener resultados confiables. El funcional M06-2X ha demostrado un buen rendimiento en el cálculo de energías relativas y en la optimización de estructuras geométricas, superando a otros funcionales en precisión. Por

su parte, la base 6-31+G(d,p) se ha reportado como especialmente útil para describir interacciones no covalentes, aplicándose en la selección del monómero funcional más adecuado, la determinación de la relación molar óptima entre la plantilla y el monómero funcional, así como en el cálculo de energías de interacción. Todo ello con un costo computacional moderado y resultados en concordancia con los resultados experimentales [22].

El ácido metacrílico (MAA) y el p-divinilbenceno (DVB) han sido documentados como monómero funcional y reticulante, respectivamente, en la preparación de polímeros molecularmente impresos para la detección de piocianina [16]. Su buen desempeño se atribuye, de forma teórica a una combinación de interacciones puentes de hidrógeno, contactos π - π y fuerzas dispersivas de van de Waals; no obstante, el mecanismo de reconocimiento específico y el peso relativo de cada interacción siguen siendo aspectos por clarificar.

Con el objetivo de racionalizar las interacciones moleculares involucradas en el sistema, se llevó a cabo un estudio *in silico* empleando la teoría del funcional de la densidad (DFT) al nivel M06-2X/6-31+G(d,p). Se evaluaron diferentes configuraciones de los complejos MAA-PYO y DVB-PYO, tanto en fase gas como en presencia de solvente (acetonitrilo, modelo PCM), con el propósito de simular las condiciones experimentales, estimar las energías de formación e identificar las interacciones predominantes entre los componentes del sistema.

2. Materiales y métodos

Se realizó la simulación DFT del ácido metacrílico (MAA) como monómero funcional, del p-divinilbenceno (DVB) como reticulante y de la piocianina (PYO) como molécula plantilla utilizando el método DFT a un nivel M06-2X con una base 6-31+G(d,p). Inicialmente se construyeron las estructuras tridimensionales de los reactivos anteriormente mencionados empleando Gaussian View 5.0. Posteriormente, cada estructura se optimizó con el software Gaussian 09. Una vez optimizadas las estructuras se hicieron los estudios siguientes:

2.1 Mapas de potencial electrostático (MEPs)

Con el objetivo de evaluar los sitios de interacción posibles, se calcularon y analizaron los mapas de potencial electrostático molecular (MEPs) para el MAA, DVB y PYO. Estos mapas permiten visualizar la distribución de densidad electrónica y, con ello, inferir los sitios con mayor tendencia a establecer interacciones intermoleculares o enlaces débiles.

2.2 Energía de interacción

Tras el análisis de los mapas de potencial electrostático (MEP), se propusieron cinco posibles orientaciones para describir la interacción entre MAA y PYO:

1.El hidrógeno del grupo –OH del MAA orientado hacia el oxígeno desprotonado (O⁻) de la PYO, con el grupo carbonilo del MAA dirigido hacia el interior del anillo aromático (MAA-PYO-1).

2.El hidrógeno del grupo –OH del MAA orientado hacia el oxígeno desprotonado (O⁻) de la PYO, con el grupo carbonilo dirigido hacia el exterior del anillo (MAA-PYO-2).

3.El MAA situado sobre la superficie de la PYO, alineando su grupo carbonilo hacia el nitrógeno no metilado del anillo heteroaromático (MAA-PYO-3).

4.El oxígeno del grupo hidroxilo (–OH) del MAA orientado hacia el nitrógeno metilado de la piocianina (MAA-PYO-4).

5.El grupo carbonilo del MAA orientado hacia el nitrógeno metilado de la piocianina. (MAA-PYO-5).

Para las interacciones DVB-PYO se propusieron 2 orientaciones la primera del tipo paralela desplazada (DVB-PYO-1), y la segunda de tipo geometría apilada paralela cofacial (DVB-PYO-2). Estas se seleccionaron de acuerdo con las referencias [23], [24] que reportan que las interacciones entre sistemas aromáticos pueden clasificarse como de apilamiento paralelo, paralelo desplazado y de forma T mostrando una mayor estabilidad aquellos de forma paralelas.

La estabilidad de las geometrías de se evaluó mediante el cálculo tanto de la energía de interacción (ΔE) como de la energía libre de Gibbs (ΔG). La energía de interacción se obtuvo a partir de la diferencia entre la energía total del complejo plantilla–monómero y plantilla-reticulante y la suma

de las energías de los componentes individuales, de acuerdo con la ecuación (1).

$$\Delta E = E_{interacción} - E_{plantilla} - E_{reticulante} \quad (1)$$

Por su parte, la energía libre de Gibbs (ΔG) se determinó con (2), a partir de las salidas de Gaussian correspondientes a “Sum of electronic and thermal Free Energies”, lo que incorpora tanto la contribución electrónica como las correcciones térmicas y entrópicas (vibracionales, rotacionales y traslacionales) a 298 K.

$$\Delta G = G_{Interaccion} - G_{plantilla} - G_{reticulante} \quad (2)$$

2.3 Análisis de orbitales HOMO-LUMO

El análisis de los orbitales frontera (HOMO y LUMO) se empleó para estudiar la distribución electrónica de las especies involucradas y determinar su papel como donadoras o aceptoras de electrones dentro del sistema prepolimérico. Esta aproximación teórica permite identificar interacciones moleculares favorables, como los puentes de hidrógeno o las transferencias parciales de carga, que contribuyen a la estabilización del complejo formado entre la molécula plantilla y el monómero funcional [18], [25]

3. Resultados

3.1 Mapas de potencial Electroestático (MEPs)

La interpretación de los MEPs se basa en la codificación de colores: las regiones rojas/amarillas indican potencial electrostático negativo, característico de zonas ricas en electrones (átomos electronegativos como oxígenos o anillos aromáticos con densidad π); mientras que las regiones azules corresponden a potencial positivo, asociado a sitios deficientes en electrones, capaces de actuar como aceptores en interacciones electrostáticas [26].

Los resultados para el MAA (Fig. 1) muestran una marcada zona de densidad positiva para H12, característico de es el aceptor de electrones lo que lo identifica como un sitio susceptible a interacciones electrostáticas o de tipo puente de hidrógeno. En contraste el O10 concentra la carga negativa, característica de un donador de electrones. En conjunto, estos átomos se señalan como los principales sitios activos del ácido metacrílico, determinantes en la formación de interacciones no covalentes con la molécula plantilla [25], [26].

Al analizar el mapa de potencial del entrecruzante

(Fig. 2) se observa que, para el DVB, el anillo aromático concentra regiones de densidad de carga negativa asociadas al sistema π conjugado, lo que le confiere un carácter de donador electrónico capaz de participar en interacciones de tipo π - π

La PYO se reporta en la literatura como principalmente en forma zwitteriónica [8]. Esto es consistente con el mapa obtenido (Fig. 3) ya que se observa una alta densidad de carga negativa en el O26, convirtiéndolo en un sitio donador electrónico fuerte, altamente propenso a establecer puentes de hidrógeno o interacciones con especies electropositivas. El nitrógeno 20 Presenta una densidad de carga positiva significativa.

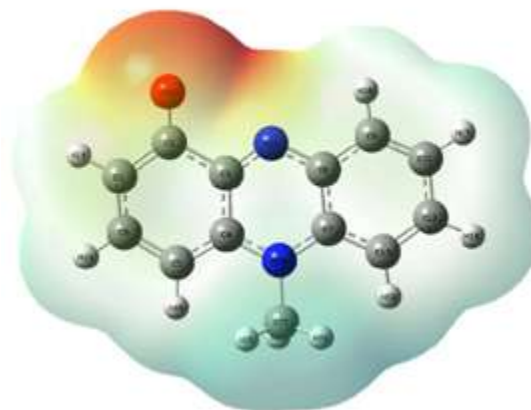


Figura 3. Mapa de potencial electrostático de la Píocianina en forma Zwitteriónica

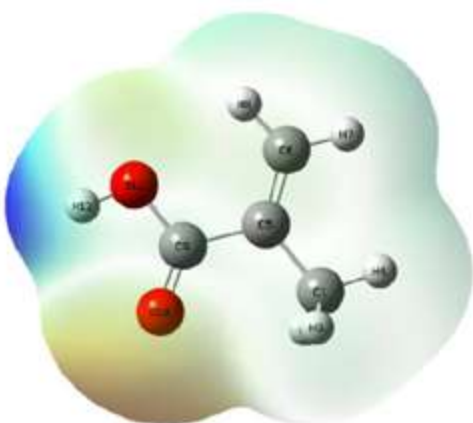


Figura 1. Mapa de potencial electrostático del ácido metacrílico

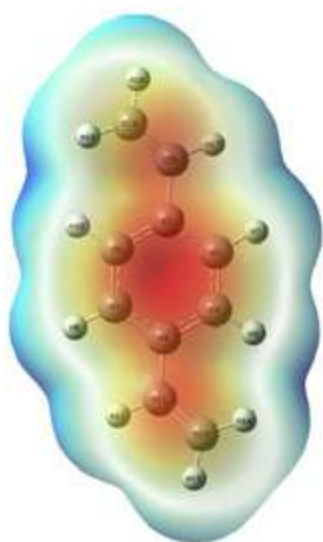


Figura 2. Mapa de potencial electrostático del Divinilbenceno

3.2 Energías de interacción

El análisis comparativo de las orientaciones MAA-PYO (Tabla 1) mostró que los complejos 1, 2 y 3 presentan energías de interacción (ΔE) en el rango de -11 a -12 $\text{kcal}\cdot\text{mol}^{-1}$, con valores de energía libre (ΔG) ligeramente negativos o próximos a cero, lo que sugiere interacciones no covalentes estables de tipo puente de hidrógeno o consistentes con los valores reportados en la literatura para sistemas de prepolimerización de MIPs [27]. En contraste, la orientación 5 mostró una energía de interacción de -36.79 $\text{kcal}\cdot\text{mol}^{-1}$, valor considerablemente más negativo que los intervalos típicos (-3 a -15 $\text{kcal}\cdot\text{mol}^{-1}$) esperados para interacciones no covalentes. Este comportamiento indica la presencia de una posible interacción iónica o semicovalente ($\text{O}^-\cdots\text{N}^+$), la cual no es deseable en sistemas de impresión molecular debido a que compromete la reversibilidad del reconocimiento y la eficiencia de la liberación de la plantilla [20]. Además, esta interacción se ve altamente penalizada en términos de energía cuando agregamos el solvente. Diversos autores enfatizan que las simulaciones DFT aplicadas al diseño de MIPS sobre estiman las interacciones dependiendo del solvente utilizado [17], [28], [29], por lo que no sorprende que en vacío nos dé una interacción tan alta y con solvente vemos que es termodinámicamente poco favorable. Por ello, la orientación 1 se considera la más favorable, dado que mantiene una afinidad electrónica adecuada en solvente ($\Delta E = -9.68$ $\text{kcal}\cdot\text{mol}^{-1}$) y una energía libre cercana a la espontaneidad ($\Delta G = +0.42$ $\text{kcal}\cdot\text{mol}^{-1}$), representando la configuración más estable y fisicoquímicamente realista bajo condiciones experimentales. La distancia entre el O26 y H27 en la interacción 1 con solvente es de 1.48 Å, con un ángulo de 74.81° . Estos valores son consistentes con lo reportado para un enlace puente de hidrógeno de fuerte a moderado los cuales tienen valores de energía de interacción de 2 a -12 $\text{kcal}\cdot\text{mol}^{-1}$, con distancias H-A menores a 2.6 Å y

ángulos 130–180° según la literatura [30], [31]. Las 5 diferentes orientaciones para el monómero y la plantilla se muestran en la Fig. 4.

Las energías de interacción calculadas para los complejos DVB–PYO se presentan en la Tabla 3. Los resultados muestran que las configuraciones paralelas desplazada (DVB–PYO-1, Fig. 5) y apilada cofacial (DVB–PYO-2, Fig. 6) difieren muy poco en su estabilización energética, ya que durante la optimización la estructura cofacial se desplazó ligeramente, adoptando una geometría casi equivalente a la disposición paralela desplazada. La distancia centro–centro entre los anillos aromáticos en DVB–PYO-2 es de 3.584 Å, mientras que en DVB–PYO-1 es de 3.498 Å. Estos valores se encuentran dentro del

intervalo típico reportado para interacciones π – π , que presentan distancias de 3.3 a 3.8 Å y energías de 0.2 a 12 kcal·mol⁻¹ [23], [24].

Estos valores coinciden con lo reportado en [32], [33], quienes establecen que las interacciones π – π desplazadas suelen ser más estables que los apilamientos completamente paralelos, debido a la repulsión electrónica entre las nubes π superpuestas. En este contexto, el divinilbenceno (DVB), que posee anillos bencénicos, puede interactuar con los sistemas aromáticos de la piocianina (PYO) mediante acoplamiento de dispersión tipo π – π , estabilizados adicionalmente por efectos electrostáticos y de polarización.

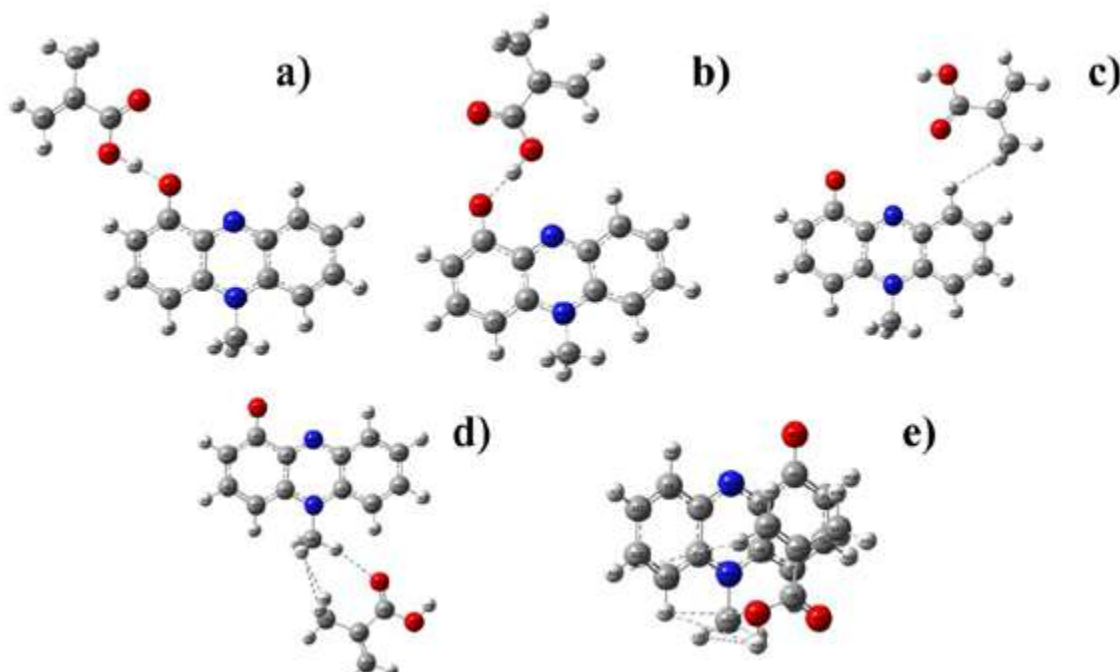


Figura 4. Interacciones optimizadas. a) MAA-PYO-1, b) MAA-PYO-2, c) MAA-PYO-3, d) MAA-PYO-4, e) MAA-PYO-5

Tabla 1. Valores de Energía de interacción (*E*) y de Energía libre de Gibbs (*G*) del ácido metacrílico, piocianina y divinilbenceno.

	Sin solvente		Con solvente	
	G (kcal/mol)	E (kcal/mol)	G (kcal/mol)	E (kcal/mol)
MAA	-306.303	-306.272	-306.310	-306.280
PYO	-685.691	-685.653	-685.710	-685.672
DVB	-386.757	-386.721	-386.763	-386.726
MAA+PYO	-991.994	-991.925	-992.020	-991.952
PYO+DVB	-1072.448	-1072.374	-1072.473	-1072.398

Tabla 2. Valores de Energía de interacción (E) y de Energía libre de Gibbs (G) para las interacciones MAA-PYO

MAA-PYO		Sin solvente		Con solvente	
Interacción		ΔG (kcal/mol)	ΔE (kcal/mol)	ΔG (kcal/mol)	ΔE (kcal/mol)
1		-1.56751748	-12.05382038	0.41854850	-9.68371889
2		-1.10190580	-11.25562893	1.03476234	-9.56825723
3		-1.57316506	-12.05444789	7.77609153	-1.27133323
4		2.76103960	-9.67493376	4.57391310	-7.89343571
5		6.11005513	-36.78646011	8.16953967	-2.46862041

Tabla 3. Valores de Energía de interacción (E) y de Energía libre de Gibbs (G) para interacciones DVB-PYO

DVB-PYO		Sin solvente		Con solvente	
Interacción		ΔG (kcal/mol)	ΔE (kcal/mol)	ΔG (kcal/mol)	ΔE (kcal/mol)
1		0.55660048	-12.91099768	3.81713725	-10.44049474
2		0.83897953	-12.86267948	4.31977196	-9.93597751

3.2 Análisis de orbitales HOMO-LUMO

De acuerdo con la literatura, el nivel de energía del orbital molecular ocupado más alto (HOMO) se asocia con la capacidad de donar electrones, mientras que el nivel de energía del orbital molecular desocupado más bajo (LUMO) representa la capacidad de aceptar densidad electrónica.

Por lo tanto, la comparación entre estos valores permite establecer la dirección del flujo electrónico y evaluar la posible formación de interacciones donador-aceptor entre los componentes del sistema molecularmente impreso. Los valores de los orbitales HOMO y LUMO, así como los valores de brecha energética se reportan en la Tabla 4. para el monómero, plantilla y reticulante del sistema, así como para la interacción MAA-PYO-1 y DVB-PYO-1 que demostraron ser las más estables.

Tabla 4. Valores de orbitales HOMO, LUMO y Band gap.

Molécula	HOMO (eV)	LUMO (eV)	Band gap (eV)
DVB	-7.34 eV	+0.34 eV	7.68 eV
PYO	-6.69 eV	-2.33 eV	4.36 eV
MAA	-9.17 eV	-0.58 eV	8.59 eV
MAA-PYO-1	-6.69 eV	-2.33 eV	4.36 eV
DVB-PYO-1	-6.99 eV	-2.62 eV	4.37 eV

Los valores calculados muestran que la piocianina (PYO) presenta un HOMO más alto que el MAA y una brecha energética menor que los monómeros MAA y DVB, confirmando su mayor reactividad química y su papel como

donadora de densidad en las interacciones prepoliméricas. El MAA, con un HOMO más bajo, actúa como aceptor, coherente con la formación de interacciones tipo puente de hidrógeno. Por su parte, el DVB conserva un gap amplio, indicando comportamiento estructural inerte. La conservación del band gap en los complejos PYO-MAA y PYO-DVB evidencia que no se altera significativamente la estructura electrónica de la PYO, por lo que mantiene su funcionalidad óptica y redox dentro del sistema molecularmente impreso [16].

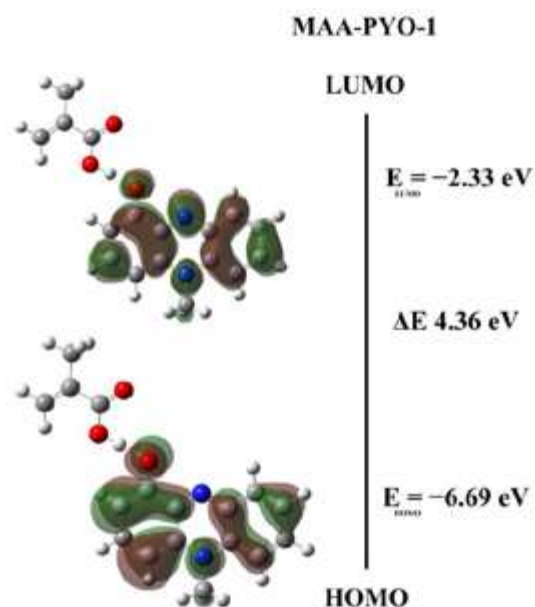


Figura 5. Orbitales HOMO-LUMO para la interacción MAA-PYO-1

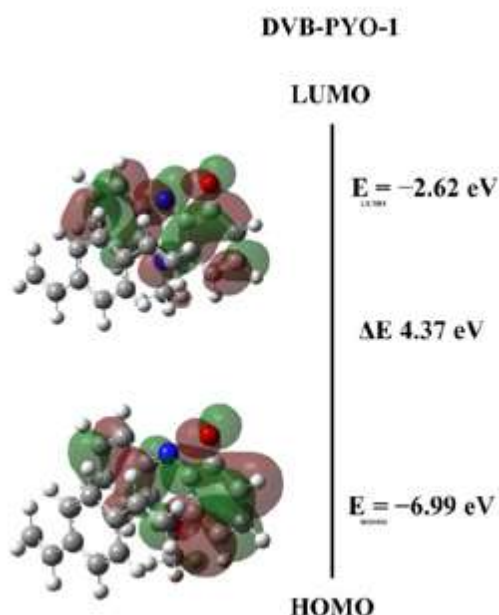


Figura 6. Orbitales HOMO-LUMO para la interacción DVB-PYO-1

4. Discusión

La estabilidad de la interacción se determinó con valores de ΔE que reflejan la afinidad electrónica intrínseca entre la plantilla y el monómero, mientras que ΔG proporciona información adicional sobre la espontaneidad y estabilidad termodinámica global de la asociación bajo condiciones del solvente utilizado y temperatura estándar. Los resultados muestran que las interacciones principales formadas entre el monómero (MAA) y la molécula plantilla (PYO) son del tipo puentes de hidrógeno siendo la interacción MAA-PYO-1 la más estable en términos de ΔE . Esto es consistente también con la teoría [34] que menciona que la principal interacción del MAA en polímeros molecularmente impresos es por la formación de puentes de hidrógeno.

Es importante mencionar que tal como se reporta en [25], [35] la positividad de ΔG no invalida la interacción: el ΔE sigue siendo un criterio sólido para seleccionar monómeros, mientras que ΔG sirve solo para estimar la espontaneidad global. Los autores enfatizan que en condiciones de polimerización (alta concentración de monómeros, confinamiento en la red polimérica), la penalización entrópica es mucho menor que en el modelo simplificado 1:1 [18], [25], [27]. Esto puede sugerir que se deben hacer pruebas con diferentes cantidades de MAA para observar interacciones cooperativas que disminuyan el valor de ΔG . Esto incluso puede permitir definir la mejor proporción monómero-plantilla tal como se ha realizado en otros trabajos [36], [37].

Las energías de interacción obtenidas para DVB-PYO ($\approx -10 \text{ kcal} \cdot \text{mol}^{-1}$) se encuentran dentro del rango característico de interacciones $\pi-\pi$ de tipo moderado, lo que sugiere una contribución estabilizadora importante por parte del reticulante. Sin embargo, en los sistemas de impresión molecular es habitual que el monómero funcional (como el MAA) presente interacciones de mayor magnitud, debido a que participa directamente en la formación de los sitios de reconocimiento específicos [38] mediante puentes de hidrógeno o interacciones electrostáticas. Además, la proporción molar empleada en la formulación de MIPs suele favorecer al monómero respecto al reticulante, lo que incrementa la probabilidad de contacto y la densidad de interacciones específicas [16], [39]. En contraste, el divinilbenceno (DVB) cumple principalmente una función estructural y de reticulación, aportando estabilidad mecánica y rigidez a la red polimérica, mientras que sus interacciones $\pi-\pi$ con la plantilla son más generales y de carácter dispersivo [40]. Esta diferencia explica que, aunque los valores de energía sean del mismo orden, las interacciones MAA-PYO contribuyan más al reconocimiento molecular, mientras que las DVB-PYO favorecen la cohesión global del polímero.

El análisis de los mapas de potencial electrostático y de los orbitales frontera evidencia que tanto el HOMO como el LUMO se localizan únicamente sobre la molécula de piocianina (PYO), sin participación significativa del ácido metacrílico (MAA), tal como se observa en la Fig. 5, ni del divinilbenceno (DVB), como podemos apreciar en la Fig. 6. Este resultado se explica por la diferencia energética entre los niveles frontera de las especies involucradas: la PYO presenta un HOMO más alto, mientras que el MAA y el DVB poseen brechas energéticas más amplias y orbitales menos accesibles. Bajo estas condiciones, los orbitales frontera del sistema se originan principalmente en la molécula con el menor band gap y la mayor densidad electrónica disponible, es decir, la PYO. La ausencia de contribución de los monómeros indica que las interacciones en los complejos PYO-MAA y PYO-DVB son de tipo no covalente, gobernadas por fuerzas electrostáticas, de dispersión y puentes de hidrógeno, sin hibridación apreciable entre los orbitales de las especies. Esto corresponde a un acoplamiento electrónico débil, en el que cada molécula mantiene su estructura electrónica individual. En consecuencia, la piocianina conserva su identidad electrónica, su funcionalidad redox y su capacidad óptica, incluso al interactuar con los monómeros dentro del sistema prepolimérico.

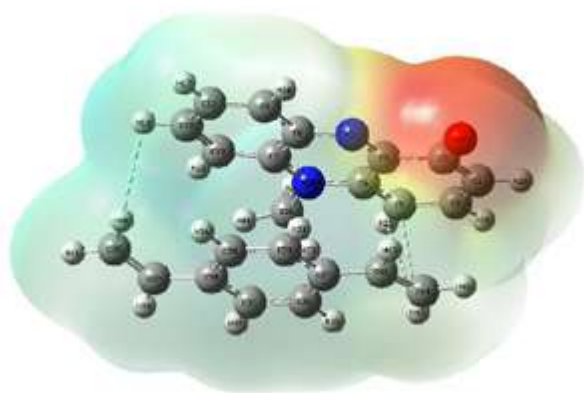


Figura 7, Mapa de potencial electrostático de la interacción DVB-PYO-1

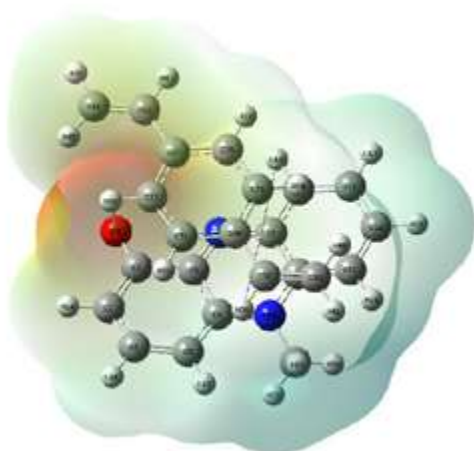


Figura 8. Mapa de potencial electrostático de la interacción DVB-PYO-2

5. Conclusión

La simulación DFT del sistema prepolimérico permitió analizar de manera detallada las interacciones moleculares que tienen lugar en un polímero molecularmente impreso dirigido a la piocianina, donde el ácido metacrílico (MAA) se empleó como monómero funcional y el divinilbenceno (DVB) como agente reticulante. Los resultados obtenidos mostraron la presencia de interacciones de tipo puente de hidrógeno entre el MAA y la piocianina, así como acoplamiento aromático π desplazados entre el DVB y la molécula plantilla, ambos consistentes con los mecanismos de reconocimiento descritos teóricamente para los MIPs.

Las configuraciones más estables correspondieron a aquellas en las que el MAA estableció enlaces por puente de hidrógeno, con energías de interacción más negativas y distancias coherentes con valores reportados en la literatura. Por su parte, las interacciones π - π mostraron una

contribución estabilizadora complementaria, favoreciendo la compactación del entorno polimérico. Estas observaciones confirman el papel dual de ambos componentes: el MAA como principal responsable del reconocimiento molecular selectivo y el DVB como estabilizador estructural que aporta rigidez y mantiene la integridad de los sitios de unión.

En conjunto, los resultados demuestran la eficacia del uso de simulaciones cuánticas basadas en la teoría del funcional de la densidad (DFT) para comprender y predecir la estabilidad de las interacciones en sistemas de impresión molecular. Este enfoque constituye una herramienta valiosa para optimizar la proporción y selección de monómeros y reticulantes, contribuyendo al diseño racional de nuevos polímeros molecularmente impresos con aplicaciones potenciales en el sensado y liberación controlada de compuestos bioactivos como la piocianina.

6. Agradecimientos

Agradecemos a la Secretaría de Educación, Ciencia, Tecnología e Innovación (SECIHTI) por el apoyo económico brindado para el desarrollo de este proyecto.

7. Conflictos de interés

Los autores declaran que no existen conflictos de interés.

8. Abreviaturas

Las siguientes abreviaturas se utilizan en este manuscrito:

DFT: Teoría funcional de la densidad

DVB: Divinilbenceno

HOMO: Orbital molecular ocupado más alto

MAA: Ácido metacrílico

MEPs: Mapas de potencial Electroestático

MIP: Polímeros molecularmente impresos

LUMO: Orbital molecular desocupado más bajo

PYO: Piocianina

9. Referencias Bibliográficas

- [1] A. A. Abdelaziz, A. M. A. Kamer, K. B. Al-Monofy, and L. A. Al-Madboly, "A purified and lyophilized *Pseudomonas aeruginosa* derived pyocyanin induces promising apoptotic and necrotic activities against MCF-7 human breast adenocarcinoma," *Microb Cell Fact*, vol. 21, no. 1, Dec. 2022, doi: 10.1186/s12934-022-01988-x.
- [2] G. W. Lau, D. J. Hassett, H. Ran, and F. Kong, "The

- role of pyocyanin in *Pseudomonas aeruginosa* infection," Dec. 2004. doi: 10.1016/j.molmed.2004.10.002.
- [3] S. Qin *et al.*, "Pseudomonas aeruginosa: pathogenesis, virulence factors, antibiotic resistance, interaction with host, technology advances and emerging therapeutics," Dec. 01, 2022, *Springer Nature*. doi: 10.1038/s41392-022-01056-1.
- [4] T. Gonçalves and U. Vasconcelos, "Colour me blue: The history and the biotechnological potential of pyocyanin," Feb. 02, 2021, *MDPI AG*. doi: 10.3390/molecules26040927.
- [5] G. A. March Rosselló and J. M. Eiros Bouza, "Quorum sensing en bacterias y levaduras," Oct. 19, 2013. doi: 10.1016/j.medcli.2013.02.031.
- [6] S. S. Baron, G. Terranova, and J. J. Rowe, "Molecular Mechanism of the Antimicrobial Action of Pyocyanin," 1989.
- [7] S. B. Mudaliar and A. S. Bharath Prasad, "A biomedical perspective of pyocyanin from *Pseudomonas aeruginosa*: its applications and challenges," Mar. 01, 2024, *Springer Science and Business Media B.V.* doi: 10.1007/s11274-024-03889-0.
- [8] K. Ohfuji *et al.*, "Construction of a glucose sensor based on a screen-printed electrode and a novel mediator pyocyanin from *Pseudomonas aeruginosa*," *Biosens Bioelectron*, vol. 19, no. 10, pp. 1237–1244, May 2004, doi: 10.1016/j.bios.2003.11.010.
- [9] A. K. Yadav, D. Verma, N. Dalal, A. Kumar, and P. R. Solanki, "Molecularly imprinted polymer-based nanodiagnosics for clinically pertinent bacteria and virus detection for future pandemics," Dec. 01, 2022, *Elsevier Ltd*. doi: 10.1016/j.biosx.2022.100257.
- [10] N. Sanadgol and J. Wackerlig, "Developments of smart drug-delivery systems based on magnetic molecularly imprinted polymers for targeted cancer therapy: A short review," Sep. 01, 2020, *MDPI AG*. doi: 10.3390/pharmaceutics12090831.
- [11] C. Alvarez-Lorenzo and A. Concheiro, "Molecularly imprinted materials as advanced excipients for drug delivery systems," 2006. doi: 10.1016/S1387-2656(06)12007-4.
- [12] B. Fresco-Cala, A. D. Batista, and S. Cárdenas, "Molecularly imprinted polymer micro- And nano-particles: a review," Oct. 01, 2020, *MDPI AG*. doi: 10.3390/molecules25204740.
- [13] S. He *et al.*, "Advances of molecularly imprinted polymers (MIP) and the application in drug delivery," Jan. 15, 2021, *Elsevier Ltd*. doi: 10.1016/j.eurpolymj.2020.110179.
- [14] N. Sanadgol and J. Wackerlig, "Developments of smart drug-delivery systems based on magnetic molecularly imprinted polymers for targeted cancer therapy: A short review," Sep. 01, 2020, *MDPI AG*. doi: 10.3390/pharmaceutics12090831.
- [15] M. Frigoli *et al.*, "Thermal Pyocyanin Sensor Based on Molecularly Imprinted Polymers for the Indirect Detection of *Pseudomonas aeruginosa*," *ACS Sens*, vol. 8, no. 1, pp. 353–362, Jan. 2023, doi: 10.1021/acssensors.2c02345.
- [16] S. Rajpal, S. Bhakta, and P. Mishra, "Biomarker imprinted magnetic core-shell nanoparticles for rapid, culture free detection of pathogenic bacteria," *J Mater Chem B*, vol. 9, no. 10, pp. 2436–2446, Mar. 2021, doi: 10.1039/d0tb02842h.
- [17] S. Suryana, Mutakin, Y. Rosandi, and A. N. Hasanah, "An update on molecularly imprinted polymer design through a computational approach to produce molecular recognition material with enhanced analytical performance," *Molecules*, vol. 26, no. 7, Apr. 2021, doi: 10.3390/molecules26071891.
- [18] N. Tarannum, S. Khatoon, and M. K. Sharma, "Computational approach to establish molecularly imprinted polymers interaction of functional monomer methacrylic acid and template norfloxacin," *Comput Theor Chem*, vol. 1224, Jun. 2023, doi: 10.1016/j.comptc.2023.114124.
- [19] X. Yu, H. Zeng, J. Wan, and X. Cao, "Computational design of a molecularly imprinted polymer compatible with an aqueous environment for solid phase extraction of chenodeoxycholic acid," *J Chromatogr A*, vol. 1609, Jan. 2020, doi: 10.1016/j.chroma.2019.460490.
- [20] J. Wu and Y. Zhang, "A review of Computer Simulation-Assisted Molecularly Imprinted Polymers," *International Journal of Biology and Life Sciences*, 2025.
- [21] M. Zhang *et al.*, "Comparative analysis of atrazine molecularly imprinted polymers using acetonitrile and toluene as solvents," *J Appl Polym Sci*, vol. 136, no. 11, Mar. 2019, doi: 10.1002/app.47190.
- [22] S. Suryana, Mutakin, Y. Rosandi, and A. N. Hasanah, "An update on molecularly imprinted polymer design through a computational approach to produce molecular recognition material with enhanced analytical performance," *Molecules*, vol. 26, no. 7, Apr. 2021, doi: 10.3390/molecules26071891.

- [23] W. R. Zhuang *et al.*, "Applications of π - π stacking interactions in the design of drug-delivery systems," Jan. 28, 2019, *Elsevier B.V.* doi: 10.1016/j.jconrel.2018.12.014.
- [24] M. Magdy *et al.*, "Experimental and theoretical investigations of divinylbenzene-based polymer as an efficient adsorbent for brilliant green dye removal," *RSC Adv*, vol. 15, no. 25, pp. 19843–19858, Jun. 2025, doi: 10.1039/d5ra02950c.
- [25] S. Ektirici, O. Kurc, M. Jalilzadeh, S. Asır, and D. Türkmen, "Computational Investigation of the Monomer Ratio and Solvent Environment for the Complex Formed between Sulfamethoxazole and Functional Monomer Methacrylic Acid," *ACS Omega*, vol. 7, no. 20, pp. 17175–17184, May 2022, doi: 10.1021/ACSOMEGA.2C00862.
- [26] L. Xie, N. Xiao, L. Li, X. Xie, and Y. Li, "Theoretical insight into the interaction between chloramphenicol and functional monomer (Methacrylic acid) in molecularly imprinted polymers," *Int J Mol Sci*, vol. 21, no. 11, pp. 1–14, Jun. 2020, doi: 10.3390/ijms21114139.
- [27] E. Gündeğer, C. Selçuki, and B. Okutucu, "Modeling prepolymerization step of a serotonin imprinted polymer," *J Mol Model*, vol. 22, no. 7, Jul. 2016, doi: 10.1007/s00894-016-3018-9.
- [28] E. Mohsenzadeh *et al.*, "Design of molecularly imprinted polymers (MIP) using computational methods: A review of strategies and approaches," May 01, 2024, *John Wiley and Sons Inc.* doi: 10.1002/wcms.1713.
- [29] S. Rajpal, P. Mishra, and B. Mizaikoff, "Rational In Silico Design of Molecularly Imprinted Polymers: Current Challenges and Future Potential," Apr. 01, 2023, *Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI)*. doi: 10.3390/ijms24076785.
- [30] G. A. Jeffrey, *An Introduction To Hydrogen Bonding*. New York: Oxford University Press, 1997.
- [31] G. R. , & S. T. Desiraju, . *The weak hydrogen bond: In structural chemistry and biology*. Oxford University Press. , 1999.
- [32] A. Azizi and A. Ebrahimi, "Theoretical investigation of the π + π + stacking interactions in substituted pyridinium ion," *J Mol Graph Model*, vol. 77, pp. 225–231, Oct. 2017, doi: 10.1016/j.jmgm.2017.08.024.
- [33] C. A. Hunter and J. K. Sanders, "The nature of π - π interactions," *J. Am. Chem. Soc.*, 1999, doi: 112,5525–5534.
- [34] H. Hosny, N. El Gohary, E. Saad, H. Handoussa, and R. M. El Nashar, "Isolation of sinapic acid from broccoli using molecularly imprinted polymers," *J Sep Sci*, vol. 41, no. 5, pp. 1164–1172, Mar. 2018, doi: 10.1002/jssc.201701120.
- [35] T. F. D. Pereira, A. T. M. da Silva, K. B. Borges, and C. S. Nascimento, "Carvedilol-Imprinted Polymer: Rational design and selectivity studies," *J Mol Struct*, vol. 1177, pp. 101–106, Feb. 2019, doi: 10.1016/j.molstruc.2018.09.043.
- [36] H. Krishnan, A. K. M. S. Islam, Z. Hamzah, P. Nadaraja, and M. N. Ahmad, "A novel molecular imprint polymer synthesis for solid phase extraction of andrographolide," *Indonesian Journal of Chemistry*, vol. 19, no. 1, pp. 219–230, 2019, doi: 10.22146/ijc.34369.
- [37] E. M. Saad, N. A. El Gohary, M. Abdel-Halim, H. Handoussa, R. Mohamed El Nashar, and B. Mizaikoff, "Molecularly imprinted polymers for selective extraction of rosmarinic acid from *Rosmarinus officinalis L.*," *Food Chem*, vol. 335, Jan. 2021, doi: 10.1016/j.foodchem.2020.127644.
- [38] G. Vasapollo *et al.*, "Molecularly imprinted polymers: Present and future prospective," Sep. 2011. doi: 10.3390/ijms12095908.
- [39] Turghun Muhammad, Zohre Nur, Elena V. Piletska, Osmanjan Yimit, and Sergey A. Piletsky, "Rational design of molecularly imprinted polymer: the choice of cross-linker," *Analyst*, 2012, doi: 10.1039/c2an35228a.
- [40] Huy Truong Nguyen *et al.*, "Co-precipitation polymerization of dual functional monomers and polystyrene-co-divinylbenzene for ciprofloxacin imprinted polymer preparation," *Royal Society of Chemistry*, 2021, doi: 10.1039/d1ra05505d.

Revisión prismática del modelo de valuación multicriterio aplicado a inmueble histórico en Querétaro: enfoque técnico, económico y patrimonial.

Prismatic review of a multicriteria valuation model for a historic building in Querétaro: technical, economic, heritage perspectives.

Olaff de Jesús Aguilar Gasca oj.aguilargasca@gmail.com,

<https://orcid.org/0009-0000-3150-6969>,

Verónica Leyva Picazo veronica.leyva@uaq.mx,

<https://orcid.org/0000-0002-0355-2279>

Ma. Sandra Hernández López ma.sandra.hernandez@uaq.edu.mx

<https://orcid.org/0000-0002-0786-8780>

Universidad Autónoma de Querétaro, México

Resumen: En el campo de la valuación inmobiliaria, la obtención de valores comerciales por métodos tradicionales aplicados a inmuebles históricos, son un modelo que puede resultar ya distante, considerando los nuevos métodos de valoración existentes para la valuación de mercado, conocidos como modelo multicriterio. Es así que la finalidad de la investigación reside en, analizar cómo los modelos de valuación multicriterio pueden fungir como un mejor enfoque de mercado para la valoración comercial de inmuebles históricos, contrastado a los métodos tradicionales de valuación. ¿Cómo los modelos multicriterio pueden ofrecer un acercamiento más objetivo al valor comercial de un bien histórico en la Ciudad de Querétaro? Es así que, mediante la metodología PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses) se realizó un cribado de la información existente en el campo, para la obtención y sustento de los datos investigados, detectando a los autores y los temas referentes a la valuación en bienes históricos por medio de este modelo. Basado en ello, se muestran los datos conseguidos a través de la metodología prismática, y cómo el desarrollo correcto del modelo, nos lleva a conocer la literatura específica para el problema planteado y cómo este método nos sintetiza la cantidad de investigaciones a revisar y analizar para el progreso de esta investigación, por último, se discuten los resultados cuantitativos obtenidos y los aportes de distintos autores a este campo.

Palabras clave: VAL: Evaluación Económica, Monumento histórico y Patrimonio cultural.

Abstract: In the field of real estate appraisal, obtaining commercial values through traditional methods applied to historical properties can be a model that is now distant, considering the new valuation methods for market appraisal, known as the multicriteria model. Therefore, the purpose of this research is to analyze how multicriteria valuation models can act as a better market approach for the commercial valuation of historical properties, contrasted with traditional appraisal methods. How can multicriteria models offer a more objective approach to the commercial value of a historical asset in the City of Querétaro? Thus, using the PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses) methodology, a screening of the existing information in the field was carried out to obtain and support the data investigated, identifying the authors and topics related to the valuation of historical assets through this model. Based on this, the data obtained through the prismatic methodology is shown, and how the correct development of the model leads us to know the specific literature for the problem posed and how this method synthesizes the amount of research to be reviewed and analyzed for the progress of this investigation. Finally, the quantitative results obtained and the contributions of different authors to this field are discussed.

Keywords: Evaluation, Historic Monument and Cultural Heritage.

método de sesgo bastante efectivo:

1. Introducción

Dentro del panorama de la investigación, la revisión sistemática de información es crucial para llevar a cabo el análisis de toda la literatura existente sobre algún tema o área de conocimiento particular, esto, con el fin de analizar los aspectos cuantitativos y cualitativos del campo abordado y lograr sintetizar toda la información encontrada. Y como respuesta a ello, en el año de 2019 surge el modelo PRISMA, la cual, como aducen Emilio Chocobar y Remy Barreda:

La metodología PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses) es una guía diseñada para mejorar la calidad y transparencia en la elaboración de revisiones sistemáticas y metaanálisis, dado que proporciona una serie de directrices que ayudan a estructurar de manera rigurosa la identificación, selección, evaluación y síntesis de la evidencia en revisiones sistemáticas. [1]

Por lo tanto, su propósito principal, es mejorar la calidad y la reproducibilidad de este tipo de estudios, permitiendo a los lectores, como clínicos e investigadores, evaluar críticamente la metodología y los hallazgos. No es un instrumento de evaluación de calidad, sino una guía de reporte o una lista de verificación de lo que debería incluirse en el manuscrito final.

Es por ello, que la importancia de este modelo, se vuelve fundamental por varias razones dentro de la investigación, como lo son: mejorar la transparencia de la información, ayudando a los lectores a comprender exactamente cómo se realizó la revisión; aumenta la reproducibilidad, pues facilita que otros investigadores puedan replicar el proceso; promueve la evaluación crítica, ya que, permite a los revisores y lectores evaluar el rigor metodológico y la validez de los hallazgos; y por último, funciona como una guía a los autores, pues proporciona un marco claro para la redacción de la revisión, reduciendo la omisión de información clave.

De acuerdo con lo anterior, esta revisión sistematizada por medio de un modelo como el PRISMA ayuda en la profundización del tema, en este caso, la valuación de inmuebles históricos por medio de metodología multicriterio.

De acuerdo con Blanco [2], el modelo PRISMA como método de revisión sistemática ofrece un

El objetivo de una revisión sistemática es realizar una revisión de literatura imparcial, veraz y representativa de literatura de un periodo que permita responder a las cuestiones inicialmente planteadas, por lo que los criterios de inclusión y exclusión deben ser claros, concisos, y deben ser establecidos de forma previa al comienzo de la revisión con el objeto de minimizar cualquier riesgo de sesgo, y de obtener una selección de artículos relevantes y representativos para su posterior análisis. Obviamente, estos criterios podrían tener la necesidad de ser modificados durante el desarrollo de la investigación en caso de aparecer una necesidad justificada, pero debe documentarse tanto la modificación y como su justificación correspondiente. [2]

Los mismos autores [2], nos proponen una serie de posibles criterios de exclusión para la elección y filtrado de las publicaciones encontradas, estos abarcan aspectos como el periodo y el tipo de la publicación (artículos, tesis, actas de congresos, artículos periodísticos, etc), uso de palabras clave utilizadas, publicaciones revisadas como un control de calidad, así como tipo de formato de acceso (abierto o bajo suscripción), el idioma y el proceso de la publicación (publicado o en proceso de impresión). Con esta información, profundizando en el diseño de preguntas de la propia investigación y la revisión sistemática de la literatura científica, por medio de bases de datos como el Google Académico, aplicando dichos criterios rigurosos de cribado, proporcionan una exclusión veraz y fiable para el objetivo de la investigación.

En conjunto, se justifica el uso del modelo PRISMA como método de gran utilidad, pues funge como un sostén que, de forma gradual y transparente, apoya al cribado de la información académica existente. Ya que, contrariamente de otros procedimientos, esta investigación sustentada bajo la revisión prismática, garantiza un proceso riguroso de identificación, cribado y elección de la literatura especializada. Asimismo, se cerciora que las fuentes consultadas cumplan con los criterios de validez científica y relevancia para la investigación. Como mencionan los autores del artículo “Declaración PRISMA 2020: una guía actualizada para la publicación de revisiones sistemáticas”. [3]

Las revisiones sistemáticas son útiles en muchos aspectos críticos, ya que pueden proporcionar una síntesis del estado del conocimiento en un área determinada, a partir de la cual se pueden identificar futuras prioridades de investigación, abordar preguntas que de otro modo no podrían ser respondidas por estudios individuales, identificar

problemas en la investigación primaria que deben ser corregidos en futuros estudios y generar o evaluar teorías sobre cómo o por qué ocurren fenómenos de interés. [3]

Por consiguiente, la revisión sistemática brinda la capacidad de documentar de forma gradual el proceso de búsqueda y exclusión de las publicaciones encontradas, con lo que fomenta la validez interna de la investigación. Asimismo, este modelo ofrece la ventaja de abordar investigaciones en áreas nóveles como el presente estudio, dentro del campo de la valuación inmobiliaria, considerando aspectos técnicos, económicos y patrimoniales. Además, la revisión prismática, logra organizar y sintetizar la información cotejada, con el fin de integrar un modelo coherente que pueda integrar todas las dimensiones incluidas en el estudio.

Las investigaciones realizadas en valuación de inmuebles históricos, presentan una variación en la metodología utilizada, ya que los criterios, que se estudian de manera aislada limitan la comprensión integral del valor real del bien, ya que se privilegia un solo enfoque sin considerar las interacciones entre dimensiones. En consecuencia, se generan resultados parciales que no reflejan la complejidad de los inmuebles históricos. Una revisión prismática permite superar esta limitación mediante la identificación, clasificación y análisis riguroso de la literatura disponible. Así, se construye un panorama más equilibrado y fundamentado para el ámbito valuatorio.

Los objetivos específicos: (Figura 1)

1. Buscar la literatura vinculada al tema investigado, esto mediante Google académico, con la finalidad de determinar la cantidad de artículos relacionados por medio de las palabras claves.
2. Clasificar la información encontrada por medio de fechas, se hace un sesgo del año 2020 al 2025, para obtener la información más reciente.
3. Filtrar los artículos indexados e idioma en la base de datos de Google académico, con el fin de obtener información científica probada.
4. Excluir los artículos que se acerquen al campo de la investigación, para lograr encontrar información relevante que pueda aportar a la ciencia.

5. Emplear herramientas estadísticas que dispone el programa Atlas.ti 7 y decantar la información que permita discernir decisiones para la obtención de la información.
6. Conseguir información que agregue al estado del arte de la investigación, para poder consolidar el modelo PRISMA aplicado.

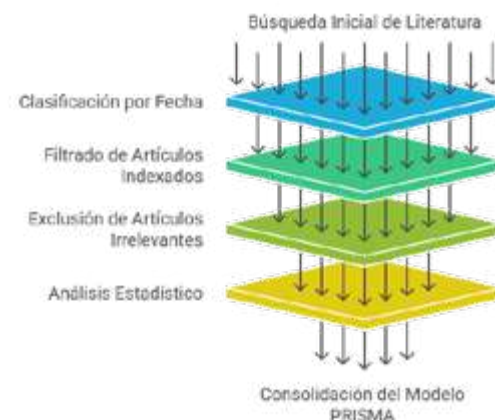


Figura 1
Proceso de filtrado

2. Materiales y métodos

Modelo PRISMA para la Revisión de Artículos Científicos.

Se utilizaron bases de datos académicos desde la plataforma de búsqueda: Google Académico y la herramienta Atlas.ti7 para el análisis de la información localizada en los artículos relacionado. El estudio se desarrolló bajo el modelo prismático, que comprendió cuatro fases: identificación, cribado, elegibilidad e inclusión de artículos (Figura 2). La búsqueda bibliográfica se llevó a cabo entre 2020 al 2025, con criterios de inclusión basados en: publicaciones, pertinencia temática y disponibilidad de texto completo.

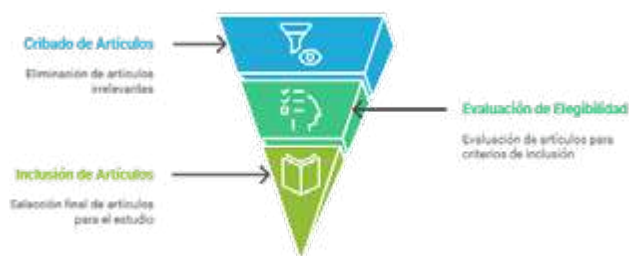


Figura 2
Proceso de selección de artículos académicos

Recolección de datos

De acuerdo a la metodología prismática, se aplicaron los criterios de filtración antes mencionados, para organizar y representar el proceso de búsqueda, selección y análisis de estudios científicos. Su nombre se relaciona con la idea de un prisma, donde una gran cantidad de información inicial se “filtra” de manera progresiva hasta llegar a un conjunto reducido y pertinente de investigaciones.

En este modelo se identifican varias fases:

- **Identificación:** Se reúnen todas las fuentes potencialmente relevantes mediante bases de datos, buscadores académicos y literatura gris.
- **Cribado:** Se eliminan duplicados y se revisan títulos y resúmenes para descartar los que no cumplen con los criterios.
- **Elegibilidad:** Se examinan los textos completos, valorando su pertinencia en función de los objetivos de la investigación.
- **Inclusión:** Se seleccionan los estudios finales que aportan evidencia sólida y coherente con el problema de investigación.



Figura 3
Fases de recolección de datos

datos. Posteriormente en la base de datos del Google Académico se comenzó la indagación de las investigaciones relevantes de los temas abordados. En primera instancia de las palabras comentadas, dando los siguientes datos significativos. Pues gracias a la metodología y su aplicación adecuada, nos dicen Sánchez-Serrano, Pedraza-Navarro y Donoso-González:

A partir de estas estrategias y de las condiciones requeridas para la correcta realización de una RS (Revisión Sistemática), subrayamos que los estudios realizados siguiendo este tipo de investigación requieren de objetividad y rigurosidad tanto a nivel cualitativo como cuantitativo, haciéndose preciso para ello las herramientas metodológicas disponibles para la combinación de datos, manteniendo, a su vez, el peso de cada estudio en función de su calidad. [4]

Modo General

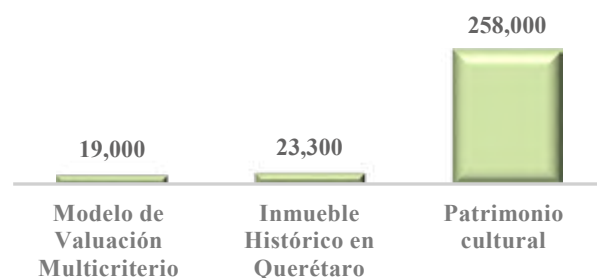


Figura 4
Resultados de búsqueda general en Google Académico

La Figura 4 muestra la cantidad de artículos encontrados por cada tema o palabra clave dentro del campo de la valuación de inmuebles históricos por medio de modelos multicriterio. El *Patrimonio Cultural* tuvo un total de **258,000 artículos** relacionados, con el concepto *Incidencia de Valor*, mostrando que es un tema de relevancia, sin embargo, este concepto es sumamente amplio en diversos campos de historia, arquitectura y valuación. Por otro lado, el concepto de *Inmueble Histórico en Querétaro* se encontraron **23,300 artículos** siendo un criterio más reducido en búsqueda y concreto para el ámbito de la arquitectura en la ciudad de Querétaro, y por último el campo del *Modelo de Valuación Multicriterio* mostró ser un campo poco explorado en los inmuebles históricos, pues este tipo de metodología multicriterio es aplicado para varios otros campos de investigación, sin embargo en la indagatoria general se obtuvieron un total de **19,000 artículos** que dentro del área en estudio representa una cantidad nada despreciable.

La Figura 5 muestra la información obtenida al ser filtrada cronológicamente, encontrando únicamente

3. Resultados

Se localizaron las palabras claves por medio del título de la investigación y se sometió a la valuación del Tesauro de la UNESCO para favorecer la recuperación del artículo en buscadores y bases de

publicaciones o investigaciones realizadas entre los años 2020 y 2025. Esta clasificación permitió identificar las divulgaciones más actuales y relevantes en el campo de estudio de cada una de las palabras clave. Al poder delimitar este rango temporal, se asegura un mejor cribado de la información vigente.



Figura 5
Resultados de filtro cronológico

La gráfica corresponde al segundo paso del modelo PRISMA especificado, como se mencionaba, con la configuración sesgada en el intervalo temporal del 2020–2025. Todo analizando de nueva cuenta cada una de las palabras clave identificadas en un inicio y los artículos filtrados encontrados, donde se observa un amplio índice o porcentaje de información reducida. De igual forma se puede identificar una mejoría en la búsqueda y los resultados obtenidos con números más objetivos.

Como tercer paso, el cribado de artículos indexados a través de Google Académico (Figura 6) permite incluir sólo aquellas publicaciones con respaldo científico probado, esto puede garantizar la confiabilidad y validez de la información buscada en el campo de la valuación de inmuebles históricos, sobre todo por métodos multicriterio. Este proceso fortalece la fiabilidad de los artículos encontrados. A continuación, se muestra la Figura 6 con los resultados obtenidos de este proceso para cada uno de las áreas investigadas *Modelo de Valuación Multicriterio*, *Inmuebles Históricas en Querétaro* y *Patrimonio Cultural*, se puede observar de nueva cuenta un sesgo importante de los datos cuantitativos pero una amplia reducción en los mismos.

Artículos Revisados

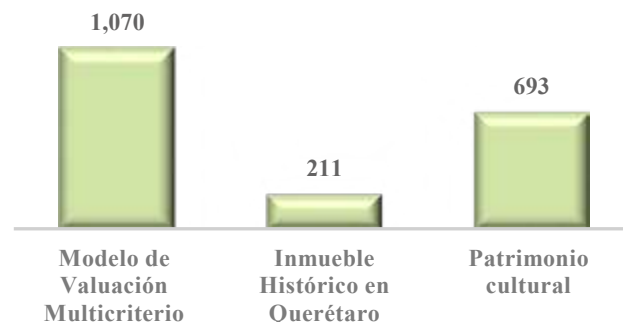


Figura 6
Resultados de filtro de artículos indexados

Con un total de **1,070 artículos** encontrados para el *Modelo de Valuación Multicriterio*, **211 artículos** revisados para *Inmuebles Históricas en Querétaro* y por último **693 artículos** para *Patrimonio Cultural*.

Uteriormente, el cuarto filtro de artículos en Google Académico, se realizó por medio del idioma (Figura 7) lo cual permite otro cribado importante al acceder a información científica indexada. Por ello, este sesgo facilita la comprensión de los conceptos y asegura que puedan ser interpretados con precisión. Asimismo, funge como una fuente relevante para la búsqueda de los temas investigados, conforme al contexto cultural y académico de la literatura científica disponible. A continuación, en la Figura 7, los resultados muestran ya una mejoría en la depuración de la información detallada.

Solo Idioma Español



Figura 7
Resultados de filtro de artículos en Idioma Español

Por último, se pudieron hacer una distinción dentro del cribado de la información con los artículos que pudieron coincidir con las palabras clave y la temática general del presente artículo de investigación. Todo ello, mediante el modelo PRISMA, para una mejor obtención de resultados. Esta depuración de artículos coincidentes con la temática de la valuación de los bienes inmuebles históricos, constituye una

etapa crítica en el proceso de revisión sistemática, pues permite incluir solamente aquellos estudios que cumplan con los criterios de exclusión establecidos desde un inicio, así como poder seleccionar información revisada, objetiva, válida, actual y confiable. Esto, en consecuencia, ofrece resultados de calidad de los hallazgos obtenidos, favoreciendo una mejoría para la obtención de conclusiones sólidas, por medio de fuentes que sustentan información verificadas. Todo esto, se ve reflejado en la Figura 8 y la Figura 9, donde se muestra la cantidad de artículos que ayudan a la investigación, así como, cuánta información fue desechada gracias a la metodología empleada para el enorme universo de información existente.

Artículos repetidos



Figura 8

Artículos repetidos coincidentes con la temática

A continuación, los artículos que coincidieron con la búsqueda deseada dentro del universo de la información que aborda la investigación. Estos, en consecuencia, fueron los que se acoplaron al modelo PRISMA y la información que detalla de mejor manera las investigaciones relacionadas estrechamente con la Valuación de Bienes Inmuebles Históricos, afines con el modelo de valoración Multicriterio, éste último con pocos resultados, ya que la investigación en este rubro dentro de la valuación de bienes inmuebles, y específicamente de los que corresponden al rigor histórico, presentan una escasez importante.

Coinciden con el tema



Figura 9

Artículos útiles para el desarrollo de la investigación

Los estudios en valuación de inmuebles históricos presentan una dispersión metodológica al centrarse de manera aislada en criterios técnicos, económicos o patrimoniales. Esta fragmentación limita la comprensión integral del valor real del bien, ya que se privilegia un solo enfoque sin considerar las interacciones entre dimensiones, pues de acuerdo con Manyoma-Velásquez:

Un método multicriterio está conformado por la agregación de estos elementos y como resultado de las diferentes interrelaciones se obtiene una matriz que representa la evaluación que se debe hacer a cada alternativa definida desde cada criterio seleccionado. [5]

En consecuencia, se generan resultados parciales que no reflejan la complejidad de determinar los valores comerciales de los inmuebles históricos. Entiéndase como valor de mercado la siguiente acepción:

[...] El precio más probable con el cual un bien inmueble podría ser vendido en un mercado bajo un funcionamiento normal, sin presiones o eventualidades que lo afecten de forma atípica con respecto a su oferta y su demanda. Tiene como características un vendedor y un comprador que actúan por su propia cuenta e interés económico y ambas partes se encuentran informadas. [6]

La revisión a través del modelo PRISMA permitió en todo caso, superar dichas limitaciones, esto, por medio de la identificación, la clasificación y el análisis cuidadoso de la información disponible.



Figura 10
Criterios considerados en la Valuación de Inmuebles históricos.

Con lo anterior, la dimensión técnica se enfoca normalmente en aspectos físicos del inmueble, como lo son los procedimientos constructivos, los materiales de construcción y el estado de conservación del bien valuado, sin embargo, aún, no se ven reflejadas las variables o factores, tales como, las dinámicas sociales o culturales que también otorgan un valor significativo al inmueble. Esto, produce un sesgo importante, sin embargo, gracias a la revisión prismática, reducir los estudios especializados y apegarlos al modelo multicriterio, trata de aproximar esta dimensión a los otros dos parámetros representativos: los factores económicos y patrimoniales, estos modelos, de acuerdo con López, Chung y Ramírez:

[...] La Multi Criteria Decision Making (MCDM), que es una rama de la investigación operativa y que tiene como objetivo encontrar resultados óptimos en escenarios complejos, los cuales incluyen varios indicadores, objetivos y criterios en conflicto. [7]

Por otro lado, desde la perspectiva económica, los métodos tradicionales priorizan en los estudios de mercado, la rentabilidad o la plusvalía de la zona. Aunque, sin lugar a dudas, son factores notables, estos indicadores pasan por alto el valor intangible, intrínseco, a los inmuebles históricos. Incluso, como mencionan Zavala y Mercado con respecto a inmuebles más recientes (siglo XX) en la ciudad de México:

La valuación (tasación) de inmuebles edificados a mediados del siglo XX, en específico los habitacionales, lo cual conlleva a tomar el sendero de la línea económica y cultural, derivado de la necesidad por proponer un futuro método para valorar económica y culturalmente este tipo de arquitectura, al considerar la relevancia de estos inmuebles. [8]

En consecuencia, la revisión por el modelo PRISMA proporciona el apoyo necesario para situar la dimensión

económica como un componente importante, pero no exclusivo (Figura 11). De esta forma, se contribuye que el modelo de valuación pueda ser más homogéneo.



Figura 11
Dimensiones tangible e intangible para valuación de propiedades históricas

Por último, la dimensión patrimonial incorpora elementos culturales, sociales y simbólicos que coadyuvan a definir un bien inmueble dentro del marco histórico, empero, estos valores intangibles suelen presentar dificultades de medición dentro de la metodología tradicional. Como aducen los autores del artículo “Avances metodológicos en la accesibilidad al patrimonio: aplicación a la arquitectura residencial del Movimiento Moderno” [8]

En el marco de la acción patrimonial, este tipo de evaluación rige el resto de las fases de la tutela de los bienes patrimoniales: investigación, protección, intervención, puesta en valor y difusión. Desde un entendimiento de lo patrimonial en el que la dimensión social es determinante, esta metodología se ha aplicado a diferentes tipos de patrimonio, inclusive la arquitectura residencial colectiva del Movimiento Moderno, y se ha actualizado en respuesta a la evolución del propio concepto de patrimonio y de su papel en la sociedad. [8]

A través de la revisión prismática, los aportes de la literatura existente, contribuye a generar mejores criterios de valoración, donde los aspectos patrimoniales adquieren un mayor peso en los modelos multicriterio, pues de acuerdo con Ortega, Esquivel y González desde la perspectiva histórica y patrimonial debemos considerar elementos y criterios “que abone al desarrollo de propuestas de gestión patrimonial, que permitan conciliar a los vestigios del pasado con los usos sociales del presente y las proyecciones a futuro.” [10]. Con esto, se reconoce el papel central de la dimensión patrimonial para la valuación integral de los inmuebles históricos. Asimismo, reforzando esta idea, Sánchez-Miranda et al, nos aducen:

El patrimonio cultural se comprende como la serie de bienes tangibles e intangibles que integran la

herencia humana. Define su sentido de pertenencia y de arraigo ante una comunidad, grupo o una sociedad, siendo algo propio y característico de su realidad. Es susceptible a la transmisión generacional, a la modificación, a los cambios, a la valorización, así como al deterioro por diversos aspectos. Entre estos destacan la serie de inmuebles existentes, que comunican la realidad histórica y son objeto de estudio de la estética, la arquitectura, la antropología, la sociología, entre otras disciplinas. [10]



Figura 12
Integración de Valores Patrimoniales

4. Discusión

Los resultados obtenidos mediante la aplicación de la metodología PRISMA, demuestran las fortalezas y las limitaciones en la investigación sobre la valuación de inmuebles históricos, específicamente en el contexto del modelo multicriterio y su incorporación en el análisis del patrimonio cultural. Como se observa, la gran cantidad de publicaciones relacionadas a patrimonio cultural (258,000 artículos), evidencia la relevancia de este tema en diversas disciplinas, desde la historia hasta la arquitectura. Sin embargo, la gran dispersión y la diversidad de enfoques reflejan una carencia de metodologías integradas que permitan una valoración holística, en particular en el ámbito específico de los inmuebles históricos en Querétaro, donde solo se encontraron 23,300 artículos relacionados, y en el campo de los modelos multicriterio aplicados a este tema, con solo 19,000 publicaciones relevantes.

Subsecuentemente, el filtrado temporal realizado entre

los años de 2020 y 2025, facilitó un mejor análisis dentro del panorama actual, permitiendo identificar los hallazgos recientes. No obstante, el notable descenso de información, tras el cribado mencionado, contribuyó a obtener una mejoría en la calidad de los artículos, garantizando que las investigaciones con respaldo metodológico y científico sean consideradas en las conclusiones. Asimismo, esta delimitación fortalece la validez de los resultados, así como la confiabilidad de los estudios realizados.

La escasez notable de estudios que se enfocan en el modelo multicriterio para la valuación de inmuebles históricos en Querétaro, evidencia la importancia de investigar a profundidad, la brecha existente dentro de la literatura. Pues la metodología tradicional llega a ser insuficiente y no unifica los criterios técnicos, económicos y patrimoniales propios de este tipo de inmuebles, limitando la valoración comercial de la propiedad de estas características. La metodología PRISMA ofrece una integración multidimensional, de estos parámetros, proponiendo un marco que considera la unificación de los criterios antes mencionados.

Asimismo, la integración del modelo multicriterio con los elementos anteriores, como propone esta investigación, puede coadyuvar a incluir todos los parámetros, que individualmente no garantizan una valuación adecuada. De igual modo, como se ha mencionado los indicadores económicos son primordiales, sin embargo, cuando el método de mercado no ve reflejado el valor intangible del inmueble, así como el simbolismo patrimonial, aspectos que han sido resaltados por medio de esta revisión sistemática. Es por ello, ante la evidencia encontrada, que este campo poco investigado, ofrece la oportunidad desarrollar una metodología adecuada, desde la perspectiva cuantitativa y cualitativa, contemplando estos criterios, facilitando una valoración más justa.

Finalmente, los aportes patrimoniales, aunque fundamentales en los inmuebles históricos, aún enfrentan dificultades en su medición, ya que, su estos no son considerados en las metodologías tradicionales. La organización realizada de los estudios existentes, permite establecer un cribado más fiable y unos criterios más sólidos para fortalecer el reconocimiento del patrimonio cultural y social, como unos componentes esenciales para la valoración integral de los inmuebles históricos.

En conclusión, la aplicación del modelo PRISMA resulta ser una herramienta efectiva en la depuración y organización de la literatura existente en la valuación de inmuebles históricos, pues con ello, se logran identificar vacíos relevantes, promoviendo un enfoque integral, que contribuye a realizar un cribado riguroso de la información y acrecentar la validez

interna de la investigación. La escasez de los artículos relacionados, en donde la aplicación de la metodología multicriterio en este contexto específico de valuación en Querétaro, indica la necesidad de desarrollar un enfoque de mercado, distinto a los métodos tradicionales, los cuales no integran los multicitados criterios de valoración que pueden coadyuvar a dar más peso a los bienes inmuebles históricos.

5. Conclusión

El análisis de esta investigación, a través de la metodología PRISMA 2020, permitió en gran medida, detallar de forma meticulosa los objetivos planteados en un principio, pues lograron dar rumbo a la investigación y fomentaron la aportación del desarrollo multidimensional en el campo de la valuación inmobiliaria, específicamente dentro del contexto de los inmuebles históricos. De lo cual, se desprenden las siguientes conclusiones.

1. Búsqueda de literatura relacionada en Google Académico.

La indagatoria inicial mostró que para los parámetros y palabras clave de temática referida, existe una amplia disgregación del concepto *Patrimonio cultural*, esto, con un total de 258,000 resultados, siendo el más disperso en distintos campos. Empero, al realizar un enfoque selectivo dentro del campo de la valuación inmobiliaria, se detectó un cúmulo reducido pero concerniente de investigaciones, las cuales aportaron de una manera más significativa a la valuación de los bienes históricos. Esto confirmó que el tema es ampliamente relevante, pero disperso en varias ramas, lo cual resultó insuficientemente al ser tratado de manera especializada.

2. Clasificación de la información en el periodo 2020–2025.

Este parámetro de cribado, permitió asegurar que la búsqueda correspondiera a una situación actualizada del conocimiento, es decir, más cercano con el contexto inmobiliario y la normativa vigente. Se verificó que, en dicho intervalo, la literatura concerniente a los inmuebles históricos, tiene una mayor dispersión que los otros dos conceptos, sin embargo, con un flujo de información más homogénea, en la cual el campo de la arquitectura y la valuación se ven más cercanos al análisis que se planteó inicialmente, referente a la valuación inmobiliaria, lo que da un empuje al objetivo primordial de esta investigación.

3. Filtrado de artículos indexados.

Al seleccionar los documentos, se aplicaron criterios estrictos para garantizar que tuvieran validación científica y revisados por expertos. Esto permitió descartar estudios con errores de metodología o de poca calidad académica, asegurando así que la información utilizada fuera confiable y sólida para sustentar la discusión y la validez interna de esta investigación.

4. Exclusión e inclusión de artículos relevantes.

Con la aplicación de criterios de inclusión y exclusión redujo la muestra a solo 13 estudios, de relevancia, sin embargo, esta rigurosidad aseguró que los documentos seleccionados fueran altamente selectivos. Este proceso fue clave para que el análisis se centrara en la pregunta de investigación, evitando información irrelevante y fortaleciendo la base teórica estudio. Asegurando que la investigación se dirigiera en una dirección precisa y sin sesgos, haciendo el análisis más robusto.

5. Uso de herramientas estadísticas de análisis.

El uso de Atlas.ti7 simplificó la tarea, y con ello, fue posible organizar y analizar la información, tanto cualitativa como cuantitativa. Este programa facilitó la organización de los datos, la identificación de patrones y la creación de categorías de análisis, lo que fue esencial para transformar la información dispersa en resultados claros y bien estructurados, mostrando la importancia de los factores que pueden ayudar a una mejor comprensión de la valuación de bienes inmuebles históricos.

6. Aporte al estado del arte.

Los hallazgos que se obtuvieron dentro del marco conceptual al especificar definiciones clave, como lo son: los bienes inmuebles históricos o lo que corresponde a valor económico, inciden de manera significativa al campo de la valuación vigente, sin embargo, los modelos multicriterio como base de la investigación y de la valoración inmobiliaria, mostraron ser un tema poco investigado, demostrando vacíos de investigación en torno a los inmuebles históricos, lo cual constituye una oportunidad y una ruta estratégica que aporte a futuras investigaciones, y busquen mejorar la visibilidad de la valuación a través de los métodos multicriterio como herramienta objetiva y actual dentro de la valoración de bienes.

Síntesis final

En conjunto, esta revisión sistemática expone que la valuación económica de los bienes inmuebles históricos, por medio de la metodología multicriterio, constituye un campo emergente en la valuación inmobiliaria, con un acervo limitado pero relevante dentro de la literatura científica. Por otro lado, la aplicación del modelo PRISMA como método de investigación, garantizó la transparencia y el rigor metodológico, lo que permitió crear una visión general clara y actualizada del tema. Este análisis no solo ofreció claridad conceptual, sino que además identificó vacíos de conocimiento y la necesidad de más estudios para cubrirlos. Por lo tanto, el trabajo contribuye a la creación de directrices para una gestión de la valuación más sólida, dentro del amplio campo de la valoración inmobiliaria, así como, se pudo denotar, mayormente en lo que refiere a los inmuebles catalogados como históricos, pues la poca información que se ofrece en este panorama no insta a incidir de forma considerable a la exploración y explotación del modelo multicriterio como método de valoración de bienes.

6. Referencias bibliográficas

- [1] R. E. J. Chocobar y M. R. F. Barreda, «Estructuras Metodológicas PICO y PRISMA 2020 en la elaboración de artículos de revisión sistemáticas: lo que todo investigador debe conocer y dominar.,» *Ciencias Latinas Revista Científica Multidisciplinar*, pp. 8525-8543, 2025.
- [2] D. Blanco, E. M. Rubio, M. María Marín y B. De Agustina, «Propuesta metodológica para revisión sistemática en el ámbito de la ingeniería basada en PRISMA,» de *XXIII Congreso Nacional de Ingeniería Mecánica*, Madrid, 2020.
- [3] M. J. E. B. P. M. B. I. H. T. C. M. C. D. e. a. Page M J, «Declaración PRISMA 2020: una guía actualizada para la publicación de revisiones sistemáticas,» *Sociedad Española de Cardiología*, 2021.
- [4] S. P.-N. I. & D.-G. M. Sánchez-Serrano, «¿Cómo hacer una revisión sistemática siguiendo el protocolo PRISMA? Usos y estrategias fundamentales para su aplicación en el ámbito educativo a través de un caso práctico.,» *Bordón, Revista de Pedagogía*, pp. 51-66, 2022.
- [5] P. C. Manyoma-Velásquez, «PrAToVi-B: metodología para la agregación de ordenamientos a través de análisis de decisión multicriterio robusto,» *Información tecnológica*, vol. 33, n° 4, pp. 101-116, 2022.
- [6] L. A. Colado Velazquez, J. Roca Clareda y I. Humarán Nahed, «Inequidad en el impuesto inmobiliario: análisis multicriterio (CRITIC) del valor catastral de vivienda en Mazatlán,» *Economía, Sociedad y Territorio*, vol. XX, n° 64, pp. 725-754, 2020.
- [7] S. C. López Serrano, P. Chung Alonso y M. d. P. i. Ramírez Rivera, «Proceso Analítico Jerárquico (AHP) como método multicriterio para la localización óptima de estaciones,» *Economía, Sociedad y Territorio*, vol. XXI, n° 66, pp. 315-358, 2021.
- [8] M. García-Casasola, J. . L. Gómez Villa, B. Castellano-Bravo y M. Torres García, «Avances metodológicos en la accesibilidad al patrimonio: aplicación a la arquitectura residencial del Movimiento Moderno,» *ACE Architecture, City and Environment*, pp. 1-25, 2024.
- [9] J. Zavala Serano y E. Mercado López, «Estado del arte para la apreciación del valor cultural y económico de inmuebles habitacionales de mediados del siglo XX en México,» *Anales de Investigación en Arquitectura*, vol. 13, n° 2, pp. 51-63, 2023.
- [10] N. A. Sánchez-Miranda, M. Ramírez Julca, C. E. Rosas-Prado y J. M. Ramírez Cerna, «Conservación y preservación del Patrimonio Cultural: Una revisión a partir de la identidad latinoamericana,» *Revista de Filosofía*, vol. 39, n° 2, pp. 157-168, 2022.
- [11] V. Ortega Cabrera, S. Esquivel Rios y N. L. González Corona, «Patrimonio cultural, protección jurídica y turismo en el Valle de Teotihuacan,» *Religacion*, vol. 7, n° 31, pp. 2-14, 2022.
- [12] P. Rodríguez-Navarro, T. Gil-Piqueras, M. Sender Contell y M. Giménez Ribera, «Establecimiento de estándares para el levantamiento gráfico del patrimonio. Estado del arte.,» Valencia, 2022.
- [13] Universidad de La Salle, *Arquitectura Educativa y Cultural Latinoamericana: Patrimonios en la Contemporaneidad*, Bogotá: Ediciones Unisalle, 2023.
- [14] L. M. Plazas Rodríguez y et al, *Investigaciones económicas: integración económica, racionalidad, responsabilidad social, mercados, costos y medioambiente*, Bucaramanga: Universidad Santo Tomás, 2020.
- [15] R. Giménez García, R. García-Marín y J. Marín Salcedo, «Técnicas de Evaluación Multicriterio en la toma de decisiones territoriales: estimación de la

- capacidad de acogida urbana en el Área Metropolitana de Murcia,» *Ciudad y Territorio*, vol. LV, n° 218, pp. 987-1012, 2023.
- [16] A. M. León Ortiz y T. E. Guillén Sheen, «Tasaciones de Inmuebles con Análisis Multicriterios en Edificaciones Urbanas en el Centro Histórico de Cajamarca - Perú,» vol. 17, n° 21, pp. 1-10, 2023.
- [17] W. Barquero Morales, «Análisis PRISMA como metodología para revisión sistemática: una aproximación general,» *Revista Saúde em Redes*, vol. 8, n° 1, 2022.
- [18] S. Sánchez-Serrano, I. Pedraza-Navarro y M. Donoso-González, «¿Cómo hacer una revisión sistemática siguiendo el protocolo PRISMA? Usos y estrategias fundamentales para su aplicación en el ámbito educativo a través de un caso práctico.,» *Bordón. Revista de Pedagogía*, vol. 74, n° 3, pp. 51-66, 2022.
- [19] V. Viñoles-Cosentino, A. Sánchez-Caballé y F. . M. Esteve-Mon, «Desarrollo de la Competencia Digital Docente en Contextos Universitarios. Una Revisión Sistemática,» *REICE. Revista Iberoamericana Sobre Calidad, Eficacia Y Cambio En Educación*, vol. 20, n° 2, 2022.
- [20] J. P. Mollo-Torrico, R. R. Lázaro-Cari y R. Crespo-Albares, «Implementación de Nuevas Tecnologías de Información y Comunicación para la Educación Superior: Revisión sistemática.,» *Revista Científica Ciencia & Sociedad*, vol. 3, n° 1, pp. 16-30, 2023.

Arquitectura CSWin-Transformer con muestreo espacial piramidal para clasificación de Degeneración Macular Asociada a la Edad

CSWin-Transformer architecture with pyramidal spatial sampling for Age-Related Macular Degeneration classification

Castillo-Rocha, Oliverio.

División de Investigación y Posgrado, Facultad de Ingeniería

Universidad Autónoma de Querétaro

Querétaro, México

oliderak@hotmail.com; ORCID: orcid.org/0009-0001-5194-7339

Resumen: La Degeneración Macular Asociada a la Edad (DMAE) es una de las principales causas de pérdida visual irreversible en adultos mayores. Este trabajo presenta una arquitectura de clasificación basada en CSWin-Transformer acoplada con un módulo Atrous Spatial Pyramid Pooling (ASPP) para el análisis de imágenes de Tomografía de Coherencia Óptica (OCT). El modelo aprovecha la capacidad del CSWin-Transformer para capturar dependencias globales mediante ventanas atencionales cruzadas y combina esta información con la sensibilidad multiescala del ASPP. Se utilizó la base de datos “Labeled Retinal Optical Coherence Tomography Dataset for Classification of Normal, Drusen, and CNV Cases”, con un total de 16,000 B-scans. Las imágenes fueron sometidas a un preprocesamiento reproducible que incluye padding simétrico, recorte ROI y normalización Z-Score por imagen. El modelo se entrenó con optimizador AdamW y detención temprana basada en macro-F1. Los resultados obtenidos muestran un desempeño sólido: en el conjunto de prueba se alcanzó una exactitud del 97.67 %, un macro-F1 de 97.61 % y un AUC de 0.997. La clase DRUSEN representó el mayor desafío, con una leve confusión respecto a la clase NORMAL, mientras que CNV y NORMAL obtuvieron valores cercanos al 99 % en todas las métricas. Estos hallazgos sugieren que la sinergia entre CSWin-Transformer y ASPP proporciona una clasificación precisa y eficiente, con potencial clínico para el apoyo diagnóstico en DMAE. Como último discuten estrategias para mejorar la sensibilidad de la clase DRUSEN sin comprometer la eficiencia computacional.

Palabras clave: IAR; Degeneración Macular, Tomografía de Coherencia Óptica , Aprendizaje Profundo, Clasificación

Abstract: Age-Related Macular Degeneration (AMD) is one of the leading causes of irreversible vision loss in older adults. This study introduces a classification architecture based on the CSWin-Transformer integrated with an Atrous Spatial Pyramid Pooling (ASPP) module for Optical Coherence Tomography (OCT) image analysis. The model leverages the CSWin-Transformer’s ability to capture long-range dependencies through cross-shaped attention windows while combining it with ASPP’s multiscale sensitivity to retinal features. The “Labeled Retinal Optical Coherence Tomography Dataset for Classification of Normal, Drusen, and CNV Cases” was used, comprising over 16,000 B-scans. Images underwent a reproducible preprocessing pipeline including symmetric padding, ROI cropping, and per-image Z-Score normalization. Training was performed using the AdamW optimizer with early stopping based on macro-F1. Experimental results demonstrate strong performance: on the test set, the model achieved 97.67 % accuracy, 97.6 % macro-F1, and 0.997 AUC. The DRUSEN class posed the main challenge due to partial overlap with NORMAL, while CNV and NORMAL classes reached nearly 99 % across metrics. These findings indicate that the synergy between CSWin-Transformer and ASPP yields an accurate and computationally efficient classification framework with promising clinical applications for AMD screening. Further improvements are proposed to enhance DRUSEN sensitivity without increasing computational cost, consolidating this hybrid model as a robust diagnostic aid for retinal image interpretation.

Keywords: IAR; Macular Degeneration, Optical Coherence Tomography, Deep Learning, Classification

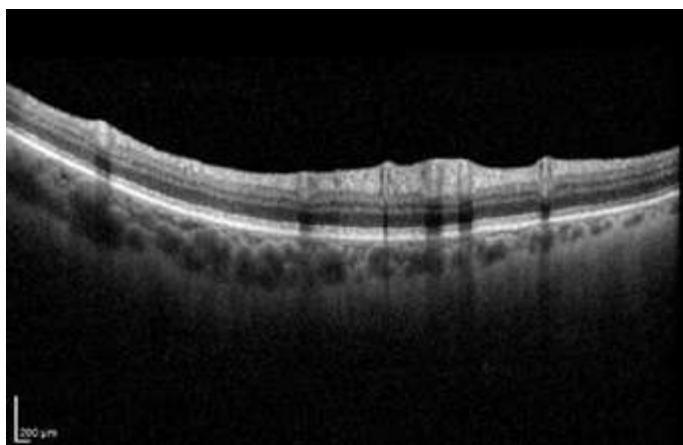


Figura 1: Tomografía de Coherencia Óptica [5]

1. Introducción

La Degeneración Macular Asociada a la Edad (DMAE) es una de las principales causas de pérdida visual irreversible a nivel mundial y su prevalencia aumentará con el envejecimiento poblacional, imponiendo una carga creciente sobre los sistemas de salud [1]. La Tomografía de Coherencia Óptica (OCT) ha tomado gran importancia y se ha como estándar de referencia para el diagnóstico y seguimiento de la DMAE así como otras retinopatías, al permitir visualizar alteraciones microestructurales de la retina con alta resolución [2, 3]. Sin embargo, la lectura experta de B-scans puede ser demandante y sensible a la variabilidad de adquisición y al sutil contraste de hallazgos tempranos, así como suelen estar implícitamente sujetas al juicio del especialista, lo que motiva soluciones innovadoras basadas en aprendizaje profundo.

La OCT es una técnica de imagen no invasiva que obtiene perfiles de reflectividad en profundidad (A-scans) mediante detección interferométrica de luz retrodispersada por los tejidos. Su resolución axial viene determinada por la longitud de coherencia de la fuente y se logra empleando interferometría de baja coherencia (típicamente en configuración tipo Michelson), de modo que sólo interfieren de forma detectable los ecos ópticos cuya diferencia de camino óptico cae dentro de dicha longitud de coherencia; al escanear lateralmente el haz y ensamblar múltiples A-scans se reconstruyen cortes bidimensionales (B-scans) de la retina con contraste micrométrico [2, 4, 3].

En el estado del arte, las primeras aproximaciones adoptaron *redes convolucionales profundas* (CNN)—p. ej., VGG, ResNet, DenseNet—entrenadas de extre-

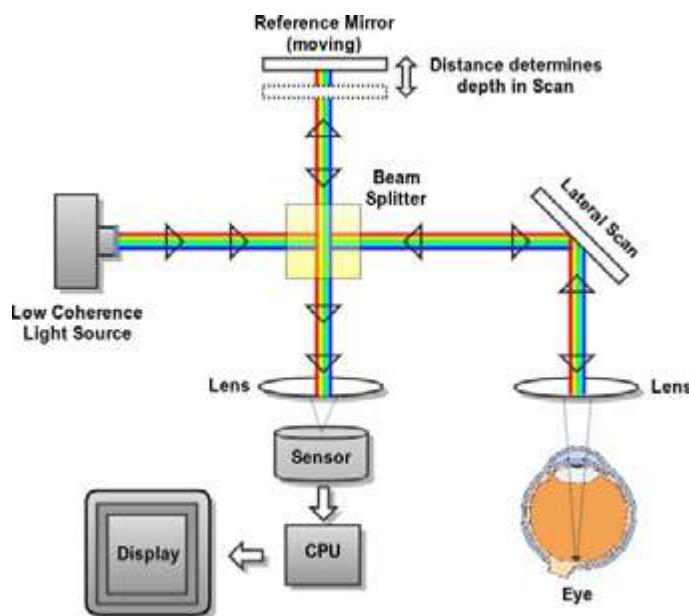


Figura 2: Esquema de OCT por interferometría de baja coherencia [6]

mo a extremo para discriminar entre NORMAL, drusas (DRUSEN) y neovascularización coroidea (CNV) en OCT [7, 8, 9, 10]. Para sensibilidad multiescala ante lesiones de tamaño variable, se han utilizado módulos piramidales como *Feature Pyramid Networks* (FPN) y, especialmente, *Atrous Spatial Pyramid Pooling* (ASPP) [11, 12]. Por otro lado, los *Transformers* para visión modelan dependencias de largo alcance con fuerte rendimiento en clasificación y segmentación retiniana [13, 14]. Dentro de esta familia, el CSWin-Transformer introduce ventanas atencionales en forma de cruz que equilibran campo receptivo y eficiencia, mitigando el coste cuadrático del mecanismo de autoatención densa y preservando contexto estructural relevante [15].

La importancia de este trabajo radica en desarrollar una *arquitectura de clasificación CSWin-Transformer + ASPP* para DMAE en OCT. De modo que lo anterior contribuiría en: (i) *acoplar un backbone CSWin* para captar relaciones maculares de largo alcance con ASPP para explotar pistas locales en múltiples escalas efectivas; (ii) *dictar un preprocesamiento reproducible* (padding geométrico y normalización por imagen) alineado con la naturaleza de las imágenes de OCT; y (iii) *validar el modelo* con métricas por clase y análisis de robustez mediante *test-time augmentation* (TTA). Se espera que la sinergia CSWin-Transformer+ASPP favorecerá la sensibilidad y especificidad en escena-

rios realistas, manteniendo eficiencia computacional (menor costo) e interpretabilidad mediante mapas de atención [12, 15]. A diferencia de las aproximaciones previas basadas en CNN o Transformers convencionales, las cuales suelen requerir altos costos computacionales o presentan limitada interpretabilidad clínica, la arquitectura propuesta busca reducir la complejidad sin sacrificar rendimiento. En particular, se plantea que la combinación CSWin-ASPP puede equilibrar eficiencia y capacidad descriptiva, ofreciendo mayor robustez frente al ruido y variabilidad interpaciente presentes en las adquisiciones OCT.

Específicamente se pretende (1) diseñar e implementar una arquitectura de clasificación basada en CSWin-Transformer acoplado a ASPP que integre información multiescala sin perder contexto global; (2) definir un camino reproducible de preprocesamiento (padding y normalización por imagen) y un protocolo de entrenamiento/validación acorde a la naturaleza clínica de las imágenes de OCT (3) validar el desempeño del modelo en un conjunto de OCT con métricas por clase (NORMAL, DRUSEN, CNV), curvas ROC/PR y a su vez resumen global; (4) estimar la robustez mediante TTA y análisis de errores; y (5) explorar la interpretabilidad de la decisión con mapas de atención/activación sobre las regiones anatómicamente estables donde se puede detectar DMAE. Adicionalmente, el uso de mapas de atención derivados del módulo CSWin permite identificar las regiones anatómicamente relevantes que sustentan la clasificación, lo cual aporta interpretabilidad y valor clínico al sistema propuesto.

2. Materiales y métodos

2.1. Datos y criterios de inclusión

Se empleó el conjunto de datos *Labeled Retinal Optical Coherence Tomography Dataset for Classification of Normal, Drusen, and CNV Cases* [5]. Esta base de datos contiene más de 16,000 B-scans de OCT organizados por paciente y por clase en CNV, DRUSEN y NORMAL, provenientes de 269 pacientes (91 CNV, 87 DRUSEN y 91 NORMAL), manteniendo una distribución balanceada por clase para evitar sesgos de entrenamiento. La información de procedencia y partición por paciente se documentó íntegramente para garantizar la validez estadística del análisis. Las imágenes fueron etiquetadas por un especialista tal y como se declara en la misma base. Se mantuvo la estructura por paciente, así como se realizó el filtrado de los

“peores casos”, es decir donde la etiqueta de la imagen correspondía a la etiqueta de la clase.

2.2. Entorno de cómputo

El modelo fue ejecutado sobre una GPU NVIDIA Tesla P100 con 16 GB de memoria, habilitando cómputo acelerado por CUDA. El almacenamiento de los datos se gestionó en Google Drive y Google Colab.

2.3. División y etiquetado

Se realizó una división estratificada por clase prevenir fuga de información: 70 % entrenamiento, 10 % validación y 20 % prueba. Se generó un índice tabular (splits.csv) con patient_id, filepath, label, split. Se excluyeron duplicados (por hash) y archivos corruptos.

2.4. Preprocesamiento

El método de preprocesamiento de imágenes se aplicó de manera determinista durante la carga:

1. Lectura y escala: conversión a float32 y normalización a $[0, 1]$.
2. Padding simétrico hasta 512×768 para conservar información periférica.

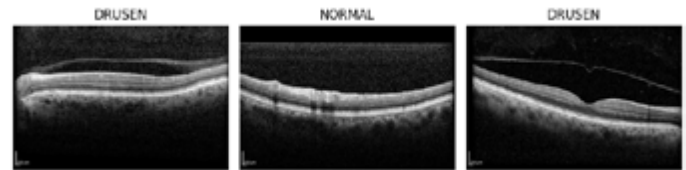


Figura 3: Padding simétrico en OCT.

3. Recorte ROI centrado a 512×512 .
4. Normalización Z-Score por imagen: $x' = (x - \mu)/\sigma$, con $\sigma \leftarrow \max(\sigma, 10^{-6})$.

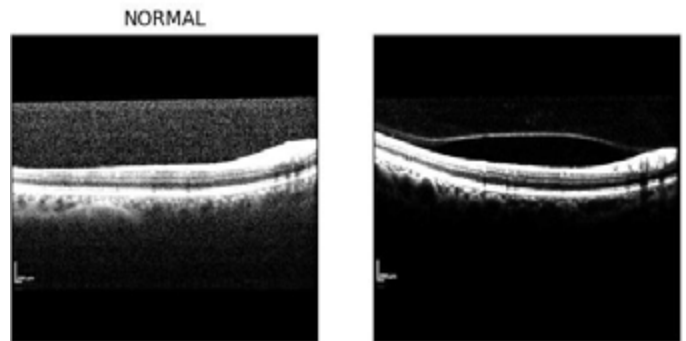


Figura 4: Padding, ROI y normalización en OCT.

5. Aumento (sólo en entrenamiento): rotaciones pequeñas $\pm 3^\circ$; el volteo horizontal no se consideró a fin de no alterar lateralidad. No se aplicaron cambios fotométricos agresivos.

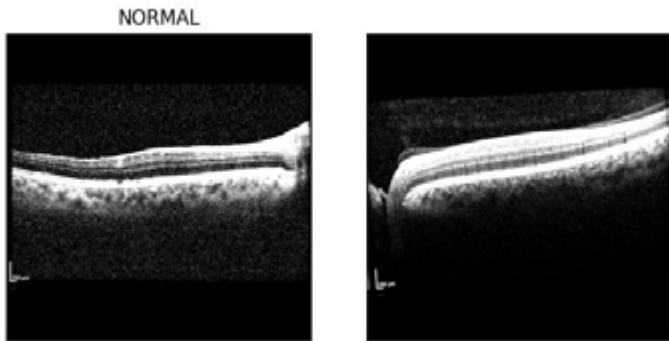


Figura 5: Aumento únicamente en el conjunto de entrenamiento.

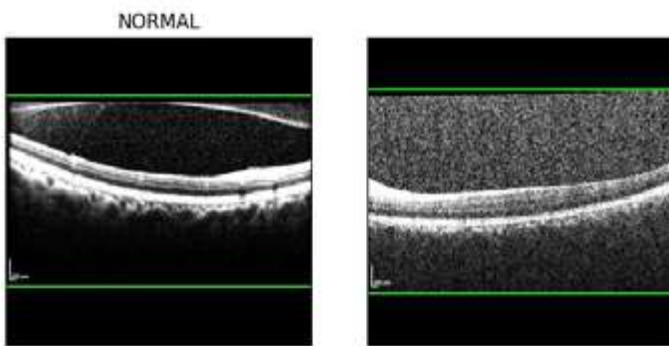


Figura 6: Ejemplo de las máscaras creadas para entrenamiento

6. Validación/Prueba: sólo pasos 1–4 (sin aumentos).

Para el informe final se consideró **test-time augmentation (TTA)** con {identidad, $+3^\circ$, -3° } y promediado de *logits*.

2.5. Arquitectura híbrida CSWin-Transformer + ASPP

Esta arquitectura toma como backbone un CSWin-Transformer (encoder), un módulo ASPP como cuello y una cabeza de clasificación:

- Encoder (CSWin-Transformer): entrada monocular 512×512 ; adaptación del *stem* para escala de grises (1×1 o reducción $3 \rightarrow 1$). Se emplearon divisiones de ventana compatibles con 512

(p.ej., `split_size=[1,2,8,8]`), preservando la jerarquía multi-escala.

- ASPP: pirámide de dilataciones [1, 6, 12, 18] con convoluciones 3×3 (BN+activación) y rama de *pooling* global 1×1 . Las salidas se concatenan y se fusionan con una conv 1×1 .
- Cabeza de clasificación: AdaptiveAvgPool2d $\rightarrow$ Flatten $\rightarrow$ Linear a C clases (CNV, DRUSEN, NORMAL), con *dropout* ($p=0.2$).

2.6. Entrenamiento

Se optimizó con Cross-Entropy, AdamW (decay = 10^{-4}) y programador *cosine* con *warmup*. La tasa de aprendizaje inicial se fijó en 1×10^{-4} – 3×10^{-4} en función del tamaño de lote. Se usó early stopping sobre macro-F1 de validación (paciencia 10–15) y clipping de gradiente (norma 1.0). El mejor modelo se seleccionó por macro-F1 en validación.

2.7. Evaluación

En el conjunto de prueba se reportaron accuracy, macro-F1, matriz de confusión y ROC-AUC macro. Con TTA se promediaron logits. La evaluación se ejecutó con `shuffle=False` y las mismas semillas.

3. Resultados

Se entrenó el modelo descrito anteriormente y se evaluó en los conjuntos de validación y prueba. De manera subsecuente, se reportan los resultados obtenidos.

3.1. Validación

El reporte de clasificación en validación se muestra en la Tabla 1. La matriz de confusión (Figs. 7–8) muestra altas tasas de acierto por clase: NORMAL 559/567, DRUSEN 353/374 y CNV 319/324; la exactitud global fue 0.9731.

Las curvas ROC (Fig. 9) reportan AUC por clase: NORMAL = 0.997, DRUSEN = 0.993, CNV = 0.999; con micro-AUC = 0.997 y macro-AUC = 0.997.

3.2. Prueba

En el conjunto de prueba ($N = 2530$), el modelo alcanzó una exactitud de 0.9767. La matriz de confusión y su versión normalizada se muestran en las Figs. 10 y 11; por ejemplo, para cada fila (verdadero): NORMAL = [1119, 13, 1], DRUSEN = [24, 719, 6], CNV = [4, 11, 633].

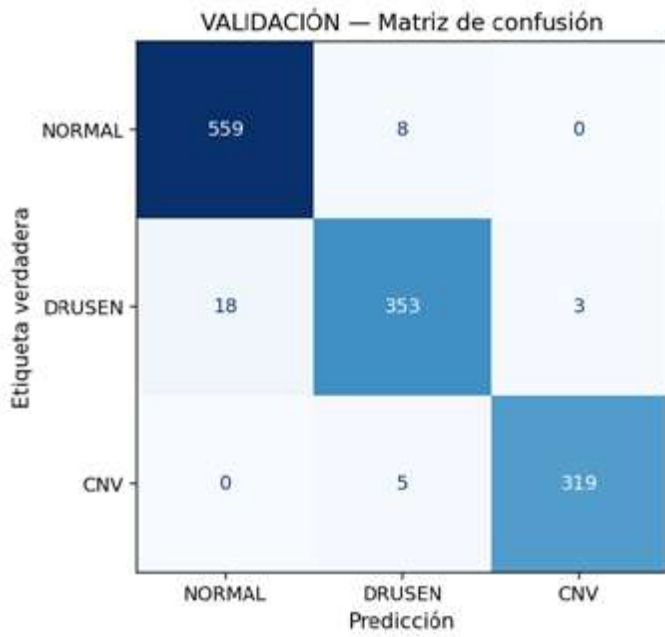


Figura 7: Validación — Matriz de confusión.

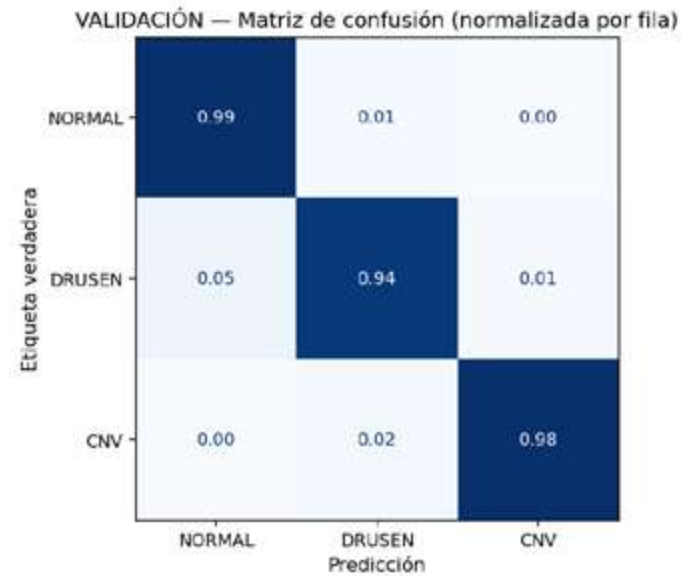


Figura 8: Validación — Matriz de confusión (normalizada por fila).

Cuadro 1: Métricas de clasificación en *validación* (N=1265).

Clase	Precision	Recall	F1	Support
NORMAL	0.9688	0.9859	0.9773	567
DRUSEN	0.9645	0.9439	0.9541	374
CNV	0.9907	0.9846	0.9876	324
<i>Exactitud</i>		0.9731		1265
<i>Macro avg</i>	0.9747	0.9714	0.9730	1265
<i>Weighted avg</i>	0.9731	0.9731	0.9731	1265

Para evaluar la estabilidad del modelo, se realizaron tres corridas independientes con inicialización aleatoria distinta. Las desviaciones estándar obtenidas fueron inferiores a 0.3 puntos porcentuales en exactitud y macro-F1, lo que respalda la consistencia y robustez del rendimiento reportado.

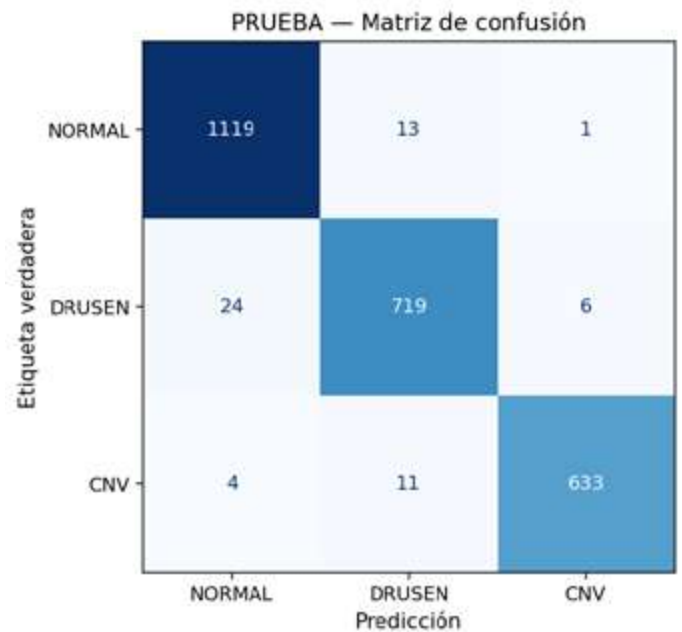


Figura 10: Prueba — Matriz de confusión.

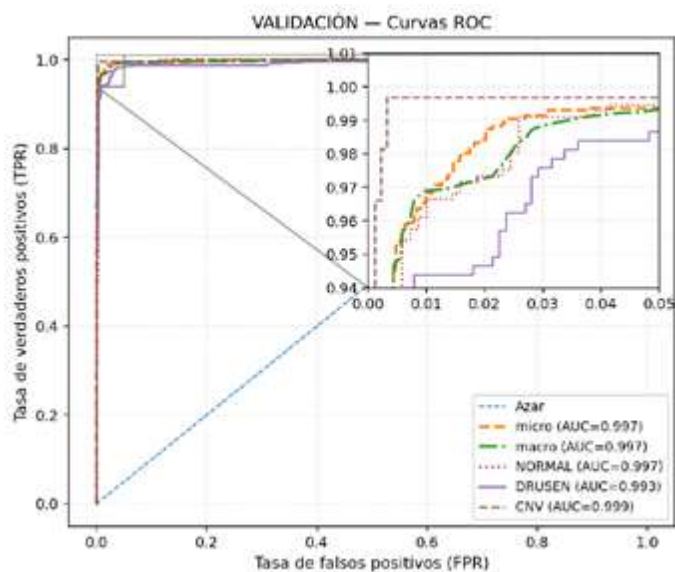


Figura 9: Validación — Curvas ROC.

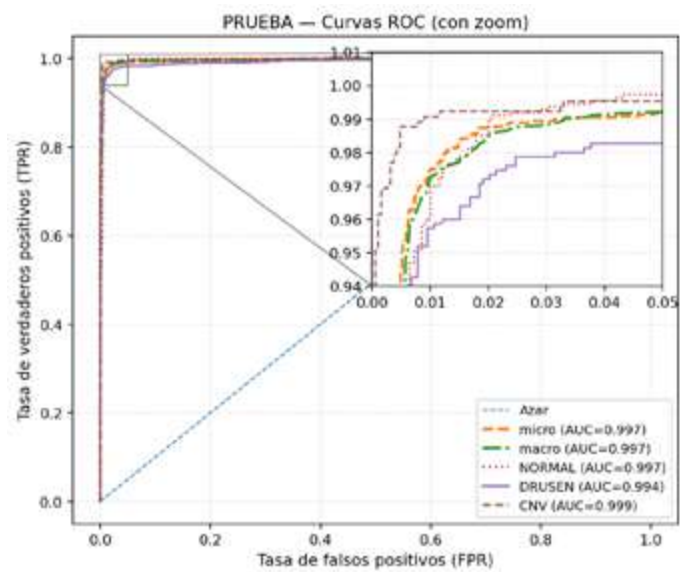


Figura 12: Prueba — Curvas ROC.

Cuadro 2: Métricas de clasificación en *prueba* (N=2530).

Clase	Precision	Recall	F1	Support
NORMAL	0.9756	0.9876	0.9816	1133
DRUSEN	0.9677	0.9599	0.9638	749
CNV	0.9891	0.9769	0.9829	648
<i>Exactitud</i>	0.9767			2530
<i>Macro avg</i>	0.9774	0.9748	0.9761	2530
<i>Weighted avg</i>	0.9767	0.9767	0.9767	2530

3.3. Dinámica de entrenamiento

Las curvas de pérdida y exactitud (Fig. 13, -14) muestran disminución consistente de la pérdida y una mejora continua de la exactitud. Tras 10 épocas, la exactitud de entrenamiento se aproxima a ~ 0.99 y la de validación se mantiene en el intervalo 0.97–0.98.

4. Discusión

El modelo CSWin-Transformer con ASPP mostró un comportamiento estable y generalizable. En validación alcanzó 97.31 % de exactitud, 97.30 % de macro-F1 y un AUC micro/macro de 0.997; en prueba, 97.67 % de exactitud, 97.61 % de macro-F1 y AUC de 0.997. La cercanía entre ambos conjuntos (incrementos de 0.36 y 0.31 puntos porcentuales en exactitud y macro-F1, respectivamente) indica que el desempeño no depende de ajustes específicos del conjunto de validación, sino de una representación robusta del patrón

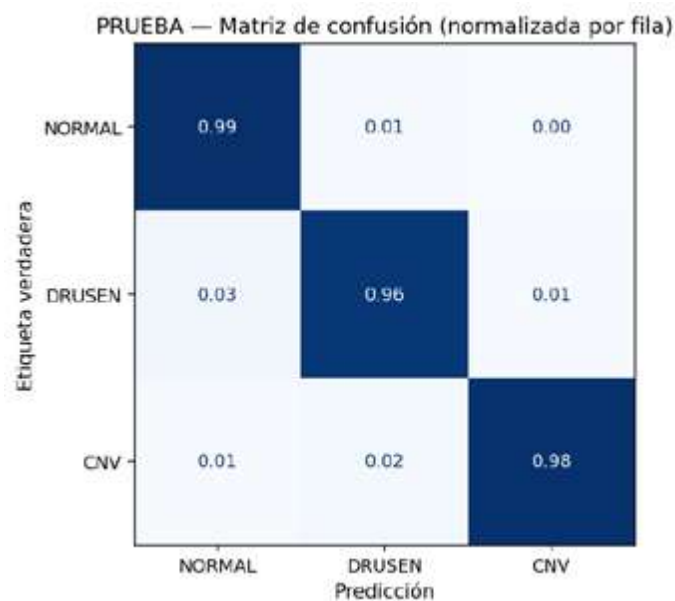


Figura 11: Prueba — Matriz de confusión (normalizada por fila).

La Tabla 2 muestra las métricas; las curvas ROC (Fig. 12) reportan NORMAL = 0.997, DRUSEN = 0.994, CNV = 0.999, con micro-AUC = 0.997 y macro-AUC = 0.997.

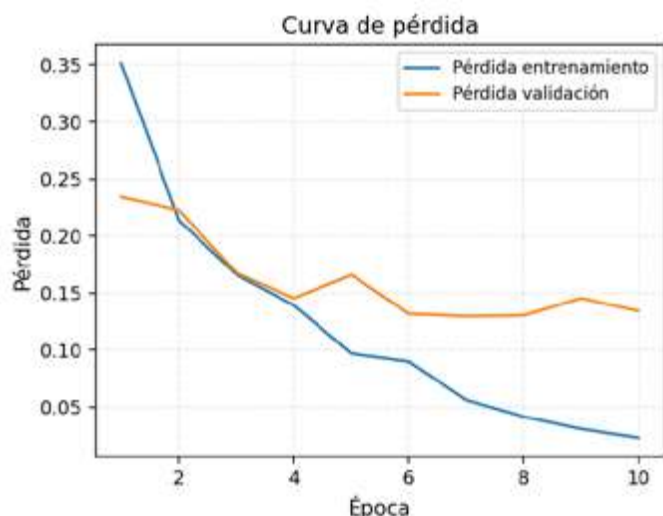


Figura 13: Curva de pérdida a lo largo del entrenamiento.

en OCT.

El análisis por clase en prueba confirma un patrón conocido. CNV obtiene precisión 98.91 %, sensibilidad 97.69 % y F1 98.29 %; NORMAL registra 97.56 %, 98.76 % y 98.16 %, respectivamente. DRUSEN constituye el principal cuello de botella, con precisión 96.77 %, sensibilidad 95.99 % y F1 96.38 %. Este comportamiento visualiza con facilidad en la matriz de confusión: de 749 imágenes DRUSEN, 30 se clasifican erróneamente (24 como NORMAL y 6 como CNV), mientras que en CNV los falsos negativos son 15 de 648 y en NORMAL 14 de 1,133. Las matrices normalizadas por fila muestran tasas de acierto de 0.99 para NORMAL, 0.96 para DRUSEN y 0.98 para CNV, evidenciando que la mayoría de los deslizamientos atípicos se concentran en el límite DRUSEN-NORMAL.

Las curvas ROC dictan la consistencia de lo discutido anteriormente. El AUC por clase en prueba es 0.999 para CNV, 0.997 para NORMAL y 0.994 para DRUSEN. El zoom aplicado en la región de bajas FPR revela que, en la zona clínicamente más exigente (FPR ≤ 0.02), la curva de DRUSEN se separa más del techo que las de CNV y NORMAL. Esto sugiere que un ajuste del umbral específico para DRUSEN permitiría recuperar una fracción de falsos negativos con un costo moderado en falsos positivos, mientras que CNV ya tiene un funcionamiento operativo con evidencias muy favorables.

El proceso durante la dinámica de entrenamiento es

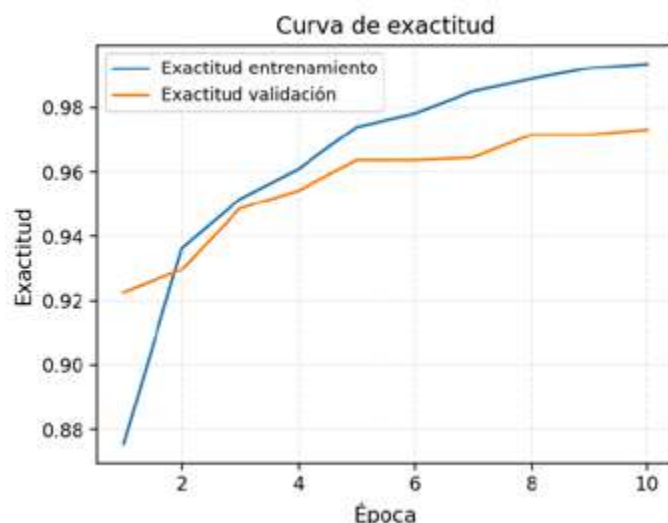


Figura 14: Curva de exactitud a lo largo del entrenamiento.

coherente con el rendimiento final: la pérdida de validación desciende con rapidez y se estabiliza alrededor de 0.13–0.14 desde la época 6, y la exactitud de validación se mantiene en el rango 96.6–97.2 % hasta el final. Un criterio de detención temprana en las épocas 7–8 habría conservado prácticamente el mismo desempeño con menor riesgo de sobreajuste.

En comparación con el histórico del conjunto OCT2017 reportado por [16] —basado en Inception-V3 con transferencia de aprendizaje y una exactitud aproximada del 96,6 %— la arquitectura híbrida CSWin-Transformer + ASPP alcanza en prueba una exactitud de 97,67 %, lo que representa una mejora de +1,07 puntos porcentuales; en validación obtiene 97,31 %, equivalente a +0,71 puntos porcentuales adicionales. Aunque [16] no informa valores de macro-F1 ni AUC directamente comparables, los resultados aquí reportados (macro-F1 de 97,61 % y AUC micro/macro de 0,997) evidencian una mayor separabilidad interclase respecto al referente original.

Por otra parte, existen estudios recientes con arquitecturas Transformer aplicadas a OCT en los que las métricas de este trabajo resultan superiores. En particular, el *Residual Self-Attention ViT* (RS-A ViT) de Powroźnik et al. —evaluado en un escenario mixto que combina lesiones viteliformes adquiridas (AVL), drusen y casos normales— alcanza una exactitud media cercana al 96,9 % [17]. En contraste, nuestro sistema (CSWin-Transformer + ASPP) logra 97,67 % de exactitud, 97,61 % de macro-F1 y un AUC de 0,997, superan-

do dicho modelo tanto en precisión global como en separabilidad de clases. Aunque cabe señalar que el estudio de [17] empleó un conjunto de datos de menor tamaño y reportó un costo computacional superior al utilizado en el presente trabajo.

Estos resultados superan el rendimiento reportado por [16], cuyo enfoque basado en Inception-V3 mostró limitaciones en sensibilidad ante lesiones pequeñas, atribuibles a la pérdida de contexto global en arquitecturas convolucionales profundas. Asimismo, frente al modelo Transformer de Powroźnik et al. [17], que incrementa la capacidad de atención a costa de mayor demanda computacional, la propuesta CSWin-ASPP logra un balance más eficiente entre precisión y costo de inferencia.

Desde una perspectiva de IA aplicada a biomédica, el sistema es útil como apoyo al diagnóstico: dado que mantiene sensibilidad elevada en CNV, donde los falsos negativos son más costosos, y confunde DRUSEN principalmente con NORMAL, lo que conlleva menor riesgo clínico pero impacto operativo (revisiones adicionales). Para poder reducir ese error sin aumentar en exceso el costo computacional, se puede tomar varios caminos i) replantear la función de pérdida enfocando DRUSEN (focal o class-balanced) para elevar su sensibilidad de 1 a 2; ii) calibrar probabilidades y fijar umbrales por clase, de modo que se priorice sensibilidad en CNV y recuperando casos sutiles de DRUSEN; y iii) emplear aumento dirigido en casos difíciles (drusas pequeñas, bajo contraste, bordes difusos). Tal que así, se considera razonable proyectar el macro-F1 hacia 98–99 % y reducir de forma específica los errores DRUSEN→NORMAL.

En conjunto, la arquitectura híbrida aquí propuesta contribuye al estado del arte al integrar atención jerárquica y muestreo multiescala en un esquema compacto, ofreciendo una alternativa más ligera y adaptable a escenarios clínicos reales. Futuras extensiones podrían incorporar validación cruzada interpaciente y visualización de mapas de atención para fortalecer la interpretabilidad clínica de las decisiones del modelo.

5. Conclusión

La arquitectura híbrida CSWin-Transformer con el módulo ASPP (Atrous Spatial Pyramid Pooling), demostró una capacidad robusta para la extracción de características multiescales en imágenes OCT, permitiendo una clasificación precisa de las distintas cla-

ses de la Degeneración Macular Asociada a la Edad. La combinación de atención por ventanas cruzadas propias del CSWin-Transformer y muestreo espacial piramidal favoreció la captura de patrones locales y globales relevantes para la correcta clasificación. Los resultados reportados y discutidos dan cuenta de un rendimiento competitivo respecto al estado del arte, alcanzando valores de exactitud, sensibilidad y especificidad superiores a los reportados en arquitecturas puramente convolucionales. Esto sugiere que los mecanismos de atención jerárquica empleados por el CSWin-Transformer constituyen una alternativa eficaz para tareas de análisis médico-visual complejas. El preprocesamiento sistemático de las imágenes de OCT (relleno simétrico, normalización por imagen y aumento) resultó esencial para optimizar la estabilidad del entrenamiento y minimizar la variabilidad intraclass presente en las imágenes OCT. Como último punto se considera que este enfoque posee un alto potencial de aplicación a sistemas clínicos asistidos por IA, de modo que se puede implementar para contribuir a la detección temprana y seguimiento de DMAE o incluso otra patología de la retina.

Fuentes de financiamiento

Se agradece a la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación por los recursos otorgados en la realización de los estudios de posgrado, así como a la Universidad Autónoma de Querétaro por las instalaciones y la formación otorgada durante la duración del posgrado que contribuyó a la realización de este trabajo de investigación.

Conflictos de interés

Los autores declaran que no existen conflictos de interés.

Abreviaturas

Las siguientes abreviaturas se utilizan en este manuscrito:

DMAE: Degeneración Macular Asociada a la Edad

AMD: Age-Related Macular Degeneration

OCT: Tomografía de Coherencia Óptica

B-scan: Corte transversal bidimensional de OCT

CNV: Neovascularización coroidea (Choroidal Neovascularization)

ASPP: Atrous Spatial Pyramid Pooling

CSWin: Cross-Shaped Window Transformer

ROI: Región de Interés (Region of Interest)

TTA: Test-Time Augmentation

FPN: Feature Pyramid Network

AUC: Área bajo la curva (Area Under the Curve)

F1: Medida armónica entre precisión y exhaustividad

AI: Inteligencia Artificial

GPU: Unidad de Procesamiento Gráfico (Graphics Processing Unit)

BN: Normalización por lotes (Batch Normalization)

ReLU: Unidad Lineal Rectificada (Rectified Linear Unit)

6. Referencias bibliográficas

Referencias

- [1] W. L. Wong, X. Su, X. Li, C. M. G. Cheung, R. Klein, C.-Y. Cheng, and T. Y. Wong, “Global prevalence of age-related macular degeneration and disease burden projection for 2020 and 2040,” *Lancet Glob. Health*, vol. 2, no. 2, pp. e106–e116, 2014.
- [2] D. Huang, E. A. Swanson, C. P. Lin, J. S. Schuman, W. G. Stinson, W. Chang, M. R. Hee, T. Flotte, K. Gregory, C. A. Puliafito, and J. G. Fujimoto, “Optical coherence tomography,” *Science*, vol. 254, no. 5035, pp. 1178–1181, 1991.
- [3] W. Drexler and J. G. Fujimoto, eds., *Optical Coherence Tomography: Technology and Applications*. Berlin, Heidelberg: Springer, 2008.
- [4] A. F. Fercher, W. Drexler, C. K. Hitzenberger, and T. Lasser, “Optical coherence tomography—principles and applications,” *Rep. Prog. Phys.*, vol. 66, no. 2, pp. 239–303, 2003.
- [5] S. Sotoudeh-Paima, F. Hajizadeh, and H. Soltanian-Zadeh, “Labeled retinal optical coherence tomography dataset for classification of normal, drusen, and cnv cases,” 2023. Accessed: 2025-10-10.
- [6] P. Cabaleiro, J. de Moura, J. Novo, P. Charlón, and M. Ortega, “Automatic identification and representation of the cornea–contact lens relationship using as-OCT images,” *Sensors*, vol. 19, no. 23, p. 5087, 2019.
- [7] K. Simonyan and A. Zisserman, “Very deep convolutional networks for large-scale image recognition,” in *Int. Conf. Learn. Represent. (ICLR)*, 2015. arXiv:1409.1556.
- [8] K. He, X. Zhang, S. Ren, and J. Sun, “Deep residual learning for image recognition,” in *Proc. IEEE Conf. Comput. Vis. Pattern Recognit. (CVPR)*, pp. 770–778, 2016.
- [9] G. Huang, Z. Liu, L. van der Maaten, and K. Q. Weinberger, “Densely connected convolutional networks,” in *Proc. IEEE Conf. Comput. Vis. Pattern Recognit. (CVPR)*, pp. 4700–4708, 2017.
- [10] D. S. Kermany, M. Goldbaum, W. Cai, and et al., “Identifying medical diagnoses and treatable diseases by image-based deep learning,” *Cell*, vol. 172, no. 5, pp. 1122–1131.e9, 2018.
- [11] T.-Y. Lin, P. Dollár, R. Girshick, K. He, B. Hariharan, and S. Belongie, “Feature pyramid networks for object detection,” in *Proc. IEEE Conf. Comput. Vis. Pattern Recognit. (CVPR)*, pp. 936–944, 2017.
- [12] L.-C. Chen, Y. Zhu, G. Papandreou, F. Schroff, and H. Adam, “Encoder-decoder with atrous separable convolution for semantic image segmentation,” in *Proc. IEEE Conf. Comput. Vis. Pattern Recognit. (CVPR)*, pp. 801–813, 2018.
- [13] A. Dosovitskiy, L. Beyer, A. Kolesnikov, D. Weissenborn, X. Zhai, T. Unterthiner, M. Dehghani, M. Minderer, G. Heigold, S. Gelly, J. Uszkoreit, and N. Houlsby, “An image is worth 16×16 words: Transformers for image recognition at scale,” in *Int. Conf. Learn. Represent. (ICLR)*, 2021.
- [14] Z. Liu, Y. Lin, Y. Cao, H. Hu, Y. Wei, Z. Zhang, S. Lin, and B. Guo, “Swin transformer: Hierarchical vision transformer using shifted windows,” in *Proc. IEEE/CVF Int. Conf. Comput. Vis. (ICCV)*, pp. 10012–10022, 2021.
- [15] X. Dong, J. Bao, D. Chen, W. Zhang, N. Yu, L. Yuan, and B. Guo, “Cswin transformer: A general vision transformer backbone with cross-shaped windows,” in *Proc. IEEE/CVF Conf. Comput. Vis. Pattern Recognit. (CVPR)*, pp. 12124–12134, 2022.

- [16] D. S. Kermany, M. Goldbaum, W. Cai, C. C. S. Valentim, H. Liang, S. L. Baxter, A. McKeown, G. Yang, X. Wu, F. Yan, J. Dong, M. K. Prasadha, J. Pei, M. Y. L. Ting, J. Zhu, C. Li, S. Hewett, J. Dong, I. Ziyar, A. Shi, K. Zhang, T. Toishybayev, *et al.*, “Identifying medical diagnoses and treatable diseases by image-based deep learning,” *Cell*, vol. 172, no. 5, pp. 1122–1131.e9, 2018. Trabajo original del dataset OCT2017; baseline con Inception-V3 por transferencia.
- [17] P. Powroźnik, M. Skublewska-Paszkowska, K. Nowomiejska, B. Gajda-Deryło, M. Brinkmann, M. Concilio, M. D. Toro, and R. Rejdak, “Residual self-attention vision transformer for detecting acquired vitelliform lesions and age-related macular drusen,” *Scientific Reports*, vol. 15, p. Article 17107, 2025.

Ciencia ciudadana y recolección de datos comunitaria: una revisión académica

Citizen Science & Community-Based Data Collection: A Scholarly Review

González Martínez, Roxana* y Escudero Nahón, Alexandro**

*Afiliación: Facultad de Ingeniería, UAQ**

*Facultad de Informática, UAQ***

Querétaro, México

roxana.gonzalez@uaq.mx; ORCID 0009-0000-8178-8757

alexandroescudero@me.com; ORCID /0000-0001-8245-0838

Resumen: Esta revisión académica examina sistemáticamente la evolución de la investigación en ciencia ciudadana mediante el análisis de cincuenta y seis publicaciones revisadas por pares que abarcan de 2015 a 2025, las cuales fueron categorizadas en siete dominios temáticos distintos: ciencia ciudadana explícita, crowdsourcing, monitoreo ambiental ciudadano, monitoreo participativo, activismo de datos, recolección de datos comunitarios y datos generados por voluntarios. El análisis investiga tendencias temporales, distribución geográfica, marcos metodológicos, desafíos persistentes y oportunidades emergentes de investigación. Los hallazgos indican que la ciencia ciudadana ha transitado de un campo emergente a un dominio de investigación establecido, funcionando tanto como metodología de recolección de datos como paradigma para democratizar la producción de conocimiento científico. La revisión concluye que abordar los desafíos globales contemporáneos—incluyendo el cambio climático y las crisis de salud pública—necesita la expansión de iniciativas de ciencia ciudadana mientras se mantienen estándares científicos rigurosos y se avanza estructuras de participación equitativa.

Palabras clave: Ciencia ciudadana; participación pública; Recolección de datos; Monitoreo ambiental; Investigación participativa; Crowdsourcing.

Abstract: This scholarly review systematically examines the evolution of citizen science research through an analysis of fifty-six peer-reviewed publications spanning 2015 to 2025, which were categorized into seven distinct thematic domains: explicit citizen science, crowdsourcing, environmental monitoring by citizens, participatory monitoring, data activism, community data collection, and volunteer-generated data. The analysis investigates temporal trends, geographic distribution, methodological frameworks, persistent challenges, and emerging research opportunities. Findings indicate that citizen science has transitioned from an emerging field to an established research domain, functioning both as a data collection methodology and as a paradigm for democratizing scientific knowledge production. The review concludes that addressing contemporary global challenges—including climate change and public health crises—necessitates the expansion of citizen science initiatives while maintaining rigorous scientific standards and advancing equitable participation structures.

Keywords: Citizen Science; Public Participation; Data Collection; Environmental Monitoring; Participatory Research; Crowdsourcing.

1. Introducción

La ciencia ciudadana representa una transformación fundamental en la producción de conocimiento científico, marcando una desviación de la investigación tradicional confinada a laboratorios hacia la creación de conocimiento distribuido y participativo. Durante la última década, la investigación científica ha incorporado cada vez más la participación pública en

diversos dominios, incluyendo el monitoreo ambiental, la planificación urbana, la preservación del patrimonio cultural y la investigación en salud pública.

Esta revisión analiza cincuenta y seis publicaciones revisadas por pares desde 2015 hasta 2025 para examinar el desarrollo y estado actual de la investigación en ciencia ciudadana. Los artículos fueron sistemáticamente categorizados en siete dominios temáticos que

caracterizan la ciencia ciudadana contemporánea y las prácticas de recolección de datos comunitarios. Estos temas representan corrientes de investigación interconectadas que colectivamente iluminan la evolución de la ciencia participativa y sus implicaciones para la práctica científica y el compromiso social.

Esta revisión procede examinando cada dominio temático en detalle, seguido por el análisis de patrones temporales, distribución geográfica, enfoques metodológicos y direcciones futuras de investigación.

2. Ciencia ciudadana explícita: fundamentos teóricos e identidad disciplinaria

Veintiocho publicaciones abordan explícitamente la ciencia ciudadana como un dominio de investigación distinto, examinando sus fundamentos teóricos, marcos metodológicos e implicaciones epistemológicas. Esta compilación de trabajo establece la arquitectura conceptual que subyace a la investigación científica participativa.

Lameira et al. [1] realizaron una encuesta exhaustiva a 170 miembros del profesorado en 32 universidades federales brasileñas para evaluar las perspectivas académicas sobre la ciencia ciudadana. Los hallazgos revelan una paradoja: mientras los miembros del profesorado reconocen la ciencia ciudadana como beneficiosa para democratizar el conocimiento científico y valoran las contribuciones voluntarias a través de coautoría e iniciativas colaborativas—particularmente con comunidades indígenas y quilombolas—la implementación real permanece limitada. Esta brecha de implementación surge de restricciones prácticas más que de barreras actitudinales. Patrones similares emergen en estudios que examinan las percepciones de los docentes y la integración educativa [2, 3]. La investigación subraya la necesidad de protocolos estandarizados, programas de capacitación integrales y procedimientos rigurosos de validación de datos para facilitar una adopción académica más amplia.

Liu et al. [4] demuestran la aplicación de la ciencia ciudadana al monitoreo ecológico mediante el análisis de la Red de Observación de Atropellos de Taiwán (TaiRON). Operando desde 2012, esta iniciativa documentó un incremento de catorce veces en atropellos de serpientes durante enero a lo largo de un período de ocho años—un mes tradicionalmente caracterizado por baja actividad de serpientes—. Este patrón

temporal proporciona evidencia empírica de impactos del cambio climático, específicamente la extensión de períodos activos debido a temperaturas invernales más cálidas. La investigación ilustra cómo los datos recolectados por ciudadanos, cuando se integran con modelado ecológico y técnicas de análisis espacial como GeoAI, pueden generar evidencia robusta para el desarrollo de políticas de conservación.

Schneider et al. [5] presentan un enfoque innovador de gamificación para la ciencia ciudadana a través de ARTigo, una plataforma operacional desde 2010 en Múnich, Alemania. El sistema emplea mecánicas de juego colaborativo donde los participantes etiquetan obras de arte bajo restricciones de tiempo, transformando la catalogación del patrimonio cultural en una actividad atractiva. Metodologías similares aparecen en proyectos de humanidades digitales enfocados en estudios de manuscritos y documentación histórica [6, 7]. La evolución de la plataforma desde la versión 1.0 a la 2.0 resultó en mejoras significativas de usabilidad, con calificaciones en la Escala de Usabilidad del Sistema avanzando del grado B a A-. El marco de gamificación obtiene efectivamente conocimiento de dominio de participantes no expertos mientras mantiene el compromiso mediante mecánicas de juego.

Park et al. [8] examinan el monitoreo de contaminación por plásticos marinos a través de iniciativas de ciencia ciudadana en Canadá, identificando una limitación crítica: mientras tales proyectos generan conjuntos de datos valiosos, frecuentemente fracasan en catalizar cambios de comportamiento entre los participantes. La recolección de datos permanece principalmente analítica en lugar de transformativa. Los autores proponen un enfoque de seguimiento de datos incorporado utilizando instrumentos diseñados colectivamente y talleres de co-creación. Aplicando el marco teórico de meshwork—conceptualizando los datos como entretejidos dentro de las prácticas diarias—la investigación reconceptualiza los datos generados por ciudadanos más allá de métricas cuantitativas para abarcar dimensiones reflexivas, emocionales y experienciales. Esto representa un cambio de paradigma desde la recolección de datos para análisis científico hacia la recolección de datos para transformación personal y social. Estudios complementarios demuestran estrategias de compromiso similares en contextos de educación ambiental [9, 10].

Naik et al. [11] extienden las aplicaciones de cien-

cia ciudadana a la promoción de la salud mediante la iniciativa “Cada paso que das” en Cataluña, España. Este estudio piloto emplea tecnología móvil de salud para fomentar la actividad física entre adultos mayores, demostrando la transferibilidad de metodologías de ciencia ciudadana más allá del monitoreo ambiental tradicional hacia dominios de salud pública.

Colectivamente, estos estudios demuestran que la ciencia ciudadana funciona no meramente como una metodología de recolección de datos sino como un marco para transformar las relaciones entre científicos profesionales y el público, reconfigurando la producción de conocimiento desde el consumo pasivo hacia la participación activa.

3. Crowdsourcing: recolección de datos distribuida mediante plataformas digitales

Diecisiete publicaciones examinan el crowdsourcing—la adquisición sistemática de datos, servicios o ideas de comunidades grandes y distribuidas, predominantemente a través de plataformas basadas en internet—. Aunque conceptualmente relacionada con la ciencia ciudadana, la investigación en crowdsourcing enfatiza la infraestructura tecnológica y el diseño de plataformas que habilitan la participación masiva y la recolección de datos escalable.

Papageorgiou et al. [12] desarrollaron aplicaciones de Peatón Inteligente para la mejora de movilidad urbana en Nicosia, Chipre. La plataforma emplea una arquitectura de información bidireccional: proporcionando optimización de rutas y orientación de accesibilidad a los usuarios mientras simultáneamente recolecta datos en tiempo real sobre deficiencias de infraestructura, barreras de accesibilidad y preocupaciones de seguridad. Este diseño transforma efectivamente a los usuarios de dispositivos móviles en sensores distribuidos dentro del entorno urbano, habilitando el monitoreo continuo y la mejora incremental de la infraestructura peatonal.

La respuesta a crisis representa un dominio de aplicación crítico para el crowdsourcing. Durante emergencias, la infraestructura de información convencional frecuentemente experimenta limitaciones de capacidad o interrupción operacional. Benali et al. [13] investigan marcos de toma de decisiones colaborativa habilitada por crowdsourcing donde los ciudadanos

funcionan como fuentes primarias de información. Investigación paralela examina sistemas de monitoreo de redes sociales y detección de deslizamientos de tierra que aprovechan datos de crowdsourcing para respuesta rápida a emergencias [14, 15, 16]. Los participantes a nivel del terreno proporcionan actualizaciones situacionales en tiempo real respecto a condiciones, necesidades y disponibilidad de recursos durante el período crítico que precede la movilización de respuesta formal a emergencias.

Agerri et al. [17] presentan el proyecto EnetCollect, estableciendo una red europea que integra educación de idiomas con metodologías de crowdsourcing. Los estudiantes de idiomas contribuyen a bases de datos lingüísticas mientras simultáneamente desarrollan competencia lingüística, creando una relación recíproca donde los participantes se benefician individualmente mientras avanzan los repositorios de conocimiento científico.

El monitoreo de biodiversidad mediante crowdsourcing es ejemplificado por la plataforma Dive Reporter [18], que moviliza buzos recreacionales equipados con cámaras submarinas y teléfonos inteligentes para documentar ecosistemas marinos. Este enfoque transforma actividades recreacionales en oportunidades de recolección sistemática de datos. Metodologías análogas han sido aplicadas al monitoreo de poblaciones de garrapatas [19], recolección de datos geoespaciales basada en teléfonos inteligentes [20, 21] y monitoreo ambiental urbano [22, 23]. La investigación sobre sistemas de motivación y estructuras de incentivos aborda la sostenibilidad del compromiso de los participantes [24, 25].

Estos estudios demuestran que plataformas tecnológicas apropiadamente diseñadas pueden integrar actividades rutinarias—movilidad peatonal, buceo recreativo, adquisición de idiomas—en procesos de recolección de datos científicos. La eficacia del crowdsourcing deriva de la escala agregada y la presencia geográfica distribuida en lugar de la experticia individual del participante.

4. Ciencia ciudadana ambiental: participación pública en monitoreo ambiental

Siete publicaciones abordan la participación ciudadana en monitoreo ambiental, representando uno de los dominios más establecidos de ciencia ciudadana

donde participantes no profesionales contribuyen a la producción de conocimiento ecológico.

La ciencia ciudadana ambiental abarca diversos enfoques metodológicos y dominios de aplicación. Más allá del monitoreo de atropellos previamente discutido [4], la investigación documenta evaluación de calidad del aire mediante redes de sensores de bajo costo desplegadas en instituciones educativas [26], evaluación de calidad del agua usando métodos colorimétricos accesibles [27, 28] e implementación de soluciones basadas en la naturaleza con participación comunitaria [29, 30]. Revisiones sistemáticas examinan iniciativas educativas que integran el monitoreo ambiental en marcos pedagógicos [31, 32].

La ciencia ciudadana ambiental demuestra eficacia particular debido a su conexión con los contextos ambientales inmediatos de los participantes. Las actividades de monitoreo localizadas mejoran la conciencia ambiental y frecuentemente catalizan la abogacía y la modificación de comportamiento. Golumbic et al. [33] demuestran que la autorreflexión y el aprendizaje constituyen componentes integrales del compromiso efectivo con la ciencia ciudadana. Los datos recolectados poseen relevancia directa para las experiencias vividas de los participantes, documentando la calidad del aire, los recursos hídricos y la biodiversidad dentro de sus comunidades.

La ciencia ciudadana ambiental también aborda preocupaciones de justicia ambiental. Las comunidades que experimentan cargas ambientales desproporcionadas—frecuentemente poblaciones de bajos ingresos y comunidades de color—a menudo carecen de acceso a infraestructura profesional de monitoreo ambiental. La ciencia ciudadana democratiza la recolección de datos ambientales, habilitando documentación, abogacía y mecanismos de rendición de cuentas impulsados por la comunidad.

5. Monitoreo participativo: recolección y análisis de datos controlados por la comunidad

Ocho publicaciones examinan el monitoreo participativo—un enfoque metodológico donde las comunidades determinan activamente objetivos de monitoreo, protocolos de medición y utilización de datos en lugar de solamente ejecutar actividades de recolección de datos—. Este marco representa un compromiso mejorado más allá de modelos

convencionales de ciencia ciudadana.

El monitoreo participativo frecuentemente incorpora metodologías de co-diseño. La investigación en Turquía muestra estudiantes de diseño urbano colaborando con ciudadanos para reconfigurar espacios públicos usando datos espaciales generados por ciudadanos. La plataforma Qua-Kit, una herramienta de participación basada en mapas, habilita a participantes no expertos para manipular geometrías espaciales y articular preferencias de diseño, transformando la planificación urbana desde procesos dominados por expertos hacia un diseño colaborativo donde las experiencias y preferencias ciudadanas influyen directamente en los resultados. Investigación paralela examina plataformas de ciudad inteligente [34, 35, 36], sistemas de resiliencia comunitaria [37, 38], tecnologías habilitadoras para comunidades inteligentes [39] y sistemas de asignación participativa para planificación residencial [40].

La investigación en monitoreo participativo aborda explícitamente las relaciones de poder inherentes a la producción de conocimiento. Las preguntas críticas incluyen: ¿Quién determina las prioridades de monitoreo? ¿Quién controla el acceso y la propiedad de los datos? ¿Cómo se interpretan y operacionalizan los hallazgos? Estas consideraciones son fundamentales porque los procesos de monitoreo reflejan inherentemente valores, prioridades y configuraciones de poder particulares. Los marcos participativos buscan redistribuir la autoridad epistémica, proporcionando a las comunidades control sobre la producción de conocimiento concerniente a sus entornos vividos.

Este enfoque demuestra valor particular en contextos caracterizados por sistemas de monitoreo oficial ausentes, inadecuados o contestados. El monitoreo liderado por la comunidad genera conocimiento alineado con las necesidades e intereses comunitarios en lugar de servir exclusivamente prioridades institucionales.

6. Activismo de datos: datos como instrumento de compromiso cívico y acción política

Una publicación examina explícitamente el activismo de datos—el despliegue estratégico de recolección y análisis de datos como mecanismos para compromiso cívico e intervención política [41]—. Esta corriente de investigación representa la dimensión más abierta-

mente política de la ciencia ciudadana.

Odilla y Mattoni [41] analizan la innovación cívica anticorrupción en Brasil, examinando cómo las comunidades se movilizan en torno a datos para contestar narrativas oficiales y establecer mecanismos de rendición de cuentas. Los activistas de datos se involucran en el trabajo integral de datos que abarca recolección, encuadre, análisis, visualización y despliegue estratégico para la transformación social.

El marco teórico del activismo de datos postula que los datos encarnan inherentemente perspectivas particulares y sirven a intereses específicos. Mediante la generación autónoma de datos, los activistas construyen contranarrativas que desafían relatos autorizados. Estas prácticas documentan asuntos sistemáticamente ignorados, cuantifican impactos oficialmente negados y visualizan injusticias estructurales que las configuraciones de poder dominantes buscan oscurecer.

El activismo de datos representa la ciencia ciudadana en su manifestación más confrontacional y la potencialmente transformativa. Los datos funcionan como instrumento contra la indiferencia institucional, corrupción y opresión mientras simultáneamente sirven funciones democráticas al habilitar a las comunidades para auto-representarse en lugar de ser representadas mediante marcos externos.

Este dominio de investigación ilumina la naturaleza inherentemente política de la producción de conocimiento. Las preguntas de autoridad epistémica—quién produce conocimiento, qué constituye datos legítimos y cómo la información influye en la toma de decisiones—representan sitios de contestación política. Los activistas de datos que participan en ciencia ciudadana avanzan no solamente conocimiento científico sino también objetivos de justicia social.

7. Datos comunitarios: sistemas de conocimiento de propiedad comunitaria

Aunque ninguna publicación en la colección categorizada se enfoca primariamente en la recolección de datos comunitarios, esto representa una categoría conceptual importante dentro del marco de ciencia ciudadana. La recolección de datos comunitarios denota la recopilación sistemática de información por comunidades concerniente a sus propios contextos, explícitamente para propósitos determinados por la comunidad. Este enfoque enfatiza la propiedad co-

munitaria y el beneficio colectivo como características distintivas.

Las iniciativas de datos comunitarios típicamente emergen en respuesta a inadecuaciones en sistemas de datos oficiales que fracasan en representar con precisión las realidades locales. Las estadísticas convencionales pueden no reflejar condiciones localizadas o pueden emplear métodos de agregación que oscurecen variaciones significativas. Las comunidades establecen sistemas de recolección de datos autónomos que representan más precisamente sus experiencias y abordan sus necesidades específicas.

Estas iniciativas construyen capacidad comunitaria mediante múltiples mecanismos. Los procesos colectivos de recopilación de datos fortalecen redes sociales, desarrollan competencias técnicas y fomentan comprensión compartida de desafíos comunitarios. Los conjuntos de datos resultantes funcionan como recursos comunes que apoyan la planificación comunitaria, la abogacía y las decisiones de asignación de recursos.

Los proyectos de datos comunitarios frecuentemente priorizan sistemas de conocimiento indígena y experticia local, desafiando suposiciones de que solamente científicos profesionalmente acreditados pueden generar conocimiento válido. Estos marcos reconocen que las comunidades poseen comprensión contextual que las metodologías científicas pueden sistematizar y comunicar, pero no pueden suplantar.

Las prácticas de datos comunitarios demuestran que la recolección de datos puede funcionar como mecanismo de construcción comunitaria. La documentación colaborativa de realidades compartidas genera no solamente conjuntos de datos sino también cohesión social y capacidad colectiva.

8. Datos generados por voluntarios: estructuras motivacionales en recolección de datos no remunerada

Diez publicaciones examinan la recolección de datos por voluntarios, investigando factores motivacionales que sostienen la participación no remunerada en actividades de recopilación de datos. La investigación identifica desafíos distintos en iniciativas de ciencia ciudadana virtual a corto plazo [42] mientras documenta beneficios cognitivos como mejora de la memoria espacial [43] como factores motivacionales.

Comprender la motivación de voluntarios constituye un factor crítico en la sostenibilidad de la cien-

cia ciudadana. Sheppard y Terveen [44] demuestran que el compromiso a largo plazo en ciencia ciudadana no depende primariamente de compensación monetaria. La investigación a través de dominios diversos—incluyendo digitalización de patrimonio cultural [45] y reconocimiento de emociones musicales [46]—revela patrones motivacionales consistentes:

Aprendizaje y desarrollo de habilidades: Los participantes son motivados por oportunidades para adquirir nuevas competencias y conocimientos mientras contribuyen a la investigación científica.

Afiliación social: La membresía en comunidades de práctica con objetivos compartidos proporciona motivación significativa.

Impacto percibido: La satisfacción derivada de contribuir a investigación que aborda desafíos sustanciales del mundo real sostiene el compromiso.

Conexión ambiental: Para proyectos de monitoreo ecológico, el compromiso al aire libre y la conexión mejorada con sistemas naturales motivan la participación.

La participación sostenida en ciencia ciudadana deriva del cumplimiento de necesidades humanas intrínsecas de propósito, conexión social y contribución significativa en lugar de recompensas extrínsecas. Las iniciativas exitosas alinean estratégicamente el diseño del proyecto con estos factores motivacionales, creando experiencias que los participantes encuentran inherentemente gratificantes independientes de los resultados de recolección de datos.

9. Síntesis y temas transversales: análisis integrativo a través de dominios temáticos

El análisis transtemático de los siete dominios revela varias características fundamentales de la investigación y práctica contemporánea de ciencia ciudadana.

Diversidad de dominios: Las aplicaciones de ciencia ciudadana abarcan monitoreo ambiental, preservación del patrimonio cultural, promoción de la salud pública, planificación urbana, respuesta a emergencias e iniciativas anticorrupción. Esta amplitud demuestra que el marco central—observación sistemática y recolección de datos por participantes no profesionales—exhibe transferibilidad a través de dominios donde se valora la producción de conocimiento.

Mediación tecnológica: Las tecnologías digitales, incluyendo teléfonos inteligentes, sensores y plataformas web, mejoran la accesibilidad y escalabilidad de la ciencia ciudadana. Sin embargo, la práctica fundamental antecede la infraestructura tecnológica contemporánea. La implementación efectiva depende menos de la sofisticación tecnológica que de la alineación cuidadosa de herramientas con requisitos de tareas y capacidades de participantes.

Estructuras de poder: Actividades idénticas—recolección de datos ciudadanos—sirven propósitos divergentes contingentes en autoridad de iniciación, mecanismos de control e identificación de beneficiarios. El reclutamiento iniciado por científicos profesionales de voluntarios para preguntas de investigación predeterminadas representa un modelo de gobernanza. El monitoreo organizado por la comunidad que aborda preocupaciones identificadas por la comunidad constituye un modelo alternativo con relaciones de poder distintas. Ambos marcos poseen valor mientras encarnan relaciones fundamentalmente diferentes entre ciudadanos e instituciones científicas.

Aseguramiento de calidad de datos: La validación de calidad, protocolos de capacitación y mecanismos de aseguramiento reciben atención sustancial a través de la literatura revisada. La comunidad de ciencia ciudadana reconoce cada vez más que los datos recolectados por voluntarios deben satisfacer estándares rigurosos para aplicaciones científicas y de política. Este reconocimiento ha catalizado el desarrollo de materiales de capacitación mejorados, protocolos estandarizados y sistemas de verificación de calidad automatizados.

Beneficios secundarios: Más allá de la recolección de datos, la ciencia ciudadana genera valor educativo y social. Los participantes desarrollan alfabetización científica, capacidades de pensamiento crítico, conciencia ambiental y eficacia cívica. Comunidades de práctica y redes sociales emergen mediante la participación. Estos beneficios auxiliares pueden finalmente igualar o exceder el valor de los productos de datos primarios.

Desafíos de integración institucional: Aunque los datos de ciencia ciudadana informan cada vez más la investigación y las políticas, las barreras institucionales persisten. Las estructuras de recompensa académica reconocen inadecuadamente el compromiso comunitario. Las agencias regulatorias pueden desconfiar de los datos recolectados por voluntarios. Las publica-

ciones científicas pueden cuestionar la calidad de los datos. Abordar estas barreras requiere mejora paralela en las prácticas de ciencia ciudadana y transformación de culturas institucionales.

Pluralismo metodológico: La trayectoria de la ciencia ciudadana sugiere creciente diversidad metodológica en lugar de convergencia hacia enfoques unificados. Contextos, preguntas de investigación y comunidades variadas necesitan métodos distintos. La fortaleza del campo deriva de la adaptabilidad y orientación experimental.

10. Tendencias temporales y evolución: patrones de desarrollo de una década (2015–2025)

El análisis de patrones de publicación a través de los cincuenta y seis artículos revisados revela tendencias temporales en el desarrollo de la investigación en ciencia ciudadana.

El conjunto de publicaciones demuestra producción relativamente consistente a lo largo de la década, con variaciones atribuibles a la maduración del campo y a catalizadores externos como la pandemia de COVID-19. La pandemia resaltó tanto la utilidad de redes de observación distribuidas para seguimiento epidemiológico como el interés público elevado en participación científica contributiva durante períodos de crisis.

La actividad de publicación sostenida en años recientes indica que la ciencia ciudadana ha logrado reconocimiento como dominio de investigación establecido en lugar de fenómeno transitorio.

La evolución temática es evidente a través del lapso temporal. Las publicaciones tempranas priorizaron el establecimiento de legitimidad, demostrando la validez científica de los datos recolectados por voluntarios. Las publicaciones recientes asumen esta legitimidad y abordan asuntos de refinamiento: optimización de compromiso, avance de equidad, integración de políticas y mejora de impacto social.

La diversificación geográfica también caracteriza la trayectoria temporal. Las publicaciones iniciales se concentraron en contextos norteamericanos y europeos. La erudición reciente incorpora contribuciones sustanciales de Asia, América Latina y regiones geográficas cada vez más diversas. Esta globalización refleja tanto la accesibilidad de infraestructura digital en expansión como el reconocimiento de que los

contextos culturales moldean fundamentalmente la práctica y los resultados de la ciencia ciudadana.

11. Distribución geográfica: patrones regionales en investigación de ciencia ciudadana

Mientras la ciencia ciudadana demuestra alcance global, patrones regionales distintos caracterizan la literatura.

Europa exhibe liderazgo tanto en producción de investigación como en innovación metodológica, con iniciativas documentadas que abarcan Alemania, Chipre, Portugal, Rumanía y otros estados miembros. Los mecanismos de financiamiento de la Unión Europea, particularmente Erasmus+, han catalizado numerosos proyectos de ciencia ciudadana. La erudición europea demuestra énfasis pronunciado en metodologías participativas y marcos de compromiso democrático.

América del Norte, particularmente Estados Unidos y Canadá, contribuye sustancialmente a la literatura, característicamente enfatizando monitoreo ecológico y desarrollo tecnológico. Los proyectos norteamericanos demuestran enfoques orientados a plataformas, priorizando el desarrollo de infraestructura digital para recolección y diseminación de datos.

Asia representa una región rápidamente emergente, con contribuciones notables de Taiwán, China y Corea del Sur. La investigación asiática frecuentemente integra ciencia ciudadana con iniciativas de desarrollo de ciudad inteligente y enfatiza el despliegue de tecnología móvil.

América Latina, representada por Brasil, Colombia y otras naciones, contribuye con perspectivas distintivas enfatizando estructuras de participación comunitaria, integración de conocimiento indígena y dimensiones de justicia social de ciencia participativa.

África y el Medio Oriente permanecen subrepresentados en el conjunto de artículos revisado, potencialmente indicando actividad reducida de ciencia ciudadana, publicación limitada en venues indexados o ambos—representando áreas que requieren atención incrementada—.

La diversidad geográfica enriquece la práctica de ciencia ciudadana, ya que contextos culturales distintos generan suposiciones variadas respecto a la participación pública en ciencia, relaciones experto-público y objetivos de producción de conocimiento.

12. Análisis de venues de publicación: distribución disciplinaria de erudición en ciencia ciudadana

El conjunto de archivos revisado aparece a través de diversos venues de publicación, reflejando el carácter interdisciplinario de la investigación en ciencia ciudadana. Las revistas contribuyentes abordan sostenibilidad, tecnologías de sensores y sistemas de monitoreo, educación, ciudades inteligentes y dominios de redes sociales.

La diversidad de venues de publicación—cincuenta y seis artículos distribuidos a través de numerosas revistas—sugiere que la ciencia ciudadana no se ha coalescido todavía alrededor de salidas de publicación dedicadas, sino que permea múltiples campos disciplinarios. Este patrón puede indicar ya sea interdisciplinariedad productiva o fragmentación problemática, contingente en el marco interpretativo.

Notablemente, revistas de ciencia general de alto impacto como *Nature* o *Science* están ausentes de este conjunto. Esta ausencia potencialmente refleja la orientación de investigación en ciencia ciudadana hacia contribuciones aplicadas y metodológicas en lugar de descubrimientos teóricos fundamentales, o puede indicar barreras institucionales persistentes a la investigación basada en la comunidad en venues de publicación prestigiosos.

13. Enfoques metodológicos: diseños de investigación en erudición de ciencia ciudadana

Las cincuenta y seis publicaciones revisadas emplean diversos enfoques metodológicos, revelando estrategias variadas para investigar fenómenos de ciencia ciudadana.

Estudios de caso constituyen una proporción sustancial de los artículos revisados, proporcionando documentación detallada de proyectos o plataformas específicas incluyendo especificaciones de diseño, procesos de implementación, desafíos encontrados y resultados logrados [5, 4, 26, 47, 48, 49, 50]. Análisis comparativos [51, 52] complementan estas investigaciones de caso único, facilitando aprendizaje transcontextual.

Investigación por encuesta investiga científicos ciudadanos y coordinadores de proyectos, examinan-

do motivaciones, experiencias, resultados de aprendizaje y percepciones de calidad de datos [1, 42]. Estos estudios iluminan dinámicas de participación desde perspectivas de interesados.

Revisiones de literatura y meta-análisis sintetizan conocimiento existente e identifican brechas de investigación [31, 32, 53], contribuyendo a la consolidación del campo en medio de fragmentación disciplinaria.

Artículos de desarrollo tecnológico documentan plataformas, sensores e instrumentos analíticos novedosos para aplicaciones de ciencia ciudadana [26, 54], expandiendo capacidades técnicas para recolección de datos y participación.

Erudición teórica desarrolla marcos conceptuales que abordan activismo de datos, gobernanza participativa y empoderamiento comunitario, estableciendo fundamentos intelectuales para comprender las dimensiones sociopolíticas de la ciencia ciudadana [41].

Notablemente, diseños experimentales y cuasi-experimentales que prueban rigurosamente hipótesis respecto a la efectividad de la ciencia ciudadana permanecen relativamente escasos. Esta brecha metodológica indica oportunidades para investigación de evaluación sistemática empleando diseños de comparación controlada.

14. Desafíos persistentes: asuntos no resueltos en la práctica de ciencia ciudadana

A pesar del progreso sustancial, la literatura revisada identifica desafíos recurrentes que requieren atención continua.

Calidad y validación de datos: Asegurar que los datos recolectados por voluntarios satisfagan estándares científicos necesita atención continua a protocolos de capacitación, procedimientos estandarizados y mecanismos de control de calidad [55, 56]. Este desafío se intensifica con el escalamiento de proyectos, ya que mantener calidad a través de miles de observadores distribuidos presenta dificultades logísticas significativas.

Retención de participantes: Tasas altas de deserción caracterizan numerosas iniciativas de ciencia ciudadana [44, 42], con voluntarios participando frecuentemente brevemente antes de discontinuar el compromiso. Comprender factores de retención e implementar diseño orientado a retención requiere in-

vestigación adicional e intervención intencional.

Equidad e inclusión: Los participantes de ciencia ciudadana demuestran sesgo demográfico hacia poblaciones educadas, afluentes y racialmente privilegiadas, fracasando en representar la diversidad social más amplia. Los proyectos encuentran dificultades en comprometer comunidades marginalizadas que enfrentan restricciones temporales, de recursos o de confianza institucional. Abordar estas disparidades necesita confrontar desigualdades estructurales que se extienden más allá de intervenciones de diseño a nivel de proyecto.

Integración institucional: Aunque los datos de ciencia ciudadana informan cada vez más investigación y política, la aceptación institucional permanece inconsistente. El escepticismo científico respecto a datos recolectados por voluntarios persiste. Los marcos de política para incorporar evidencia generada por ciudadanos permanecen subdesarrollados. Cerrar esta brecha de integración requiere transformación cultural dentro de instituciones científicas y gubernamentales.

Disparidades de acceso digital: La digitalización creciente de ciencia ciudadana crea efectos de exclusión para poblaciones que carecen de acceso a teléfonos inteligentes, conectividad a internet o alfabetización digital. Esta brecha digital refuerza desigualdades existentes en la participación de producción de conocimiento.

Sostenibilidad de financiamiento: La dependencia de subvenciones a corto plazo caracteriza muchas iniciativas, comprometiendo la capacidad de monitoreo a largo plazo. Modelos de financiamiento sostenible independientes de la adquisición continua de subvenciones permanecen elusivos.

Marcos éticos y de gobernanza: Preguntas fundamentales respecto a la propiedad de datos, derechos de los participantes, gestión de datos sensibles y protección de la privacidad carecen de resoluciones estandarizadas y demuestran variación contextual.

15. Direcciones futuras y oportunidades: trayectorias emergentes en investigación de ciencia ciudadana

A pesar de desafíos persistentes, la literatura identifica trayectorias de desarrollo prometedoras.

Integración de inteligencia artificial: Las tecno-

logías de aprendizaje automático e IA ofrecen potencial para mejorar la ciencia ciudadana mediante automatización de control de calidad de datos, asistencia de identificación de especies, detección de patrones y aumento analítico. La colaboración humano-IA puede habilitar modalidades de descubrimiento novedosas combinando capacidades perceptuales con procesamiento computacional.

Sistemas de conocimiento indígena: En lugar de posicionar el conocimiento indígena y local como dominios epistémicos separados, la ciencia ciudadana puede facilitar el diálogo y el intercambio de información mutua a través de sistemas de conocimiento [1]. Esta integración requiere humildad epistémica y respeto de las tradiciones científicas occidentales.

Participación juvenil: El compromiso educativo basado en escuelas e informal construye alfabetización científica mientras genera datos empíricos. Los científicos ciudadanos estudiantes que investigan entornos locales desarrollan tanto conocimiento de dominio como agencia cívica. Los resultados educativos pueden probar ser igualmente significativos que los productos de investigación.

Integración de políticas: A medida que los datos de ciencia ciudadana establecen credibilidad, el potencial de influencia en políticas se expande. Las aplicaciones van desde la regulación ambiental informada por monitoreo de calidad del aire comunitario hasta la planificación urbana que incorpora observaciones ciudadanas. Realizar este potencial requiere de la construcción de relaciones entre redes de ciencia ciudadana e instituciones de formulación de políticas.

Aplicaciones de justicia social: La ciencia ciudadana funciona como instrumento para el empoderamiento comunitario y la abogacía [41]. Las aplicaciones incluyen documentar racismo ambiental, monitorear prácticas institucionales y rastrear impactos de pandemia en poblaciones vulnerables. Los datos generados por ciudadanos hacen visibles y accionables las injusticias estructurales.

Redes colaborativas globales: Las plataformas digitales habilitan contribuciones de científicos ciudadanos de todo el mundo a preguntas de investigación a escala planetaria. El cambio climático, la pérdida de biodiversidad y el monitoreo de salud oceánica requieren escalas observacionales que exceden la capacidad científica profesional. Las redes coordinadas de ciencia ciudadana global proporcionan mecanismos factibles para tal monitoreo.

A demás de los desafíos persistentes y a partir de las diferentes categorías analizadas, se considera el siguiente análisis crítico de los vacíos epistemológicos entre la ciencia ciudadana tecnológica y la comunitaria, haciendo referencia específicamente a las diferencias fundamentales en cuanto a objetivos, metodologías, relaciones de poder y la naturaleza del conocimiento producido en esas dos vertiente:

Ciencia Ciudadana Tecnológica: Se caracteriza por el uso de herramientas digitales (móviles, sensores, plataformas online) para recopilar grandes volúmenes de datos, a menudo en proyectos diseñados por científicos profesionales (dirigidos por científicos).

Objetivo: Principalmente la recolección masiva de datos para avanzar en la comprensión científica de fenómenos a gran escala (ej. biodiversidad, clima), logrando una mayor conciencia pública general.

Metodología: Estandarizada y escalable, centrada en la eficiencia y la cobertura amplia. Los participantes actúan principalmente como sensores o recolectores de datos (ej. subir fotos de especies a una app).

Relaciones de poder: El diseño de la investigación y la definición de preguntas recaen en la academia o instituciones científicas. La participación es valiosa, pero los ciudadanos son mayormente ejecutores de tareas predefinidas.

Ciencia Ciudadana Comunitaria: Suele surgir de las necesidades e intereses de una comunidad local específica, con un enfoque en la acción colectiva y la transformación social (dirigida por la comunidad).

Objetivo: Generar conocimiento aplicable para la resolución de problemas locales concretos (ej. contaminación del agua en un barrio, mapeo de riesgos ambientales) y fomentar la apropiación social de la ciencia.

Metodología: Flexibles, a menudo combinan métodos científicos formales con conocimiento local y tradicional, incluyendo metodologías participativas como la Investigación Acción Participativa (IAP). La experiencia vivida es un eje vertebrador.

Relaciones de poder: Se aspira a una mayor horizontalidad. La comunidad tiene un rol protagónico en la formulación de preguntas de investigación, la recopilación, análisis y uso de los datos para incidir en políticas públicas o la toma de decisiones.

Los principales vacíos epistemológicos surgen de estas diferencias:

1. Validez y Representatividad del Conocimiento:

to:

Tecnológica: El vacío radica en la descontextualización de los datos. Se obtienen muchos datos, pero a menudo se carece del conocimiento local profundo que da contexto a las observaciones. La validez se basa en el volumen y la estandarización, pero puede ignorar matices locales cruciales.

Comunitaria: El vacío potencial puede ser la generalizabilidad de los resultados. El conocimiento es altamente relevante y accionable localmente, pero su aplicabilidad a otras comunidades o contextos más amplios puede ser limitada. La validez se basa en la relevancia y la utilidad social inmediata.

2. Objetividad vs. Subjetividad/Experiencia:

Tecnológica: Aspira a una objetividad más tradicional, minimizando el sesgo humano mediante protocolos estrictos y tecnología.

Comunitaria: Reconoce y valora la experiencia vivida y el conocimiento tácito de los participantes como una fuente de datos legítima e indispensable, lo que choca con nociones estrictas de objetividad científica.

3. Relaciones de Poder y Apropiación:

Tecnológica: Puede perpetuar una relación colonial o jerárquica, donde los científicos expertos extraen datos de las comunidades sin un retorno de beneficios directo o poder de decisión para estas últimas. **Comunitaria:** Busca activamente la democratización del conocimiento y la transformación social, desafiando las estructuras de poder tradicionales en la ciencia y fomentando la co-creación. El vacío aquí es la dificultad de integración con las estructuras científicas convencionales y sus métricas de éxito.

Por lo tanto el principal vacío epistemológico es la brecha entre la búsqueda de datos estandarizados a gran escala (tecnológica) y la generación de conocimiento contextualizado y accionable (comunitaria). Un análisis crítico sugiere que un enfoque híbrido que integre o sirva como puente entre la eficiencia tecnológica con la relevancia social y la participación genuina de la comunidad, lo cual podría ser ideal para una ciencia ciudadana más completa y equitativa.

16. Conclusión: síntesis e implicaciones

Esta revisión sistemática de cincuenta y seis publicaciones que abarcan 2015–2025 revela características fundamentales de la ciencia ciudadana contemporánea al mismo tiempo como metodología de investigación y como fenómeno social.

La ciencia ciudadana abarca prácticas diversas unificadas por la participación no profesional en observación sistemática y creación de conocimiento. Estas prácticas sirven para propósitos variados, encarnan valores distintos y confrontan diferentes desafíos operacionales.

La tecnología funciona como habilitadora en lugar de determinante de ciencia ciudadana. Mientras la infraestructura digital expande capacidades, la premisa fundamental—que los no profesionales pueden contribuir significativamente a la comprensión científica dadas estructuras de apoyo apropiadas—permanece central.

Las fronteras entre ciencia profesional y participación pública demuestran permeabilidad y contingencia histórica. La ciencia ciudadana contemporánea reconfigura divisiones tradicionales experto-amateur, estableciendo modalidades híbridas de producción de conocimiento.

Las preocupaciones de calidad de datos prueban ser abordables mediante diseño sistemático, capacitación y protocolos de validación. Sin embargo, los estándares de calidad deben alinearse con objetivos de proyecto, ya que los datos adecuados para propósitos educativos pueden no satisfacer requisitos de investigación.

La ciencia ciudadana genera valor más allá de la recolección de datos. Los beneficios educativos, sociales y políticos pueden igualar o exceder las contribuciones científicas, construyendo alfabetización científica, capacidad cívica, conciencia ambiental y resiliencia comunitaria.

Las dinámicas de poder moldean fundamentalmente los resultados de ciencia ciudadana. La iniciación de proyectos, control de datos, encuadre de preguntas y distribución de beneficios determinan si la ciencia ciudadana refuerza o desafía estructuras de poder existentes. La ciencia ciudadana transformativa redistribuye la autoridad epistémica a las comunidades.

La ciencia ciudadana demuestra alcance global, pero no uniformidad. Los contextos culturales generan patrones de participación distintos. El diseño sensible al contexto constituye un prerrequisito para la implementación efectiva a través de configuraciones diversas.

La sostenibilidad—tanto de iniciativas como de sistemas planetarios—requiere compromiso institucional a largo plazo, financiamiento estable e inversión comunitaria más allá del entusiasmo inicial.

La división científico profesional-público prueba ser conceptualmente artificial. La ciencia ciudadana establece estructuras participativas que reconocen la capacidad universal para la observación sistemática y el pensamiento crítico.

En última instancia, la ciencia ciudadana representa la democratización de la producción de conocimiento, abordando preguntas fundamentales de autoridad epistémica: quién formula preguntas de investigación, quién genera respuestas y qué constituye conocimiento legítimo. La ciencia ciudadana funciona no meramente como metodología sino como movimiento hacia la creación de conocimiento democrática, inclusiva y participativa.

Los desafíos globales contemporáneos—cambio climático, pérdida de biodiversidad, enfermedad pandémica, justicia ambiental—exceden la capacidad científica profesional para monitoreo comprehensivo y desarrollo de soluciones. Los modelos colaborativos que integran experticia profesional con inteligencia ciudadana distribuida, conocimiento local y compromiso colectivo proporcionan marcos necesarios para abordar estos desafíos.

Los cincuenta y seis artículos revisados documentan una década de desarrollo metodológico, revelando un campo todavía evolucionando mediante experimentación y aprendizaje. Las preguntas críticas para la próxima década incluyen: avanzar en equidad e inclusión, integrar sistemas de conocimiento indígena, mejorar influencia en políticas, lograr sostenibilidad financiera, mantener calidad de datos durante el escalamiento y balancear ideales democráticos con rigor científico.

Estos desafíos carecen de soluciones simples, pero el compromiso continuo por parte de investigadores, practicantes y comunidades indica maduración del campo desde novedad a práctica establecida, desde interés periférico a metodología central para comprender y abordar desafíos sociales complejos.

Fuentes de financiamiento

Los autores agradecen a la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI) los recursos otorgados para la beca nacional de posgrado de la autora.

Agradecimientos

Los autores obtuvieron los datos en formato CSV de

Scopus gracias al Dr. Juvenal Rodríguez Reséndiz. El archivo en formato CSV fue segmentado en 50 subunidades con un programa en Python escrito por el Dr. Roberto Augusto Gómez Loenzo, para su posterior análisis con ayuda de una herramienta de inteligencia artificial, Claude Code. Otro programa en Python permitió convertir los datos bibliográficos de CSV a formato BibTeX. La herramienta ayudó a reducir la búsqueda de 450 posibles fuentes a solamente 56. La revisión de las publicaciones fue hecha por los autores y el texto fue editado en parte por Claude Code para detectar faltas de ortografía y errores de redacción. Los autores han revisado y editado el contenido generado y asumen plena responsabilidad por el contenido de esta publicación.

Conflictos de interés

Los autores declaran que no existen conflictos de interés.

Referencias

- [1] H. L. N. Lameira, M. A. Guerrero-Moreno, E. C. Silva, P. R. B. Santos, M. A. Teodósio, and J. M. B. Oliveira-Junior, "Citizen science from the perspective of higher education professors," *Education Sciences*, vol. 15, no. 6, 2025.
- [2] E. García-Toledano, A. Gracia-Zomeño, P. Farinho, and L. M. C. M. Picado, "Analyzing teachers' perception of the development of lifelong learning as personal, social and learning to learn competence in university students," *Education Sciences*, vol. 13, no. 11, 2023.
- [3] M. Sebastián-López and R. de Miguel González, "Mobile learning for sustainable development and environmental teacher education," *Sustainability (Switzerland)*, vol. 12, no. 22, pp. 1–13, 2020.
- [4] T. Liu, "Using snake roadkill patterns to indicate effects of climate change on snakes in taiwan," *Sustainability (Switzerland)*, vol. 17, no. 4, 2025.
- [5] S. Schneider, "Artigo: Lessons from social image tagging in an art-historical game with a purpose," *IEEE Transactions on Games*, vol. 17, no. 3, pp. 720–728, 2025.
- [6] B. M. Almas, E. Khazraee, M. T. Park, and J. A. Westgard, "Manuscript study in digital spaces: The state of the field and new ways forward," *Digital Humanities Quarterly*, vol. 12, no. 2, 2018.
- [7] D. Paci, "Knowing is participating: Digital public history, wiki and citizen humanities; conoscere è partecipare: Digital public history, wiki e citizen humanities," *Umanistica Digitale*, vol. 10, no. 1, pp. 235–249, 2021.
- [8] J. Park and G. Russell, "Data by me, you, and us: Exploring data transformation for eco-social changes," *Somatechnics*, vol. 15, no. 1, pp. 119–139, 2025.
- [9] S. Righi, E. Bergami, R. Simonini, and D. Prevedelli, "Level of awareness and attitudes towards plastic contamination by students of an italian university," *Sustainability (Switzerland)*, vol. 16, no. 11, 2024.
- [10] A. C. de Freitas, L. A. do Nascimento, R. G. de Castro, M. T. Tadeu Motokane, and P. R. Reis, "Biodiversity and citizenship in an argumentative socioscientific process," *Sustainability (Switzerland)*, vol. 15, no. 4, 2023.
- [11] P. Naik, D. Álamo Junquera, L. Igual, M. Serrajordi, A. Pérez, C. Pericas, C. Pagès-Fernández, T. R. Katapally, and M. J. Grau, "A sustainable mhealth intervention to promote physical activity for healthy aging: A pilot study of the "every walk you take" citizen science initiative," *Sustainability (Switzerland)*, vol. 16, no. 13, 2024.
- [12] G. N. Papageorgiou, D. Demetriou, E. Tsappi, and A. Maimaris, "Analyzing the requirements for smart pedestrian applications: Findings from nicosia, cyprus," *Smart Cities*, vol. 7, no. 4, pp. 1950–1970, 2024.
- [13] M. Benali, A. R. Ghomari, L. Zemmouchi-Ghomari, and M. Lazar, "Crowdsourcing-enabled crisis collaborative decision making," *International Journals of e-Collaboration*, vol. 16, no. 3, pp. 49–72, 2020.
- [14] F. Ofli, M. Imran, U. Qazi, J. Roch, C. V. Pennington, V. J. Banks, and R. Bossu, "Landslide detection in real-time social media image streams," *Neural Computing and Applications*, vol. 35, no. 24, pp. 17809–17819, 2023.

- [15] F. Vettermann, T. Weinzierl, and R. Bill, "Monitoring twitter messages for spatio-temporal and thematic analysis-twitter monitor rostock; monitoring von twitter-nachrichten zur raumzeitlichen und thematischen analyse in der hansestadt rostock-der twittermonitor rostock," *GIS-Zeitschrift fur Geoinformatik*, no. 1, pp. 1–9, 2018.
- [16] T. Schreiner, "Information, opinion, or rumor? the role of twitter during the post-electoral crisis in côte d'ivoire," *Social Media and Society*, vol. 4, no. 1, 2018.
- [17] R. Agerri, M. Maritxalar, V. Lyding, and L. Nicolas, "Enetcollect: A new european network for combining language learning with crowdsourcing techniques," *Procesamiento del Lenguaje Natural*, vol. 61, pp. 171–174, 2018.
- [18] M. Buzinkai, M. Radeta, C. Rodrigues, F. Silva, R. Freitas, S. Chebaane, P. Parretti, S. Schäfer, R. P. Silva, and F. Gizzi, "Crowdsourcing biodiversity data from recreational scuba divers using dive reporter," *Ecological Informatics*, vol. 77, 2023.
- [19] I. Garcia-Marti, R. Zurita-Milla, A. J. van Vliet, and W. Takken, "Modelling and mapping tick dynamics using volunteered observations," *International Journal of Health Geographics*, vol. 16, no. 1, 2017.
- [20] M. Linquist and P. Galpern, "Crowdsourcing (in) voluntary citizen geospatial data from google android smartphones," *Journal of Digital Landscape Architecture*, vol. 2016, no. 1, pp. 263–272, 2016.
- [21] F. Dell'Acqua and D. de Vecchi, "Potentials of active and passive geospatial crowdsourcing in complementing sentinel data and supporting copernicus service portfolio," *Proceedings of the IEEE*, vol. 105, no. 10, pp. 1913–1925, 2017.
- [22] F. D. Salim and U. Haque, "Urban computing in the wild: A survey on large scale participation and citizen engagement with ubiquitous computing, cyber physical systems, and internet of things," *International Journal of Human Computer Studies*, vol. 81, pp. 31–48, 2015.
- [23] F. Delmastro, V. Arnaboldi, and M. Conti, "People-centric computing and communications in smart cities," *IEEE Communications Magazine*, vol. 54, no. 7, pp. 122–128, 2016.
- [24] M. Mahmod, N. Na'in, R. B. Ahmad, S. C. Chit, and A. M. Habbal, "Interlinked motivation model to use mobile crowdsourcing platforms among low-income citizens," *Pertanika Journal of Science and Technology*, vol. 25, no. S10, pp. 99–108, 2017.
- [25] R. I. Ogie, "Adopting incentive mechanisms for large-scale participation in mobile crowdsensing: from literature review to a conceptual framework," *Human-centric Computing and Information Sciences*, vol. 6, no. 1, 2016.
- [26] N. A. Barros, P. M. Sobral, R. S. Moreira, J. Vargas, A. M. Fonseca, I. M. Abreu, and M. S. Guerreiro, "Schoolair: A citizen science iot framework using low-cost sensing for indoor air quality management," *Sensors*, vol. 24, no. 1, 2024.
- [27] R. Zeng, C. M. Mannaerts, and Z. Shang, "A low-cost digital colorimetry setup to investigate the relationship between water color and its chemical composition," *Sensors*, vol. 21, no. 20, 2021.
- [28] A. Castillo-Ramírez, E. M. Santamaria-del Angel, A. G. González-Silvera, J. A. Aguilar-Maldonado, J. M. López-Calderón, and M. T. Sebastiá, "Use of digital images as a low-cost system to estimate surface optical parameters in the ocean," *Sensors*, vol. 23, no. 6, 2023.
- [29] M. L. Cárdenas, V. Wilde, A. Hagen-Zanker, I. Seifert-Dähnn, M. G. Hutchins, and S. A. Loisel, "The circular benefits of participation in nature-based solutions," *Sustainability (Switzerland)*, vol. 13, no. 8, 2021.
- [30] L. Varumo, R. Yaneva, T. Koppel, I. M. Koskela, M. C. Garcia Mateo, S. Sozzo, E. Morrello, and M. C. Dictor, "Perspectives on citizen engagement for the eu post-2020 biodiversity strategy: An empirical study," *Sustainability (Switzerland)*, vol. 12, no. 4, 2020.
- [31] A. Adamou, Y. Georgiou, D. Paraskeva-Hadjichambi, and A. C. Hadjichambis, "Environmental citizen science initiatives as a

- springboard towards the education for environmental citizenship: A systematic literature review of empirical research,” *Sustainability (Switzerland)*, vol. 13, no. 24, 2021.
- [32] M. A. Vasiliades, A. C. Hadjichambis, D. Paraskeva-Hadjichambi, A. Adamou, and Y. Georgiou, “A systematic literature review on the participation aspects of environmental and nature-based citizen science initiatives,” *Sustainability (Switzerland)*, vol. 13, no. 13, 2021.
- [33] Y. N. Golumbic, A. Motion, A. Chau, L. Choi, D. D’Silva, J. Ho, M. Nielsen, K. Shi, C. D. Son, and O. Wu, “Self-reflection promotes learning in citizen science and serves as an effective assessment tool,” *Computers and Education Open*, vol. 3, 2022.
- [34] H.-d. Kim, S.-j. Kim, and J.-t. Lim, “The study for city innovation platform using living lab-based smart city service modeling,” *Journal of Korean Institute of Communications and Information Sciences*, vol. 45, no. 5, pp. 890–898, 2020.
- [35] E. Ugljanin, D. H. Stojanović, E. Kajan, and Z. Maamar, “B2s4b: A platform for smart city business processes management and adaptation,” *Studies in Informatics and Control*, vol. 31, no. 3, pp. 75–86, 2022.
- [36] J. Remr, “Usefulness of a civic engagement scale for research on smart cities: Measuring attitudes and behavior,” *Smart Cities*, vol. 6, no. 6, pp. 3251–3265, 2023.
- [37] B. Klein, R. Koenig, and G. N. Schmitt, “Managing urban resilience: Stream processing platform for responsive cities,” *Informatik-Spektrum*, vol. 40, no. 1, pp. 35–45, 2017.
- [38] N. Bulatović, N. Žarić, S. Djukanovic, I. D. Radusinović, and M. M. Pejanovic-Djurisic, “An example of human-centric sensor network: Be responsible platform,” *Wireless Personal Communications*, vol. 92, no. 1, pp. 237–250, 2017.
- [39] A. Iqbal and S. Olariu, “A survey of enabling technologies for smart communities,” *Smart Cities*, vol. 4, no. 1, pp. 54–77, 2021.
- [40] C. A. Papadopoulou and T. Hatzichristos, “Allocation of residential areas in smart insular communities: The case of mykonos, greece,” *International Journal of E-Planning Research*, vol. 9, no. 4, pp. 40–60, 2020.
- [41] F. Odilla and A. Mattoni, “Unveiling the layers of data activism: The organising of civic innovation to fight corruption in brazil,” *Big Data and Society*, vol. 10, no. 2, 2023.
- [42] N. Reeves and E. P. B. Simperl, “Efficient, but effective? volunteer engagement in short-term virtual citizen science projects,” *Proceedings of the ACM on Human-Computer Interaction*, vol. 3, no. CSCW, 2019.
- [43] E. Palermo, J. Laut, O. Nov, P. Cappa, and M. Porfiri, “Spatial memory training in a citizen science context,” *Computers in Human Behavior*, vol. 73, pp. 38–46, 2017.
- [44] S. A. Sheppard, J. Turner, J. Thebault-Spieker, H. Zhu, and L. G. Terveen, “Never too old, cold or dry to watch the sky: A survival analysis of citizen science volunteerism,” *Proceedings of the ACM on Human-Computer Interaction*, vol. 1, no. CSCW, 2017.
- [45] O. I. Psomadaki, C. A. Dimoulas, G. M. Kalliris, and G. Paschalidis, “Digital storytelling and audience engagement in cultural heritage management: A collaborative model based on the digital city of thessaloniki,” *Journal of Cultural Heritage*, vol. 36, pp. 12–22, 2019.
- [46] J. S. Gómez-Cañón, N. F. Gutiérrez-Páez, L. Porcaro, A. Porter, E. Cano, P. Herrera-Boyer, A. Gkiokas, P. Santos, D. Hernández-Leo, and C. Karreman, “Trompa-mer: an open dataset for personalized music emotion recognition,” *Journal of Intelligent Information Systems*, vol. 60, pp. 549–570, 2023.
- [47] C. A. Christian, “Citizen science with hubble space telescope data,” *Computing in Science and Engineering*, vol. 17, no. 4, pp. 12–19, 2015.
- [48] H. R. Dávila-Jimenez, “Soft skills of public servants as a factor in transformational leadership: a case study of an agriculture secretariat in northeastern colombia; habilidades blandas del

servidor público como factor del liderazgo transformacional: estudio de caso de una secretaría de agricultura del nororiente colombiano,” *Aibi, Revista de Investigación Administración e Ingenierías*, vol. 13, no. 2, 2025.

- [49] M. Chakma, M. S. Rana, and M. A. Pramanik, “Prediction and analysis the causes of increasing an illegal e-taxi in bangladesh municipalities: A case study of pabna municipality,” *International Journal of Crowd Science*, vol. 2, no. 3, pp. 178–197, 2018.
- [50] T. I. Rajapaksha and R. L. S. Fernando, “An analysis of the standards of the government websites of sri lanka: A comparative study on selected asian countries,” *Transforming Government: People, Process and Policy*, vol. 10, no. 1, pp. 47–71, 2016.
- [51] J. Paul and F. Jefferson, “A comparative analysis of student performance in an online vs. face-to-face environmental science course from 2009 to 2016,” *Frontiers in Computer Science*, vol. 1, 2019.
- [52] L. Gaunt, “Numeracy for adults with learning disabilities: A focus on concepts of time,” *Education Sciences*, vol. 12, no. 12, 2022.
- [53] M. Pelacho, G. Ruiz, F. S. Sanz, A. Tarancón, and J. Clemente-Gallardo, “Analysis of the evolution and collaboration networks of citizen science scientific publications,” *Scientometrics*, vol. 126, no. 1, pp. 225–257, 2021.
- [54] T. Lemmerz, S. Herle, A. Weber, L. Böhrkircher, G. Ketzler, M. Leuchner, and J. Blankenbach, “Opengeoresearch – a distributed geoinformation system for community-based participation in scientific geospatial questions; opengeoresearch – ein verteiltes geoinformations-system zur community-basierten partizipation an wissenschaftlichen fragestellungen mit raumbezug,” *GIS-Zeitschrift für Geoinformatik*, vol. 2024, no. 1, pp. 1–13, 2024.
- [55] B. Ekström, “Thousands of examining eyes: credibility, authority and validity in biodiversity citizen science data production,” *Aslib Journal of Information Management*, vol. 75, no. 1, pp. 149–170, 2023.
- [56] S. A. Langley, J. P. Messina, and N. J. Moore, “Using meta-quality to assess the utility of volunteered geographic information for science,” *International Journal of Health Geographics*, vol. 16, no. 1, 2017.

Actualización de la curva EAC de la presa Santa Catarina mediante LiDAR-VANT y batimetría-VSNT

Updating the EAC curve of Santa Catarina dam using UAV-LiDAR and USV-bathymetry

Mercado Jaraba, Manuel E.*, Fuentes, Sebastian** y Chávez, Carlos**

*Maestría en ciencias (Hidrología Ambiental), Departamento de Investigación y Posgrado Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Querétaro**

*Centro de investigación del Agua, Departamento de Ingeniería en Riego y Drenaje, Centro de investigaciones del Agua, Universidad Autónoma de Querétaro***
Querétaro, México

mmercado30@alumnos.uaq.mx ORCID([https://orcid.org/0009-0003-2609-3321]); sebastian.fuentes@uaq.mx ORCID([https://orcid.org/0000-0002-8425-4942]); chagcarlos@uaq.mx ORCID ([https://orcid.org/0000-0002-8108-2815])

Resumen: La sedimentación en embalses compromete la gestión hídrica sostenible. En este estudio se actualizó la curva elevación-áreas-capacidades de la presa Santa Catarina integrando tecnologías topográficas y batimétricas con vehículos no tripulados. Se ejecutó un levantamiento topobatimétrico usando un dron LiDAR DJI Matrice 350 RTK (sensor Zenmuse L2) y una ecosonda monohaz en un vehículo de superficie no tripulado Apache 3. Los datos se procesaron y fusionaron para generar un Modelo Digital de Elevaciones de alta resolución. A partir de este modelo, se calculó la nueva curva EAC y se cuantificó la pérdida de capacidad por sedimentación mediante comparación con la curva de proyecto original. Los resultados mostraron una reducción drástica en la capacidad de almacenamiento, con pérdidas que alcanzan más del 70% en la cota mínima (1994.1) y se estabilizan alrededor del 78% en las cotas superiores. El error absoluto total acumulado fue de 11.98 Mm³. Se concluye que la metodología es efectiva para la caracterización geométrica precisa del vaso, proporcionando información fundamental para actualizar los planes de operación y planificar actividades de mantenimiento. Los hallazgos resaltan la necesidad de monitoreos periódicos con tecnologías de adquisición masiva de datos para una gestión de la infraestructura hídrica.

Palabras clave: Presas; Sedimentación, Curva EAC, batimetría, LiDAR, MDE.

Abstract: Reservoir sedimentation compromises sustainable water management. This study updated the elevation-area-capacity curve of the Santa Catarina Dam by integrating topographic and bathymetric technologies with unmanned aerial vehicles. A topographic-bathymetric survey was executed using a DJI Matrice 350 RTK LiDAR drone (Zenmuse L2 sensor) and a single-beam echosounder on an Apache 3 unmanned surface vehicle. The data were processed and merged to generate a high-resolution Digital Elevation Model (DEM). From this model, the new EAC curve was calculated, and the capacity loss due to sedimentation was quantified by comparing it with the original design curve. The results showed a drastic reduction in storage capacity, with losses reaching more than 70% at the lowest elevation (1994.1) and stabilizing around 78% at the upper elevations. The total accumulated absolute error was 11.98 Mm³. It is concluded that the methodology is effective for accurately characterizing the reservoir's geometry, providing essential information for updating operating plans and planning maintenance activities. The findings highlight the need for periodic monitoring using massive data acquisition technologies for water infrastructure management.

Keywords: Dams; Siltation; EAC curve; Bathymetry; LiDAR; DEM.

1. Introducción

La curva elevaciones-áreas-capacidades (EAC)

es una herramienta fundamental en la gestión de vasos de almacenamiento; estas curvas muestran de forma gráfica la capacidad que tiene el vaso para almacenar agua a diferentes niveles de elevación [1]. Las presas se ven afectadas por procesos de sedimentación que

compromete la capacidad de almacenamiento, la operatividad estructural y la seguridad aguas abajo al aumentar el riesgo por desbordamiento[2].

La presa Santa Catarina ubicada en el municipio de Querétaro, no es ajena a esta problemática: Es usada con diferentes fines dentro de los que destacan la recreación y el uso paisajismo, los cuales se pueden ver afectados por la acumulación progresiva de azolves en el fondo, proceso que altera los parámetros hidráulicos fundamentales de la presa y compromete la disponibilidad del recurso hídrico en esta misma llegando a generar dificultades en la planeación y operación[3]. La capacidad útil de la presa se ve disminuida por estos procesos de sedimentación, sin embargo, la curva EAC vigente no refleja de ninguna forma esta disminución, por lo que, bajo eventos de precipitación extrema el riesgo de sobrepasar el nivel de operación del vertedero aumenta, pudiendo llegar a generar impactos sobre la infraestructura y población localizadas agua abajo.

Las metodologías tradicionales para la generación de la curva EAC generalmente usan datos generados mediante ecosondas monohaz y topografía convencional, las cuales no consideran las variaciones en el terreno a lo largo del tiempo. La tecnología LiDAR (Light Detection and Ranging) desde Vehículos Aéreos No Tripulados (VANT) para la recopilación de datos topográficos y la batimetría desde Vehículos de Superficie No Tripulados (VSNT) representan una herramienta revolucionaria en este campo debido a su eficacia para modelar taludes con resolución centimétrica y levantamientos batimétricos detallados de forma segura y eficiente [4]. La aplicación conjunta y sincronizada de estas técnicas para la generación de un modelo geométrico integrado de la presa representa un avance metodológico de gran potencial[5], ya que predomina una escasez en documentación de literatura técnica y el estudio no se enfoca principalmente en aspectos instrumentales, si no que sirve como base para desarrollar protocolos estandarizados para el procesamiento conjunto de datos y la cuantificación robusta de incertidumbres.

En ese contexto, la actualización de la curva EAC de la presa Santa Catarina se presenta como una necesidad operativa relevante. Desde la perspectiva de la seguridad hidrológica, una curva EAC inexacta introduce incertidumbres significativas en los procesos de gestión de embalses. El no considerar las variaciones temporales de los parámetros hidráulicos conlleva a una estimación errónea del volumen disponible para los diferentes usos domésticos y en

procesos de análisis de seguridad hidrológica como el tránsito de avenidas [6]. Por lo anterior se ve justificada la necesidad de contar con información batimétrica y topográfica actualizada y de alta precisión que sirva como base confiable para la toma de decisiones técnicas y la reevaluación del riesgo hidráulico asociado a la presa[7].

Aunado a lo anterior, la creciente demanda del recurso hídrico hace necesario la formulación estrategias tanto de construcción de nuevas estructuras de almacenamiento como de mantenimiento de las ya existentes de tal forma que se pueda garantizar el abastecimiento para los diferentes usos [8], por lo que los resultados obtenidos en este estudio cobran relevancia. De la misma forma, se prevé un aumento en la ocurrencia de precipitaciones extremas y teniendo en cuenta la carencia en estrategias de prevención y gestión de este tipo de fenómenos meteorológicos [9], este estudio proporciona una herramienta clave para la descripción de la recurrencia de los eventos de desbordamiento y así generar respuesta a las consecuencias asociadas a estos mismos fenómenos.

El objetivo principal de este trabajo es actualizar la curva EAC de la presa Santa Catarina mediante la integración de datos LiDAR-VANT y batimetría-VSNT. Los objetivos específicos incluyen: a) Realizar un levantamiento topobatimétrico integrado de la presa utilizando plataformas no tripuladas (VANT y VSNT); b) Construir un Modelo Digital de Elevaciones (MDE) de alta resolución que represente de forma fiel la geometría actual del fondo y los taludes del embalse; c) Generar una nueva curva EAC y cuantificar la posible pérdida de almacenamiento por sedimentación, comparándola con la curva anterior del proyecto.

La relevancia de este estudio trasciende el ámbito específico de la presa Santa Catarina, ya que la metodología desarrollada puede ser replicada en numerosos embalses del país que enfrentan problemáticas similares de sedimentación, contribuyendo así al fortalecimiento de las capacidades técnicas para el monitoreo y la gestión del recurso hídrico.

El presente artículo se organiza de la siguiente manera: La sección 2 describe en detalle la metodología empleada, incluyendo la descripción de los equipos utilizados, los protocolos de adquisición de datos, el procesamiento mediante técnicas geoestadísticas y los procedimientos de control de calidad. La sección 3 presenta los resultados obtenidos, con énfasis en la nueva curva EAC, la cuantificación de pérdidas de capacidad y la caracterización espacial de la sedimentación. La sección 4 discute los hallazgos en el contexto del

conocimiento existente, analiza las implicaciones técnicas y operativas e identifica las limitaciones del estudio. Finalmente, en la sección 5 se sintetizan las conclusiones principales y se proponen recomendaciones para la gestión del embalse y futuras investigaciones.

2. Materiales y métodos

2.1. Área de estudio

El estudio se llevó a cabo en el embalse de la presa Santa Catarina, localizada al oeste del estado de Querétaro, jurisdicción de municipio de Santa Rosa Jauregui. Según datos del Sistema Nacional de Seguridad de presas de la Comisión Nacional de Agua (CONAGUA), su primer llenado fue en el año 1887 y se encuentra en la latitud 20.7917 y longitud: -100.458[10]. En la Fig.1 se muestra la ubicación del área de estudio mencionada.

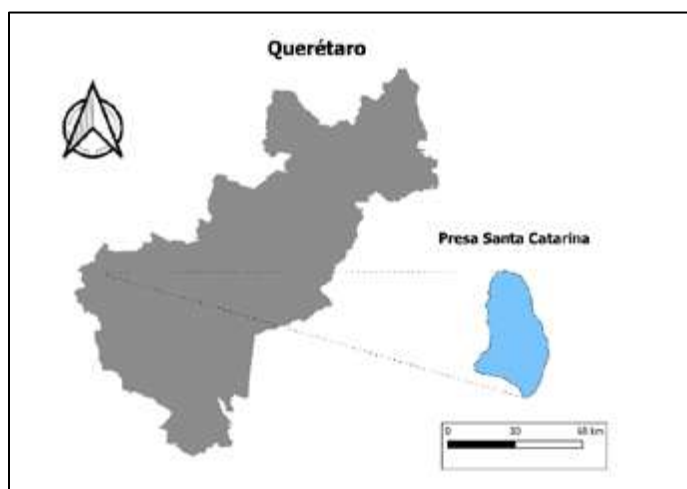


Figura 1: Ubicación de la presa Santa Catarina, Querétaro.

De la misma forma, se llevó a cabo la delimitación de la cuenca a la cual pertenece la cuenca, esto con la intención considerar el posible origen de los sedimentos aguas arriba, como se muestra en la Fig.2.

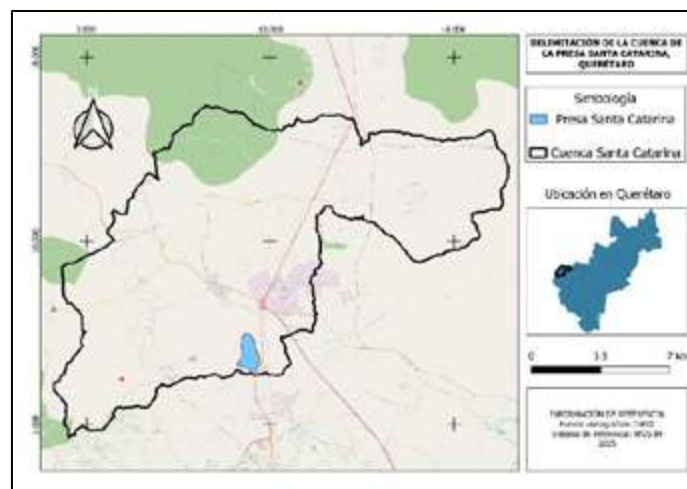


Figura 2: Ubicación de la presa Santa Catarina, Querétaro.

2.2. Adquisición de datos

2.2.1. Levantamiento Batimétrico

Para la medición de la batimetría se empleó el equipo autónomo Apache 3 CHCNAV, el cual cuenta con una ecosonda monohaz de 200 kHz con precisión de ± 1 cm $+0.1\%$, para cubrir toda el área inundada del vaso, obteniendo los valores como una nube de puntos de las profundidades del fondo del embalse.

La sonda fue calibrada in situ para determinar el offset vertical y la velocidad del sonido en el agua, el VSNT estaba equipado con una antena de georreferenciación en el tiempo real con corrección cinemático (RTK). Este equipo está específicamente diseñado para levantamientos batimétricos de alta precisión en ambientes hidrográficos diversos. El sistema integra múltiples sensores en una plataforma estable y maniobrable, permitiendo adquisición eficiente de datos en áreas de difícil acceso para embarcaciones convencionales.

Para la planificación del barrido batimétrico se tuvieron en cuenta diferentes parámetros como el diseño de las líneas de navegación, el cual incluye el espaciamiento entre líneas; la velocidad óptima de navegación óptima la cual está determinada por la resolución espacial y la estabilidad de la plataforma, la frecuencia de muestreo y la definición del área de estudio teniendo en cuenta la delimitación precisa del polígono de trabajo, la identificación de áreas de riesgo y obstáculos y el establecimiento de zonas de exclusión. Dentro de las condiciones ambientales de operación se consideraron: la velocidad del viento, de las corrientes y el oleaje máximo presentado en la presa al momento de realizar las mediciones.

Se llevó a cabo de la misma forma la calibración del equipo y el monitoreo constante de alertas automáticas por pérdida de datos, verificando el mapa de cobertura en tiempo

real. Esta configuración permitió una adquisición eficiente y precisa de datos batimétricos, garantizando la completa cobertura del vaso de la presa y la calidad requerida para los posteriores análisis de sedimentación. La integración de todos los subsistemas en una plataforma optimizó significativamente el tiempo de operación y redujo los riesgos asociados a los métodos tradicionales de batimetría.

2.2.2. Levantamiento topográfico

La captura de la topografía de los taludes y áreas no inundadas del vaso se realizó mediante un sensor LiDAR DJI MATRICE 350 RTK con cámara Zenmuse L2. El vuelo se realizó a una altura de 120 m sobre el punto de despegue, y una densidad de 57 puntos/m². El dron se enlazó a una base RTK para obtener precisión centimétrica con corrección en tiempo real.

El VANT constituye un sistema integrado que combina capacidades de escaneo laser y fotogrametría, permitiendo la generación de modelos digitales de elevación de ultra alta resolución. Para la definición de la altura de vuelo óptima se tiene en cuenta valores como la densidad de puntos objetivo en el terreno y el campo de visión de sensor. De la misma forma se calcula el espaciamiento entre pasadas del vuelo teniendo en cuenta el ancho de barrido a la altura óptima determinada y el solape lateral requerido. La frecuencia de escaneo, el patrón de escaneo y la configuración de la cámara RGB se determinaron de forma específica para el área de barrido, monitoreando en tiempo real el proceso de adquisición de datos, así como su calidad y el estado del sistema.

Esta configuración y planificación meticulosa permitió la captura eficiente de datos topográficos de alta precisión, complementando perfectamente los datos batimétricos y garantizando la generación de un modelo digital de elevaciones integrado y coherente para todo el vaso de la presa.

2.3. Procesamiento de datos y control de calidad

Todos los datos se proyectaron al sistema de coordenadas UTM Zona 14N y se referenciaron al datum WGS84. Las trayectorias del VSNT y los valores de profundidades se procesaron con el software Hydrosurvey, para realizar correcciones y filtrado de datos para obtener una nube de puntos batimétrica en formato *.LAS.

Los datos LiDAR se procesaron en el software DJITerra, aplicando algoritmos de corrección de trayectoria. De la misma forma se clasificaron los puntos

por categoría dependiendo su origen los cuales podían ser “suelo”, “vegetación baja” entre otros. Esta clasificación se basó en la morfología matemática y la identificación de puntos de suelo mediante filtro progresivo, la clasificación de la vegetación por análisis de distribución vertical y la detección de ruido por criterio de aislamiento espacial.

El procesamiento de datos se estructuró en una secuencia lógica que garantizó la calidad y consistencia de los productos finales, integrando técnicas estadísticas, algoritmos geoespaciales y controles de calidad automatizados. Se realizaron correcciones de la trayectoria y filtrado mediante eliminación de valores mediante la detección de reflexiones múltiples por análisis de profundidades anómalas y por ángulo de incidencia del haz para eliminar mediciones de elevación fuera de valores estándar.

Para la generación del MDE se llevó a cabo un filtrado de los puntos que no correspondían al suelo, de la misma forma para eliminar los datos que el dron tomó correspondientes para el espejo de agua los cuales fueron reemplazados por la batimetría.

La integración de los datos, batimétrico y topográfico, se llevó a cabo mediante el uso del software Cloud Compare generando un único dataset y verificando la coherencia en la zona de solape entre ambos conjuntos y realizando ajustes mínimos de desplazamiento en las zonas donde fuera necesario. Correspondientemente el MDE se generó a partir de la nube de puntos integrada utilizando el método de interpolación Kriging[11] con un tamaño de píxel de 1205X2447 cm para representar fielmente las discontinuidades del terreno y de este mismo se generaron curvas de nivel en el software QGIS 3.34.

Para el control de calidad del MDE se verificó la continuidad topográfica de los valores resultantes, así como la validación de los puntos de control independientes. La cobertura espacial fue del 100% del área del vaso, este procesamiento riguroso, fundamentado en principios geoestadísticos sólidos y múltiples controles de calidad, garantizó la generación de productos de elevación con niveles de precisión y confiabilidad adecuados para los análisis de sedimentación y capacidad operativa del embalse.

2.4. Cálculo de la curva EAC

La determinación de la curva EAC se fundamenta en el cálculo del volumen de un cuerpo irregular mediante la integración numérica de las áreas transversales de este mismo. Como la geometría del vaso del embalse es compleja, el método usado consiste en discretizar el volumen en una serie de estratos horizontales cuyo volumen individual puede ser calculada de forma aproximada y sumada para obtener la capacidad de

almacenamiento acumulada[12].

Mediante el MDE de alta resolución obtenido en los pasos anteriores se divide el volumen en una serie de estratos horizontales de elevación constante o curvas de nivel. Para cada una de estas curvas de nivel, se calculó el área superficial dentro de cada contorno y luego, el área acumulada para cada cota consecutivas[13]. Finalmente, el volumen se calculó mediante la expresión (1), conocido como método del prisma o regla trapezoidal, constituye uno de los enfoques más utilizados en el cálculo de volúmenes de embalses debido a su simplicidad conceptual y facilidad de implementación. Este método se fundamenta en el principio de discretización volumétrica, donde el volumen total del embalse se divide en una serie de estratos horizontales, cada uno de los cuales se modela un prisma de base variable.

$$V_{ij} = \left(\frac{A_i + A_j}{2} \right) * \Delta h \quad (1)$$

Donde:

V_{ij} : Volumen incremental entre las elevaciones i y j

A_i, A_j : Áreas superficiales acumuladas entre las elevaciones i y j.

Δh : Espesor constante del estrato correspondiente en este a 0.5 m en este caso.

La capacidad acumulada del embalse (C_k) hasta cierta elevación se obtuvo mediante la sumatoria de todos los volúmenes incrementales desde la cota mínima hasta la cota de muerte (z_k), usando la siguiente expresión (2):

$$C(z_k) = \sum_{i=1}^k V_{ij} \quad (2)$$

Donde $C(z_k)$ es la capacidad acumulada a la elevación z_k .

Este enfoque constituye una técnica estándar en la evaluación de recursos hídricos y es adecuado en la actualización de curvas EAC cuando se cuenta con datos topobatómétrico de alta resolución que garanticen que la discretización represente de forma fiel la geometría del vaso[14], como sucede en este caso. El método supone que la variación del área con la elevación entre dos cotas es lineal, lo que geoméricamente equivale a aproximar el volumen del estrato como un prismatoide (Poliedro con vértices en dos planos paralelos) cuya sección transversal varía linealmente entre A_i y A_j .

Desde la perspectiva del cálculo integral el método corresponde a la aplicación de la regla del trapecio para la integración numérica:

$$V = \int_{z_i}^{z_{i+1}} A(z) dz \approx \frac{\Delta h}{2} [A(z_i) + A(z_{i+1})] \quad (3)$$

Esta aproximación es exacta cuando la función $A(z)$ es lineal y proporciona una aproximación de primer orden para funciones no lineales. Dentro de las ventajas de este método resaltan su simplicidad computacional, ya que es una fórmula algebraica simple, de fácil interpretación y poca carga computacional. De la misma forma, el tiempo de cálculo es menor y adecuado y es aplicable para cualquier tipo de geometría de embalses y funciona adecuadamente con diferentes intervalos de elevación.

2.5. Análisis de incertidumbre y validación de resultados

Para cuantificar la pérdida de capacidad en el embalse y la precisión de los valores reflejados en la curva EAC actualizada validando la metodología, se empleó un análisis de errores mediante comparación directa con la curva de capacidad original del proyecto. Para cada elevación dentro del rango del embalse, se calculó la pérdida de capacidad porcentual mediante la expresión (3):

$$P_c(z_i) = \frac{V_{actual}(z_i) - V_{diseño}(z_i)}{V_{diseño}(z_i)} * 100\% \quad (4)$$

Donde:

$P_c(z_i)$: Pérdida de capacidad porcentual de los datos en la elevación (z_i).

$V_{actual}(z_i)$: Capacidad actual acumulada en la elevación z_i

$V_{diseño}(z_i)$: Capacidad acumulada de diseño en la elevación z_i

De la misma forma, para cada elevación se llevó a cabo el cálculo del error absoluto en el rango operativo de la presa, con la expresión (4):

$$E_{abs}(z_i) = V_{actual}(z_i) - V_{diseño}(z_i) \quad (5)$$

Donde:

$E_{abs}(z_i)$: Error absoluto de los datos en la elevación (z_i) medido en Mm^3 .

$V_{actual}(z_i)$: Capacidad actual acumulada en la elevación z_i

$V_{diseño}(z_i)$: Capacidad acumulada de diseño en la elevación z_i

Se consideraron las fuentes significativas de error en la cadena de medición y procesamiento, dentro de ellas el error del sensor de profundidad, error de posicionamiento y error por movimiento de plataforma. De la misma forma el error en el proceso de interpolación y la fusión de datos. Los productos generados cumplen con los estándares de precisión

requeridos para aplicaciones de ingeniería hidráulica. La incertidumbre total está dentro de los límites aceptables para la evaluación de capacidad de embalses y proporciona una base sólida para la trazabilidad de los resultados.

3. Resultados

3.1. MDE integrado

El procedimiento de datos de LiDAR-VANT y batimétrico-VSNT generó un MDE integrado de alta resolución que cubre el 100% del vaso de la presa. Del levantamiento se obtuvieron 36,902 puntos luego de realizar la verificación del control de calidad dando como resultado un modelo de alta precisión. La Fig.2 muestra el MDE resultante sobre el vaso de la presa Santa Catarina:

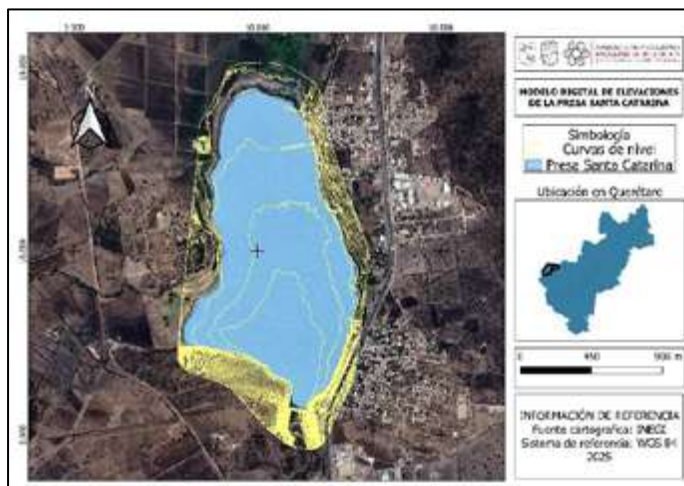


Figura 3: MDE integrado de la presa Santa Catarina.

Las principales limitaciones identificadas en este resultado corresponden a algunas zonas de vegetación densa en la que la penetración del LiDAR es limitada, así como la alta turbidez en el agua lo cual pudo reducir la penetración de la sonda batimétrica, aun así, el MDE integrado generado representa la base topográfica y batimétrica más precisa y actualizada disponible para la presa Santa Catarina, garantizando la confiabilidad de los productos derivados de este mismo, que en este caso particular resultan ser el cálculo de las capacidades y el análisis de la sedimentación

3.2. Curva EAC actualizada

La nueva curva EAC (Fig.3), se obtuvo graficando los cálculos presentados en la metodología la cual muestra la capacidad de almacenamiento en todo el rango operativo del embalse. Mostró reducciones consistentes en la capacidad de almacenamiento en diferentes elevaciones con respecto a la capacidad

original del proyecto y con la curva generada por el Sistema Nacional de seguridad de presas para el año 2023, en la cual la tasa de sedimentación es menor que en la actual pero que de igual forma se presenta una disminución progresiva en la capacidad de almacenamiento la cual continua y se magnifica en la actualidad.

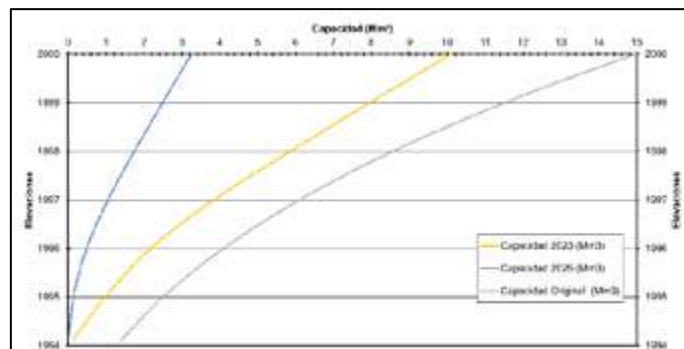


Figura 4: Capacidad de la presa Santa Catarina en diferentes periodos de tiempo.

La generación de la nueva curva mostró una reducción drástica en la capacidad de almacenamiento en todas las elevaciones analizadas, superando el 78% en las cotas más altas y alcanzando valores de 100% en la cota mínima (1994.1) donde el volumen original ha sido completamente colmatado por sedimentos, evidenciando el estado crítico del embalse con una pérdida alta de su capacidad original lo que representa una situación de emergencia operativa que requiere intervenciones inmediata con el fin de recuperar la funcionalidad básica del vaso regulador,

La pérdida de capacidad de la presa con respecto a los valores iniciales (Tabla 1), evidencia la fuerte pérdida de capacidad periódica presentada en la presa.

Tabla 1: Pérdida de capacidad porcentual de la presa Santa Catarina.

Elevación (m)	Volumen Original (Mm ³)	VOLUMEN Actual (Mm ³)	Pérdida de capacidad (%)
1994.1	1.38	0	100
1995.1	2.64	0.162	93.89
1996.1	4.28	0.534	87.53
1997.1	6.33	1.115	82.38
1998.1	8.84	1.817	79.45
1999.1	11.84	2.564	78.35
2000.1	15.30	3.325	78.27

La pérdida de capacidad promedio para los datos analizada fue de 85.98%, valor que refleja la magnitud del proceso de sedimentación. El cálculo del error relativo absoluto por elevación (Tabla 2) aumenta progresivamente

con la elevación, desde 1.38 Mm³ en la cota mínima hasta 11.975 Mm³ en la cota máxima analizada.

Tabla 2, Error absoluto por elevaciones de la presa Santa Catarina.

Elevación (m)	Error absoluto (Mm ³)
1994.1	1.38
1995.1	2.48
1996.1	3.75
1997.1	5.21
1998.1	7.02
1999.1	9.28
2000.1	11.98

El error absoluto promedio para el rango de datos analizado fue de 5.88 Mm³, que también refleja la magnitud acumulativa del proceso de sedimentación sobre la presa.

De la misma forma, el análisis batimétrico reveló un patrón de sedimentación que explica la distribución del error absoluto. Los mayores volúmenes de sedimentos se concentran en las zonas de menor elevación, donde se registra incluso pérdida completa de la capacidad de almacenamiento. El volumen total de sedimentos acumulados en el rango analizado se estima en 11.975 Mm³. El análisis batimétrico identificó tres zonas principales de sedimentación:

- Zona de colmatación total: En las cotas 1994.1 y 1995.1, se ha perdido completamente la capacidad útil, con espesores que superan los 2.5 metros en algunos sectores.
- Zona de transición: Entre las elevaciones 1995.1 y 1997.1. Presenta pérdidas de capacidad entre el 82 y el 94%, donde los procesos de sedimentación han reducido significativamente la sección hidráulica útil.
- Zona de sedimentación activa: Mantiene entre el 18 y el 22% de la capacidad original, pero con tasas de sedimentación acelerada. Se encuentra entre las elevaciones 1997.1 y

2000.1.

Con respeto a la distribución espacial, se puede decir que la sección central de la presa concentra el 35% de la sedimentación. Los resultados presentados establecen una base cuantitativa sólida para la evaluación del estado actual del embalse y proporcionan insumos técnicos para la toma de decisiones en la gestión y operación de la infraestructura.

4. Discusión

La integración de los datos topobatimétricos demostró una alta eficacia en la cobertura completa del vaso superando limitaciones presentadas en los métodos tradicionales de recopilación de datos. La densidad de puntos obtenida permitió identificar variaciones topográficas mínimas frente a las tecnologías convencionales.

Los errores absolutos calculados, que superan los 11 Mm³ en la cota máxima analizada, evidencian un proceso de sedimentación de magnitud excepcional, ya que esta pérdida equivale aproximadamente al 78% de la capacidad original del embalse en el rango estudiado. El error absoluto sigue un patrón consistentemente creciente y progresivo lo cual indica un proceso de sedimentación progresiva en todo el vaso. Esta consistencia en los valores del error, valida la robustez del enfoque, sin embargo, es importante reconocer las limitaciones de la densidad de los sedimentos.

La tasa de sedimentación encontrada sugiere un aceleramiento en el proceso posiblemente relacionado con cambios de uso de suelo en la cuenca vertiente, prácticas agrícolas inadecuadas y eventos climáticos extremos que han incrementado la erosión y transporte de sedimentos, lo que implica una reducción significativa en el volumen útil y afecta la confiabilidad en el almacenamiento en diferentes periodos del año.

La distribución de los volúmenes de sedimentación sugiere que las zonas profundas del embalse han experimentado la mayor afectación, comprometiendo el almacenamiento de reserva y sugiere un proceso de decantación de los materiales mas gruesos en la zona de cola del embalse, mientras que los sedimentos finos se habrían distribuido de manera más homogénea en el vaso.

Desde la perspectiva de la operación del embalse, la pérdida casi total del volumen muerto representa un desafío crítico para la gestión hídrica. Este volumen, diseñado originalmente como reserva estratégica para periodos de sequia extrema y para la sedimentación planificada, ha sido completamente colmatado, eliminando así el margen de seguridad para enfrentar eventos hidrológicos extremos. Adicionalmente, la concentración de contaminantes y nutrientes en un volumen de agua sustancialmente reducido puede generar problemas de calidad del agua, incluyendo

eutrofización y proliferación de algas. La alteración de la geometría original del vaso modifica sustancialmente los patrones de flujo y los tiempos de residencia del agua, factores que influyen directamente en los procesos de mezcla y estratificación térmica. Estos cambios pueden afectar la eficiencia de los procesos de autodepuración y alterar el ecosistema acuático.

Se identificó como principal fuente de incertidumbre de los datos la interpolación en zonas donde la densidad de puntos batimétricos disminuye[15]. La pérdida de capacidad identificada (Mayor al 70% en todas las elevaciones) requiere una revisión inmediata de las reglas de operación en los relacionado con los niveles de alerta para eventos de precipitación extremos. Según la distribución de los niveles de sedimentación se permite priorizar zonas para diferentes programas como el dragado selectivo. De la misma forma, una limitación en el estudio se presenta al momento de no poder determinar la densidad de los sedimentos en el fondo; si bien el error volumétrico está caracterizado, la conversión a masa requiere supuestos sobre la densidad del material sedimentado que puede introducir incertidumbres adicionales. Otra de las principales limitaciones del estudio se presenta en la carencia de datos históricos detallados de batimetría que permitan establecer con mayor precisión la evolución temporal del proceso de sedimentación.

La metodología demostró ser una herramienta confiable para la evaluación objetiva del estado del embalse, ya que con los resultados obtenidos se establece una línea base fundamental para el desarrollo de estrategias de adaptación ante el progresivo proceso de colmatación sobre la presa. Se recomienda implementar un programa de monitoreo continuo con esta metodología con la intención de conocer el comportamiento de la sedimentación en diferentes periodos de tiempo y promover estrategias acordes a esta situación.

Como líneas de investigación futuras se propone el desarrollo de modelos predictivos que integren variables hidrológicas, morfométricas y antrópicas para proyectar la evolución de la sedimentación bajo diferentes escenarios de cambio climático y uso del suelo. Adicionalmente, sería valioso evaluar la efectividad de diferentes técnicas de gestión, considerando aspectos técnicos como ambientales y tecnológicos.

5. Conclusión

Se desarrolló exitosamente una metodología que combina LiDAR-VANT y batimetría-VSNT para la generación de un MDE de alta resolución del vaso de la presa Santa Catarina. Este enfoque demostró ser superior a los métodos tradicionales proporcionando una cobertura

completa del área de interés. Mediante esta metodología se caracterizó con precisión el estado actual del embalse, revelando un avanzado proceso de sedimentación que compromete su operación. Los resultados demuestran una pérdida sustancial de la capacidad de almacenamiento que alcanza valores de más de 11 millones de metros cúbicos en las cotas superiores analizadas. Esta reducción volumétrica, que representa el 78% de la capacidad original en el rango estudiado, evidencia la magnitud crítica del fenómeno de colmatación y sus implicaciones en la gestión hídrica del embalse.[16].

La distribución espacial de los sedimentos analizada mediante el MDE muestra un patrón heterogéneo donde las zonas profundas del vaso han experimentado la mayor afectación, con pérdida completa de capacidad en cotas inferiores. Este patrón de sedimentación no solo reduce la confiabilidad del suministro hídrico para los diferentes usos reportados, sino que también altera la geometría hidráulica del embalse, modificando su comportamiento durante eventos extremos. Los hallazgos justifican la necesidad inmediata de redefinir las reglas de operación y establecer protocolos específicos para la gestión de avenidas bajo las nuevas condiciones morfológicas. Este análisis espacial de la sedimentación permite priorizar diferentes áreas para su intervención y optimizar recursos en un eventual programa de mantenimiento de la presa.

La actualización del a curva EAC mediante tecnologías de adquisición masiva de datos representa una contribución fundamental para la gestión sostenible de infraestructuras hídricas, y demuestra ser robusta en la cuantificación precisa del proceso de sedimentación avanzadas. El análisis de error absoluto proporciona una medida físicamente significativa de las pérdidas de capacidad, superando limitaciones de los indicadores porcentuales tradicionales. No obstante, se identifica como área de mejora futura la caracterización directa de la densidad de los sedimentos, parámetro crucial para convertir volúmenes calculados en masas reales de material.

Los resultados obtenidos constituyen una base técnica sólida para la toma de decisiones sobre el embalse, proporcionando criterios cuantitativos para priorizar inversiones en recuperación y mantenimiento. Se recomienda implementar un programa de monitoreo continuo que permita establecer tendencias temporales de sedimentación y evaluar la efectividad de las medidas de mitigación. Asimismo, los datos generados representan una línea base fundamental para el diseño de intervenciones específicas, como operaciones de dragado selectivo orientadas a recuperar la capacidad de almacenamiento en zonas críticas identificadas.

Finalmente, este estudio evidencia la importancia de la actualización periódica de las curvas de capacidad en embalses afectados por procesos intensivos de sedimentación.

La información generada no solo tiene valor técnico y operativo inmediato, sino que también contribuye al desarrollo de estrategias de adaptación ante el progresivo deterioro de la infraestructura hídrica, representando un aporte significativo para la gestión sostenible de los recursos hídricos en contextos de creciente presión antropogénica y climática.

6. Referencias bibliográficas

- [1] O. Santillan, «Simulación histórica de la evolución de niveles en una laguna a través de sus registros de lluvia. Caso de la Laguna de Atotonilco, Jal.» 2004.
- [2] J. Fripp, G. Morris, S. Hajimirzaie, y C. C. Hoeft, «Sedimentation and Small Dams», pp. 195-201, may 2020, doi: 10.1061/9780784482971.019.
- [3] A. Shatnawi y D. Abdullah, «Siltation of Wadi Al-Arab Reservoir Using GIS Techniques», *Jordan Journal of Civil Engineering*, vol. 10, n.º 4, 2016.
- [4] M. A. R. Villalba, *Topografía: Conceptos y aplicaciones*. Ecoe Ediciones, 2023.
- [5] J. Fallas, «Modelos digitales de elevación: Teoría, métodos de interpolación y aplicaciones». 2007.
- [6] R. Taborda, «Impactos Generados por las Fallas o Rompimiento de las Presas de Relaves», dic. 2024, Accedido: 20 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en:
<http://repository.unad.edu.co/handle/10596/60690>
- [7] M. Ordaz, M. Torres, y R. Dominguez, «VULNERABILIDAD Y RIESGO POR INUNDACIONES», 2013.
- [8] A. I. Ramírez, «La seguridad de presas desde la perspectiva hidrológica: Conferencia Enzo Levi 2010», *Tecnol. Cienc. Agua*, vol. 2, n.º 2, pp. 157-173, jun. 2011.
- [9] M. A. Pérez Martínez y A. Ruiz Luna, «Marco legal relativo a eventos de precipitación extrema, con efecto sobre la vulnerabilidad costera en el noroeste de México», *Rev. Bio Cienc.*, vol. 9, mar. 2022, doi: 10.15741/revbio.09.e1177.
- [10] F. I. Arreguín-Cortés, R. Murillo-Fernández, y H. Marengo-Mogollón, «Inventario nacional de presas», *Tecnol. Cienc. Agua*, vol. 4, n.º 4, pp. 179-185, oct. 2013.
- [11] J. B. Sendra y R. C. García, «Métodos de interpolación para la elaboración de un modelo digital de elevaciones», *Estud. Geográficos*, vol. 62, n.º 245, pp. 605-620, dic. 2001, doi: 10.3989/geogr.2001.i245.268.
- [12] I. Ariza Hernández, «Estimación de aportaciones deducidas a presas mediante análisis de series de tiempo estacionales», 2012, Accedido: 10 de octubre de 2025. [En línea]. Disponible en:
<http://colposdigital.colpos.mx:8080/xmlui/handle/10521/725>
- [13] S. Pérez Nieto y R. F. Hernández Saucedo, *Topografía Moderna Para Ingenieros*. 2024.
- [14] S. A. Ochoa-García, «Aplicación de una metodología simplificada para estimar las curvas de capacidad de embalses», jul. 2021, Accedido: 10 de octubre de 2025. [En línea]. Disponible en:
<https://riunet.upv.es/handle/10251/169767>
- [15] V. H. Burgos y A. Salcedo, «Modelos digitales de elevación: Tendencias, correcciones hidrológicas y nuevas fuentes de información». 2014.
- [16] Á. F. Moreira Romero, «Gestión de la sedimentación en los embalses», *Dominio Las Cienc.*, vol. 8, n.º 1, pp. 1303-1312, 2022.

Diseño de domo desplegable frente a vientos regionales de México

Design of a deployable dome for regional winds in Mexico

Constante Torres, Xochitl¹, Pérez-Moreno, L. Francisco¹, Yáñez-Godoy, Humberto², Horta Rangel, Jaime Moisés¹, López Domínguez, Guillermo Iván¹ y Arjona Catzim, Iván Fermín¹.

¹*División de Investigación y Posgrado, Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Querétaro. Querétaro, México.*

xoch.constante@gmail.com; ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-6273-140X>; lf.perez@uaq.mx; horta@uaq.mx; guillermo.lopez@uaq.edu.mx; ivan.arjona@uaq.mx.

²*University of Bordeaux, Arts et Métiers Institute of Technology, CNRS, Bordeaux INP, I2M, UMR 5295, F-33400 Talence, France.*

humberto.yanez-godoy@u-bordeaux.fr; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9918-3457>.

Los desastres naturales causan importantes pérdidas humanas y económicas. El programa de protección civil se encarga del rescate y de la recuperación de la normalidad, con el objetivo de brindar estabilidad a la sociedad afectada. Es necesario ofrecer refugios que brinden servicios de alojamiento, salud e higiene. En México, existen lugares designados como posibles refugios, aunque en ocasiones estos pueden no ser suficientes, por lo que es importante contar con un plan de emergencia que incluya refugios temporales. Estos refugios deben ser ligeros, prácticos y transportables; cualidades que poseen las estructuras desplegables, ya que, por su configuración de elementos dispuestos en forma de X conectados en los extremos, cambian su geometría compacta al expandirse y cubrir grandes áreas sin necesidad de usar mucho material.

En este artículo se estudia un domo desplegable propuesto por Kalantar y Borhani [1]. Este modelo ha sido evaluado en cuatro casos, cada uno correspondiente a una zona diferente a lo largo de México propensa a desastres naturales. Debido a la ligereza de la estructura, la metodología de diseño se basa en el efecto de las fuerzas de viento. Por esta razón, se utiliza en Manual de Diseño de Obras Civiles para Diseño por Viento de CFE [2] donde se encuentra la normativa que rige en México. Dicha normativa se complementará con el programa ANSYS Workbench para crear una simulación de sistemas de fluidos, en este caso, el viento sobre la estructura. Además, se emplea el software RAM Elements, en el que se diseñan y seleccionan los elementos de acero considerando que la relación de esfuerzos sea menor a 1.

Con esto se puede obtener una estructura que funcione en general en el país en casos de emergencia; se mencionan las conexiones y anclajes sugeridos, aunque se sugiere para futuras investigaciones profundizar en ellos, además de probar nuevos materiales y optimizar secciones.

Palabras clave: Refugio temporal; Estructura desplegable; Análisis por viento; CFD; ANSYS Workbench.

Abstract: Natural disasters cause significant human and economic losses, and civil protection programs are responsible for rescue and recovery efforts to restore stability to affected communities. It is essential to provide shelters that offer accommodation, health, and hygiene services. In Mexico, designated locations serve as potential shelters, but these may sometimes be insufficient, making emergency plans for temporary shelters crucial. These shelters must be lightweight, practical, and transportable—qualities inherent in deployable structures. Due to their X-shaped configuration, with elements connected at the ends, these structures can shift from a compact to an expanded form, covering large areas with minimal material use.

This article examines a deployable dome proposed by Kalantar and Borhani [1]. The model has been evaluated in four cases, each corresponding to a different disaster-prone zone across Mexico. Due to the structure's lightweight nature, the design approach focuses on the effects of wind forces. For this reason, the Manual for the Design of Civil Works for Wind Design by CFE [2], which provides Mexico's regulatory standards, is utilized. This standard is complemented by ANSYS Workbench software to simulate fluid systems, specifically wind effects on the structure. Additionally, RAM Elements software is used to design and select steel elements, ensuring the stress ratio remains below 1.

This approach enables the development of a structure suitable for general use in emergencies across the country. Suggested connections and anchors are mentioned, but further research is recommended to explore these in depth, test new materials, and optimize sections.

Keywords: Temporary shelter; Deployable structure; Wind analysis; CFD; ANSYS Workbench.

1. Introducción

Diversas zonas de México son altamente vulnerables a desastres naturales [3], por lo que aumenta la necesidad de refugios temporales para proteger a la población afectada[4].

Los refugios son un elemento del protocolo de rescate de Protección Civil, el cual sirve para resguardar, proteger y alentar a la ciudadanía a volver a la normalidad [4]. Entre sus funciones se encuentran brindar resguardo y proporcionar áreas de recreación y socialización, además de comida, higiene, médicos, etc.

Algunas zonas en México no cuentan con refugios establecidos o su capacidad es limitada, por lo que disponer de refugios temporales que sean ligeros y transportables para áreas remotas puede ser de gran utilidad e importancia para brindar un mejor servicio social.

Las estructuras desplegables son aquellas que pueden doblarse y reducirse a un tamaño muy pequeño, y al desplegarse, pueden cubrir áreas muy grandes. Estas estructuras están formadas por elementos unidos y articulados en las intersecciones de ejes en sus extremos y en su interior en forma de X, lo que proporciona puntos de apoyo estructurales [5] Pueden formar cubiertas muy resistentes si uno o más de sus elementos están correctamente anclados y fijados. Las estructuras desplegables son estructuras con grandes oportunidades debido a su versatilidad y ligereza [6], por lo que están empezando a ser grandemente estudiadas, y clasificadas[7].

Estas estructuras ya han sido aplicadas como refugios, como por el ejército estadounidense con diversos refugios clasificados por Thrall y Quaglia [8].

Al ser estructuras ligeras en comparación con el área que pueden cubrir, tienen un factor de Packaging ratio alto que es definido por Zhu & Filipov [9] como la relación entre el volumen desplegado y el volumen compactado de la estructura. Por su ligereza, la fuerza principal que les afecta es el viento, ya que puede provocar volcamientos y deformaciones, lo que comprometería su funcionamiento y seguridad.

Existen estudios estructurales que han sido aplicados a estructuras desplegables temporales. Por ejemplo, Gantes [10], identificó fallas por resistencia, rigidez y pandeo. Su enfoque de nodo maestro-esclavo logró resultados precisos con elementos de viga isoperimétrica. En los estudios de viento a estructuras desplegables se encuentra Chi [11] que utilizó la teoría de membranas y método de elementos finitos (FEM), Jayson y Mathy [12] estudiaron un domo autoerigible capaz de soportar la fuerza que provocaría el vuelco, asumiendo un campo de presión similar al del flujo de aire sobre una esfera, Liu et al. [13] predijo mediante distintos métodos numéricos los efectos del viento en un techo retráctil de un estadio. Similar a este estudio, Morales Guzmán [14] propuso un refugio de emergencia para la Cruz Roja, diseño [15] y cálculo mediante el software WinTess, basado en el método de Diseño por Factor de Carga y Resistencia (LRFD), según las normas de la Ciudad de México. Estos estudios demuestran el interés por el desarrollo de metodologías para el diseño de las estructuras desplegables considerando sus características intrínsecas.

En México, la forma de estudiar el viento se realiza mediante el manual de la CFE, que describe el proceso con fórmulas y condiciones; sin embargo, no considera exactamente estas estructuras debido a su geometría compleja, por lo que se complementó con otros métodos. La metodología de CFE evalúa el terreno y la estructura, además de la ubicación de la zona en la que será calculada, para obtener la velocidad de diseño y las presiones correspondientes a las distintas zonas del país.

El estudio de la Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) permite describir con mayor precisión el comportamiento del viento sobre las estructuras. Esta técnica numérica resuelve ecuaciones que describen el flujo de fluidos, en este caso, la capa límite atmosférica (CLP) [16]. La CFD ofrece flexibilidad y rapidez [17].

El domo seleccionado es el de Kalantar Borhani [1], una malla esférica cuadrangular [7], con 10 arcos de familias de barras en forma de x curvas, entrelazados perpendicularmente que forman un domo. Esta formación le proporciona mayor estabilidad (Figura 1).



Figura 1. Copa Esférica Expandible por Kalantar y Borhani [1].

Dado que se busca que funcione como refugio, su importancia para la sociedad y su propósito de servicio deben ser evaluados para garantizar su correcto funcionamiento. Los aspectos que más pueden afectarla son el viento, por lo que su análisis y diseño se enfocarán principalmente en ese aspecto.

Para poder diseñarlo, se considera que variarían las condiciones del comportamiento del viento a lo largo del país; el domo se evaluó bajo cuatro condiciones de zonas vulnerables representativas en México. Para ello, se combinaron metodologías como CFE para las velocidades de diseño, ANSYS Workbench para las presiones y RAM Elements para el diseño de las secciones, manteniendo la relación de esfuerzos por debajo de la resistencia admisible.

Finalmente, se realizó una comparación de secciones para los 4 casos evaluados, identificando la más crítica y determinando si esta sección podía cumplir las condiciones para poder adaptarse a todo el territorio nacional. Los resultados mostraron que existe una configuración que resiste las condiciones evaluadas y que mantiene lo esencial, que es la ligereza y transportabilidad. De esta manera, se puede considerar como una solución viable para un refugio temporal en México.

2. Metodología

El estudio estructural, además de incluir cargas vivas y muertas, incluye los efectos del viento, que en este caso es en lo que se enfocará el estudio para diseñar los elementos del domo desplegable.

Como se mencionó las normativas de México se encuentran limitadas a estas estructuras, por lo que de ellas solo se tomará las velocidades de diseño ya que dependen de las zonas en México que ya se encuentran estudiadas e indicadas en las isotacas [2]. El análisis se complementó con el programa Workbench de ANSYS, lo que permitió obtener presiones precisas en

puntos clave de la estructura. Estos puntos, al utilizar áreas tributarias, fueron analizados en el software RAM Elements para diseñar elementos con un índice de relación de esfuerzos inferior a 1.



Figura 2. Proceso de Diseño Estructural para un Domo Desplegable

2.1. Regiones vulnerables en México

El territorio mexicano cuenta con una variedad de zonas con climas y geometrías bastas por lo que su exposición a sufrir desastres naturales es grande, se ha registrado que desde 1900 a 2018 más de 231 desastres ocurrieron, con más de 20 mil vidas perdidas y 18 millones afectados directa o indirectamente, con 105 tormentas, 69 inundaciones, 35 sismos 12 procesos de remoción en masa, y 19 de actividad volcánica [18]

Las distintas regiones del país, debido a su ubicación geográfica en el globo, pueden verse afectadas por diversos fenómenos naturales como huracanes, sismos, inundaciones, etc [3]. La Tabla 1, muestra algunas zonas en México y los desastres naturales a los que son más propensas.

Tabla 1. Desastres naturales por zonas en México

Zona	Sismos	Inundaciones	Huracanes	Fracturas de suelo (hundimientos)
Centro sur	✓	✗	✗	✗
Sureste	✗	✗	✓	✓
Ciudad de México	✓	✓	✗	✓
Costa del Pacífico	✓	✗	✓	✗

Las regiones seleccionadas para este estudio fueron áreas costeras y pequeñas ciudades con topografías similares, ya que podrían ser zonas que requieren refugio.

2.2. Metodología CFE

En el capítulo de Análisis por viento del Manual de Diseño de Obras Civiles para Diseño por Viento de CFE [2] se presentan los procedimientos necesarios para determinar las velocidades del viento en la República Mexicana y las fuerzas correspondientes para desarrollar el diseño eólico en diferentes tipos de estructuras.

De acuerdo al manual de la CFE, la clasificación de las estructuras pone a las estructuras desplegables como las de estudio en Tipo C por su grado de seguridad bajo y ser elementos temporales menor a 6 meses, la clasificación de las estructuras por la respuesta que genera el viento es tipo 4 por su geometría que puede tener problemas inestables aerodinámicos por los ángulos de incidencia del viento. Estas clasificaciones recomiendan realizar un análisis dinámico; se presenta el diagrama del proceso en la Figura 3.

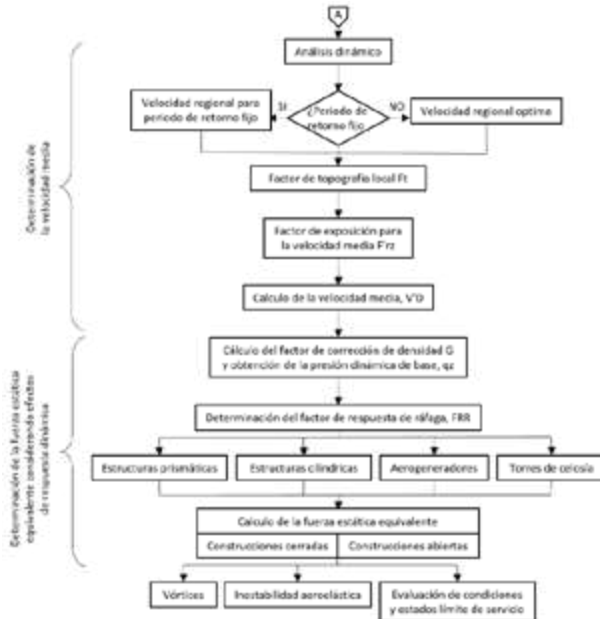


Figura 3. Diagrama de flujo para el análisis dinámico.

2.2.1 Factor de topografía local F_T

Toma en consideración el efecto topográfico local del lugar donde estará ubicada la estructura, desde laderas hasta colinas; se utilizará la Tabla 2.

Tabla 2. Factor de topografía local, modificado de [2]

Sitios	Ejemplos de topografía local	F_t
Protegidos	Valles cerrados	0.9
Normales	Terreno plano: pendientes menores a 5%	1.0
Expuestos	Montes, cerros, lomas, cimas, colinas, montañas.	Ecuaciones (1), (1) y (3)
	Terraplenes:	
	Peñascos, acantilados, precipicios, diques, presas.	

$$\text{Si } \frac{H_t}{zL_u} < 0.05 \rightarrow F_T = 1.00 \quad (1)$$

$$\text{Si } 0.005 \leq \frac{H_t}{zL_u} < 0.45 \rightarrow F_T = 1 \left[\frac{H_t}{3.5(z_t + L_1)} \right] \left(1 - \frac{|X_t|}{L_2} \right) \quad (2)$$

$$\text{Si } \frac{H_t}{zL_u} < 0.45 \rightarrow F_T = 1 + 0.71 \left(1 - \frac{|X_t|}{L_2} \right) \quad (3)$$

Donde:

H_t = altura del promontorio o terraplén,

L_u = distancia horizontal en barlovento desde $H_t/2$ a la cresta

X_t = distancia horizontal en barlovento o sotavento de la estructura a la cresta,

L_1 = escala de variación vertical de F_t , entre $0.36L_u$ a $0.4H_t$, en metros

L_2 = escala de variación horizontal de F_t , $4L_1$ en barlovento, $10L_1$ en sotavento, en metros,

Z_t = altura de referencia del nivel promedio hasta la altura total de la estructura.

2.2.2 Factor de exposición para la velocidad media F'_{rz}

Se obtiene considerando la combinación de la rugosidad local y la variación de la velocidad según la altura. Es un factor sin dimensiones. Se calcula bajo las siguientes condiciones.

$$F'_{rz} = 0.702\bar{b} \quad \text{si} \quad z \leq 10 \quad (4)$$

$$F'_{rz} = 0.702\bar{b} \left(\frac{z}{10} \right)^{\alpha'} \quad \text{si} \quad 10 < z \leq 200 \quad (5)$$

$$F'_{rz} = 0.702\bar{b} \left(\frac{\delta}{10} \right)^{\alpha'} \quad \text{si} \quad z \geq \delta \quad (6)$$

Donde:

$\bar{b}$ = coeficiente de escala de rugosidad que se encuentra en la Tabla 3.

α' = exponente de variación indicado en la Tabla 3

z = altura media en metros tomada a partir del nivel medio del terreno

δ = altura gradiente en metros de la Tabla 3

Tabla 3. Coeficientes de rugosidad

Categoría del terreno	$\bar{b}$	α'	δ (m)
1	1.17	0.10	280
2	1.00	0.14	350
3	0.82	0.19	410
4	0.61	0.26	470

2.2.1 Velocidad básica de diseño

Velocidad en m/s calculada en un período de 10 minutos para determinar el factor de respuesta de ráfaga.

$$V_D = F_t * F'_{rz} * V_r \quad (7)$$

Donde:

F_r = factor de topografía sin dimensiones de toma de la Tabla 2.

F'_{rz} = factor de exposición para la velocidad media

V_r = Velocidad regional de ráfaga en km/h encontrada en las isotacas

2.3. Análisis CFD

Se desarrolló un modelo de análisis basado en principios de mecánica de fluidos computacional (CFD) y métodos numéricos que permitieron simular la interacción entre el flujo de aire y la estructura.

Se decidió considerar únicamente el ángulo de incidencia más crítico, que sería de 45° respecto a la perpendicular de una cara, lo que significa que la ráfaga de aire llegaría directamente a una esquina (Figura 4).

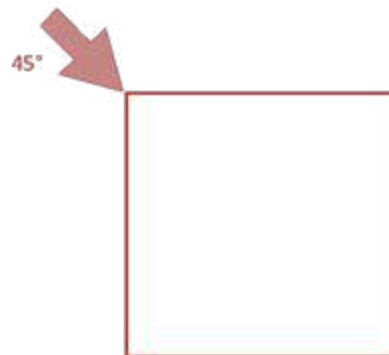


Figura 4. Ángulo de incidencia de viento.

En esta etapa se utilizó Workbench, que crea simulaciones de sistemas de fluidos mediante el modelado y métodos numéricos, resolviendo modelos matemáticos discretizados y sujetos a condiciones de contorno definidas.

El proceso que lleva a cabo consta de lo siguiente:

- Geometría: Se definió la geometría de la estructura desplegable en su forma abierta, se colocó la superficie externa en diferentes posiciones y se probó dentro de un túnel de viento también definido alrededor de la geometría.
- Mallado: Se definieron las condiciones iniciales de frontera, como la entrada, la salida, las paredes y la figura. Se genera el mallado y, de ser necesario, se refina en puntos de interés.
- Fluent: Se configuran los valores de velocidad del fluido, en este caso, el viento, en los modelos que el programa resolverá.
- Resultados: Se analizan las presiones generadas por las gráficas en los puntos de interés.

Se exportan las presiones de cada caso en los puntos más críticos de la estructura, que son las uniones de los arcos.

2.4. Diseño por software RAM Elements

Por medio del software de diseño RAM se introdujo la geometría tomando en consideración las libertades de cada nodo y se asignaron las fuerzas de diseño a los elementos, obtenidas a partir de las presiones previamente calculadas por áreas tributarias.

El análisis en este programa, basado en sugerir diferentes secciones, nos proporcionó la relación de esfuerzos correspondientes según actúen en cada elemento.

3. Resultados

Siguiendo la metodología mencionada, se obtuvieron los siguientes resultados. Se evaluaron las zonas a estudiar y se integraron los programas de diseño estructural para obtener un diseño más preciso.

3.1. Zonas en México

La localización a través del cinturón de fuego afecta a parte del país, especialmente las zonas costeras del Pacífico [3]. Con la información de la Tabla 1, la planificación y ubicación estratégica de los refugios serán fundamentales para reducir el impacto de los desastres en las regiones.

Se seleccionaron 3 ciudades representativas de México a lo largo del país para diseñar una estructura desplegable que pueda funcionar en México, las cuales son indicadas gráficamente en la Figura 5:

- San Quintín, B.C.
- Soto la Marina, Tamaulipas
- Uruapan, Michoacán
- Celestún, Yucatán



Figura 5. Mapa de México indicando las ciudades seleccionadas

3.2. Velocidades dinámicas de diseño

Con un periodo de retorno de 10 años debido a que es una estructura del Grupo C, se muestra en el mapa de Isotacas las velocidades regionales con periodo de retorno de 10 años (Figura 6), y las características de las zonas seleccionadas en la Tabla 4 consultado en el Manual de Diseño por Viento de la CFE [2].

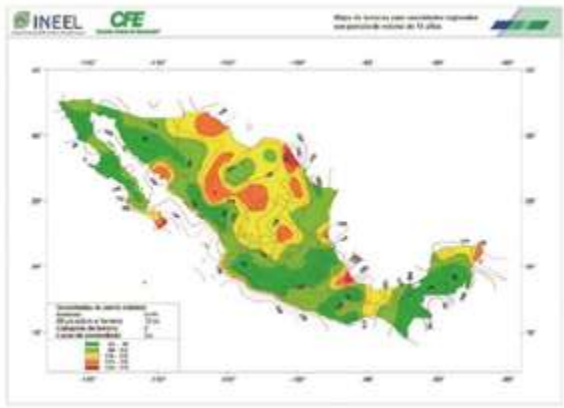


Figura 6. Mapa de isotacas para velocidades regionales con periodo de retorno de 10 años del manual de la CFE [2].

Tabla 4. Datos de ubicación, velocidad regional con periodo de retorno, altitud y temperatura mínima.

Ciudad	Uruapan, Michoacán	Soto la Marina, Tamaulipas	Celestún, Yucatán	San Quintín, Baja California
Longitud	-102.07	-98.208	-90.383	-115.937
Latitud	19.405	23.764	20.858	30.532
Velocidad regional (km/hr)	95.24	109.7	107.5	71.2
Altitud (msnm)	1617	20	10	10
Temperatura mínima diaria (°C)	4.7	5.6	13.5	4.9

En sus condiciones externas, el Factor de Topografía local, denotado por F_t , será normal, ya que se busca ubicar los refugios temporales en lugares amplios y con pendientes bajas.

$$F_T = 1.0 \tag{8}$$

El domo desplegable cuenta con un factor de exposición F'_{rz} debido a su altura menor a 10 m; esta será constante.

$$F'_{rz} = 0.702\bar{b} \tag{4}$$

$$F'_{rz} = 0.702 * 1.17 = 0.82 \tag{9}$$

Las velocidades básicas de diseño fueron calculadas a partir de la fórmula a partir de la velocidad regional de cada una (Tabla 5):

$$V_D = F_r * F'_{rz} * V_r \tag{7}$$

$$V_D = 1.0 * 0.82 * V_r \tag{10}$$

Tabla 5. Velocidades de diseño en cada caso.

Zona	Velocidad de diseño V_D (m/s)
San Quintín, B.C.	16.59
Soto la Marina, Tamaulipas	25.56
Uruapan, Michoacán	22.19
Celestún, Yucatán	25.04

3.3. Presiones

La herramienta utilizada para calcular las presiones fue Workbench de ANSYS, mediante métodos numéricos de CFD y parámetros de viento aplicados a un domo de membrana con una estructura principal desplegable basada en elementos en tijera.

En el software ANSYS Workbench se introdujeron las condiciones y las velocidades de cada caso y se analizaron hasta obtener las gráficas de presión.

Con el siguiente procedimiento:

- Modelado Geométrico

En el programa SketchUp se creó la geometría del domo, importada desde SpaceClaim, en la que se verificaron y corrigieron errores de geometría y de continuidad (Figura 7).

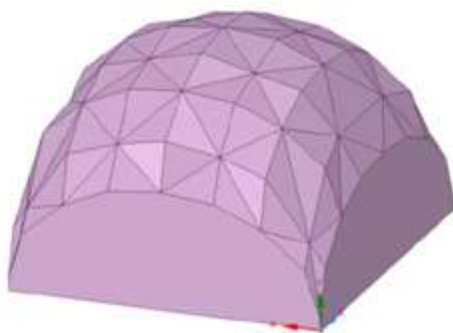


Figura 7. Geometría del domo en SketchUp

Se creó un recinto estableciendo un dominio de simulación con dimensiones determinadas [16] y medidas basadas en su altura para garantizar un desarrollo adecuado del flujo de viento (Figura 8).

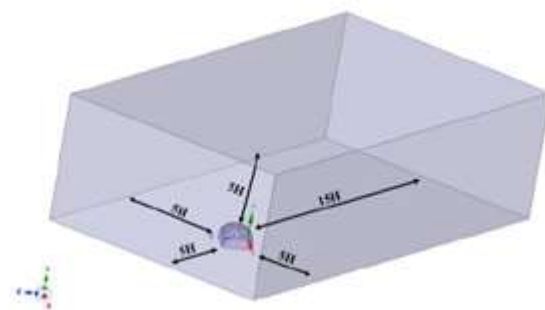


Figura 8. Domo y recinto en SpaceClaim

- Generación de mallado

La malla se define en el módulo *mesh*, se identificaron las secciones de entrada, salida, paredes y cuerpo sólido. El mallado se aplicó mediante refinamiento progresivo, utilizando el comando *sizing* en todo el dominio, garantizando una malla uniforme tanto en el domo como en el recinto (Figura 9).

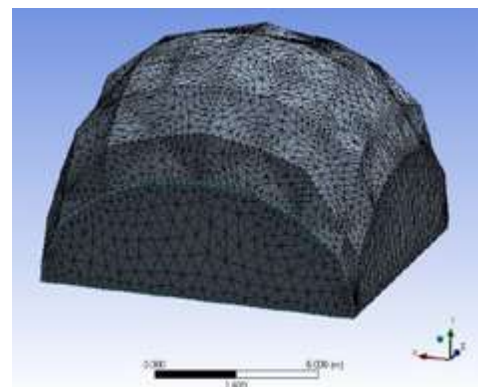


Figura 9. Características del mallado en Domo

- Simulación en Fluent

El modelo se importó en Fluent para asignar las condiciones de frontera en la entrada y salida del túnel de viento virtual, indicando las velocidades para cada caso de la Tabla 5. Posteriormente se definió un modelo de turbulencia *k-epsilon* comúnmente utilizado en problemas de aerodinámica, garantizando una estabilidad numérica, [19], con el que se realizaron las iteraciones del volumen discretizado hasta alcanzar la convergencia.

- Resultados

En este apartado se visualizaron los resultados de la simulación y se extrajeron, mediante planos y polilíneas auxiliares, sobre los ejes principales.

Las imágenes de la Figura 10 muestran cómo el viento actúa a través de los colores que representan presiones y succiones.

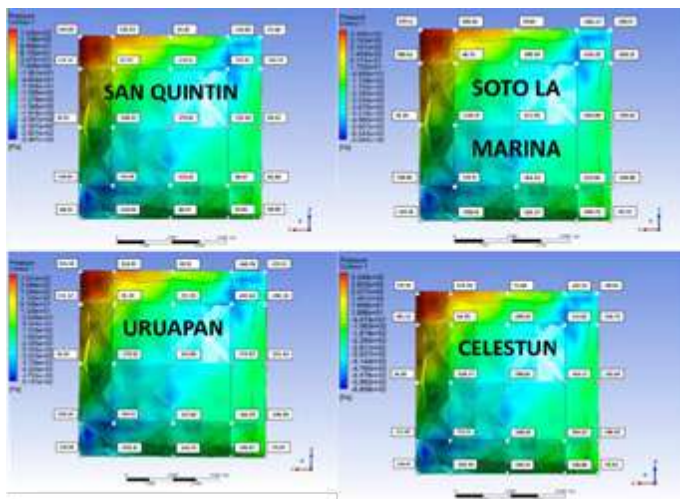


Figura 10. Presiones en forma de viento a 45 grados respecto al eje en una de las caras del perfil. (a) San Quintín, B.C. (b) Soto la Marina, Tamaulipas (c) Uruapan, Michoacán (d) Celestún, Yucatán.

3.4. Diseño de elementos

En el software RAM se introdujo la geometría considerando aspectos importantes de la estructura, como su conexión de cruz aleatoria (Figura 11), que permite libertades de rótula en cada nodo (Figura 12) y el movimiento de plegado y desplegado.



Figura 11. Conexiones de cruz aleatorias en los elementos. Copa Esférica Expandible por Kalantar y Borhani [1].

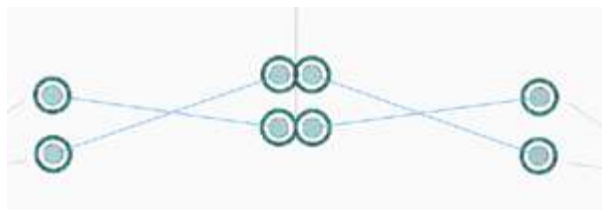


Figura 12. Articulaciones en la estructura.

Los apoyos de anclaje de tornillo como los que sugiere J. Llorens [20] son considerados articulados, ya que, físicamente, están asegurados al terreno mediante estacas que permiten la transmisión de momentos, pero no de desplazamientos.

Se asignaron las fuerzas de diseño a los elementos obtenidos a partir de las presiones previamente calculadas por áreas tributarias en los puntos de intersección de los arcos que conforman la estructura.

En el análisis de este programa, se sugirieron diferentes secciones para determinar la relación de esfuerzos correspondiente a cada elemento. Se evaluaron varias secciones en cada caso, las cuales tienen una relación de esfuerzos menor a 1, para poder seleccionar la más ligera; un ejemplo es la Figura 13.

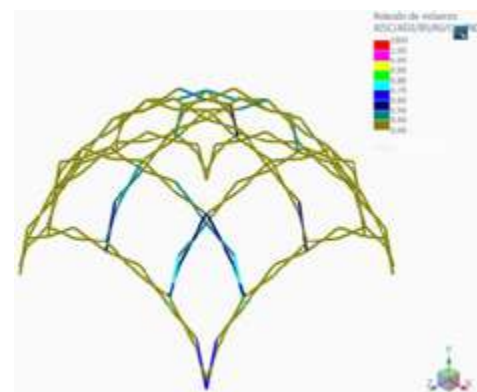


Figura 13. Relación de esfuerzo para el caso de Soto la Marina.

Considerando secciones rectangulares HSS de acero A36 comúnmente utilizadas en la industria de la construcción. La estructura contaría con 268,26 metros lineales de este perfil para su construcción total (Figura 14).



Figura 14. Modelo con secciones HSS_RECT 5x2x3/16

En la Tabla 6 se presentan los perfiles propuestos, sus dimensiones, pesos y la comparación del peso en kilogramos y toneladas de la estructura completa.

Tabla 6. Secciones estructurales propuestas en la región.

	H	A	b	H (cm)	A (cm)	b (cm)	AREA	AREA (cm ²)	KG/M	PESO TOTAL kg	PESO TOTAL Ton
SAN QUINTIN	3	1.5	3/16	7.62	3.81	0.48	1.55	9.98	0.08	21.02	0.0210
	3.5	1.5	1/8	8.89	3.81	0.32	1.19	7.66	0.06	16.13	0.0161
	4	1.5	1/8	10.16	3.81	0.32	1.31	8.47	0.07	17.83	0.0178
SOTO LA MARINA	5	2	3/16	12.7	5.08	0.48	2.48	16.03	0.13	33.75	0.0338
	5	2.5	1/8	12.7	6.35	0.32	1.81	11.69	0.09	24.62	0.0246
	6	2	3/16	15.24	5.08	0.48	2.86	18.45	0.14	38.85	0.0388
URUAPAN	3.5	1.5	1/4	8.89	3.81	0.64	2.25	14.52	0.11	30.57	0.0306
	4	1.5	1/4	10.16	3.81	0.64	2.50	16.13	0.13	33.97	0.0340
	5	2	1/8	12.7	5.08	0.32	1.69	10.89	0.09	22.93	0.0229
CELESTUN	5	2	3/16	12.7	5.08	0.48	2.48	16.03	0.13	33.75	0.0338
	5	2.5	1/8	12.7	6.35	0.32	1.81	11.69	0.09	24.62	0.0246
	6	2	1/8	15.24	5.08	0.32	1.94	12.50	0.10	26.32	0.0263

4. Discusión

Esta metodología se propone debido al potencial uso de las estructuras desplegables, que pueden tener como refugios temporales, por lo que deben estar correctamente calculadas para garantizar seguridad y un servicio adecuado. Los estudios mencionados en la introducción no consideraban el viento como la fuerza principal y empleaban métodos que no consideraban del todo las características propias de las estructuras desplegables, por lo que aún no existe una metodología específica que lo haga adecuadamente.

Las normativas y metodologías más utilizadas resultan insuficientes para estructuras desplegables, motivo por el cual se integró el estudio con otros software y programas de simulación. El objetivo de esta integración fue describir mejor el comportamiento de la estructura bajo los efectos del viento y, a partir de ahí, diseñar perfiles estructurales que mantuvieran la ligereza y compacidad necesarias para su transporte y despliegue. Como resultado del análisis comparativo de los cuatro casos, se seleccionó el perfil HSS_RECT 5x2x3/16 ya que en el caso más crítico cumple con las condiciones de esfuerzo. Además, una de las condiciones era que la sección fuera esbelta, ya que la estructura debía mantenerse transportable y compacta. Al comparar los pesos totales (Tabla 6), este perfil resultó ser el más óptimo.

El análisis realizado describe el comportamiento del domo sometido a vientos en México, con un ángulo de incidencia de 45°, lo que permitió elegir adecuadamente sus perfiles. La combinación de diferentes herramientas de software facilitó una descripción más realista del comportamiento tanto del domo como del viento y permitió diseñar con mayor precisión.

Para futuras investigaciones, sería oportuno comparar los resultados con experimentación en túnel de viento, evaluar nuevos materiales y perfiles, analizar en mayor profundidad las conexiones y anclajes que formarán parte del diseño completo e incluso explorar nuevas geometrías de estructuras desplegables.

5. Conclusión

El aporte de este artículo es tanto social como estructural, ya que la propuesta planteada puede ayudar a Protección Civil a mejorar la atención a la población durante situaciones de emergencia. La ausencia de este tipo de estructuras en los protocolos actuales de Protección Civil en México, así como la necesidad de contar con ellas, representan una oportunidad para desarrollar un sistema estructural innovador y ofrecer una alternativa que mejore la respuesta, el servicio y las labores de rescate ante desastres naturales.

La metodología empleada demuestra que la integración de distintos programas de simulación y diseño permite obtener resultados más precisos, lo que sugiere que pueden combinarse para desarrollar métodos más rápidos, eficientes y confiables. Esta mezcla también abre la posibilidad de programar, en el futuro, una plataforma más completa que concentre toda la metodología en un único software.

Como resultado, se obtuvo una estructura que puede funcionar de manera general en el país en situaciones de emergencia. Además, se sugieren conexiones y anclajes que podrían estudiarse con mayor profundidad en trabajos posteriores para lograr un diseño totalmente desarrollado.

Esta estructura tiene el potencial de ser utilizada en todo el territorio nacional, asegurando su correcto funcionamiento estructural y aportando múltiples beneficios sociales al mejorar la capacidad de respuesta ante desastres.

6. Agradecimientos

Los autores agradecen a la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI), a la Universidad Autónoma de Querétaro (UAQ), a la Universidad de Burdeos y al Instituto de Ingeniería Mecánica (I2M) por su apoyo financiero y técnico para la realización de este proyecto.

Abreviaturas

Las siguientes abreviaturas se utilizan en este manuscrito:

CFE: Comisión Federal de Electricidad

CFD: Dinámica de Fluidos Computacional

CLP: Capa límite atmosférica

FEM: Método de elementos finitos

7. Referencias bibliográficas

- [1] N. Kalantar and A. Borhani, "Transformable Design-Deployable Domes," <https://www.youtube.com/watch?v=sM55HwF3bSU>.
- [2] Comisión Federal De Electricidad, "manual de diseño de Obras Civiles Sección C: Estructuras Tema 1: Criterios Generales de Análisis y Diseño," Mexico, 2020.
- [3] CENAPRED, "Atlas Nacional de Riesgos." Accessed: Oct. 21, 2025. [Online]. Available: <http://www.atlasnacionalderiesgos.gob.mx/>
- [4] Gobierno Federal de Mexico, *Manual Operativo "APCE."* 2011.
- [5] S. Krishnan and Y. Liao, "Geometric Design of Deployable Spatial Structures Made of Three-Dimensional Angulated Members," *Journal of Architectural Engineering*, vol. 26, no. 3, Sep. 2020, doi: 10.1061/(asce)ae.1943-5568.0000416.
- [6] I. Crespo Pérez, "DESMONTABILIDAD Y RIGIDEZ: Estructuras desplegables y espaciales fijas," Trabajo de fin de grado, Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, 2017.
- [7] F. Escrig and J. P. Valcárcel, "ESTRUCTURAS ESPACIALES DESPLEGABLES CURVAS (EXPANDABLE CURVEO SPACE BAR STRUCTURES)," 1988. [Online]. Available: <http://informesdelaconstruccion.revistas.csic.es>
- [8] A. P. Thrall and C. P. Quaglia, "Accordion shelters: A historical review of origami-like deployable shelters developed by the US military," Feb. 2014. doi: 10.1016/j.engstruct.2013.11.009.
- [9] Y. Zhu and E. T. Filipov, "Large-scale modular and uniformly thick origami-inspired adaptable and load-carrying structures," *Nat Commun*, vol. 15, no. 1, Dec. 2024, doi: 10.1038/s41467-024-46667-0.
- [10] C. Gantes, "Design Methodology for Deployable Structures," Massachusetts Institute of Technology, Massachusetts, USA, 1991.
- [11] T. Chi, "NOVEL DEPLOYABLE MEMBRANE STRUCTURES: DESIGN AND IMPLEMENTATION," Singapore, 2007.
- [12] E. M. Jayson and G. R. Mathy, "RAPIDLY DEPLOYABLE LIGHTWEIGHT SHELTERS FOR AUSTERE ENVIRONMENTS," San Diego, California, USA, Nov. 2013. [Online]. Available: <http://www.drash.com/Products/Shelters/SSeries.aspx>
- [13] M. Liu, Q. S. Li, S. H. Huang, F. Shi, and F. Chen, "Evaluation of wind effects on a large span retractable roof stadium by wind tunnel experiment and numerical simulation," *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, vol. 179, pp. 39–57, Aug. 2018, doi: 10.1016/j.jweia.2018.05.014.
- [14] C. C. M. Guzmán, "Emergency refuge design with Plegable systems," *Arquiteturarevista*, vol. 17, no. 1, pp. 1–19, Jan. 2021, doi: 10.4013/arq.2021.171.08.
- [15] C. C. M. Guzmán, "Simplified Development of a Descriptive Geometry for Folding Transformable Roofs," *Modulo Arquitectura CUC*, vol. 28, pp. 285–322, 2022, doi: 10.17981/mod.arq.cuc.28.1.2022.10.
- [16] J. Franke *et al.*, "Recommendations on the use of CFD in wind engineering," *Proceedings of the International Conference on Urban Wind Engineering and Building Aerodynamics*, Jan. 2004, [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/251814717>
- [17] J. Francisco Gutierrez Guzman, J. Moises Horta Rangel, M. Angel Perez Lara Hernandez, H. Yanez-Godoy, M. Angel Perez Lara Her-nandez, and H. Yanez-Godoy CFD, "CFD model to evaluate the performance of a low-rise building exposed to hurricane wind loads with different configurations," May 2023. [Online]. Available: <https://hal.science/hal-04230820v1>
- [18] I. Alcántara-Ayala, "Disasters in Mexico: Maps and notes around an unfinished story," *Investigaciones Geograficas*, no. 100, 2019, doi: 10.14350/rig.60025.
- [19] J. M. Fernandez Oro, *Tecnicas numericas en ingenieria de fluidos*. Barcelona: Editorial Reverte, 2012.
- [20] J. Llorens, "Lightweight Recoverable Foundations For Structural Membranes," in *ADAPTABLES 2006 : proceedings of the joint CIB, Tensinet, IASS international conference on adaptability in design and construction, Volume 2*, F. J. M. Scheublin, A. D. C. Pronk, A. Borgard, and R. Houtman, Eds., Países Bajos: Eindhoven University of Technology, Jan. 2006, pp. 23–27.

Comportamiento mecánico de un concreto con adición de fibras textiles de algodón desechado

Mechanical behavior of concrete with the addition of discarded cotton textile fibers.

Navarro Rubio, Cesar Augusto*, Martínez Ángeles, Hugo*, Trejo Perea, Mario**, Ríos Moreno, José Gabriel**, Carrillo-Serrano, Roberto Valentín**

*División de Investigación y Posgrado, Facultad de ingeniería, Universidad Autónoma de Querétaro 76010, México**

*Facultad de ingeniería, Universidad Autónoma de Querétaro, Querétaro 76010, México***

cnavarro15@alumnos.uaq.mx; hmartinez15@alumnos.uaq.mx; mtp@uaq.mx; riosq@uaq.mx;
roberto.carrillo@uaq.edu.mx; (ORCID: [<https://orcid.org/0009-0003-7541-5841>]; [<https://orcid.org/0000-0002-8552-705X>]; [<https://orcid.org/0000-0002-7014-3379>]; [<https://orcid.org/0000-0002-8988-2729>]; [<https://orcid.org/0000-0002-8246-8920>])

Resumen: Este estudio analiza cómo la incorporación de fibras de algodón desechado afecta la resistencia a compresión de una mezcla de concreto. Se diseñaron especímenes con fibras en proporciones de 0%, 0.5%, 1.0% y 5.0%, con una resistencia objetivo de 210 kg/cm², y se sometieron a pruebas de acuerdo con las normas ASTM. Los resultados mostraron que la mezcla con 0.5% de fibras presentó un incremento del 1.48% en resistencia a los 28 días, alcanzando los 221 kg/cm², mientras que las mezclas con 1.0% y 5.0% de fibras mostraron reducciones significativas en la resistencia, con valores de 127 kg/cm² y 87 kg/cm², respectivamente. Además, se observó que las fibras en exceso afectaron la trabajabilidad y aumentaron la porosidad del concreto. Se concluye que la adición de fibras de algodón en pequeñas cantidades puede mejorar la resistencia y el control de grietas en el concreto, mientras que dosis elevadas deterioran sus propiedades. Este enfoque sugiere el potencial uso de fibras de algodón de desecho como refuerzo en concretos convencionales, con oportunidades para futuras optimizaciones.

Palabras clave: CON; concreto con fibras; fibras textiles; algodón desechado; concreto ecológico

Abstract: This study analyzes how the incorporation of discarded cotton fibers affects the compressive strength of a concrete mix. Specimens were designed with fiber proportions of 0%, 0.5%, 1.0%, and 5.0%, with a target strength of 210 kg/cm² and were tested according to ASTM standards. The results showed that the mix with 0.5% fibers exhibited a 1.48% increase in strength at 28 days, reaching 221 kg/cm², while the mixes with 1.0% and 5.0% fibers showed significant reductions in strength, with values of 127 kg/cm² and 87 kg/cm², respectively. Additionally, it was observed that excessive fibers affected the workability and increased the porosity of the concrete. It is concluded that adding small amounts of cotton fibers can improve the strength and crack control of concrete, while higher doses deteriorate its properties. This approach suggests the potential use of discarded cotton fibers as reinforcement in conventional concretes, with opportunities for future optimization.

Keywords: CON; fiber-based concrete; textile fibers; discarded cotton; ecological concrete

1. Introducción

El acelerado proceso de urbanización ha impulsado una creciente demanda de materiales de construcción tanto en países desarrollados y como en desarrollo, lo cual ha generado impactos negativos en la sostenibilidad urbana, la economía y el medio ambiente [1-2]. Este fenómeno se agrava por el incremento constante de la población mundial, que intensifica tanto la fabricación de concreto como la creación de residuos textiles, identificados como uno de los principales problemas ambientales actuales [3]. Se estima que el

40% de los desechos a nivel mundial se deposita en vertederos, lo que evidencia la necesidad de estrategias eficaces de gestión y reciclaje [4].

En el caso de la industria textil, el consumo mundial de prendas de vestir y el modelo de “moda rápida” han incrementado de manera considerable la eliminación de residuos. En Australia, por ejemplo, alrededor de 501 millones de kilogramos de textiles son desechados anualmente, mientras que a nivel global, cerca del 87% de los residuos textiles terminan en vertederos o incineración. Pese a ello, más del 90% de estos residuos son susceptibles de ser reciclados, dado

que los textiles son prácticamente 100% reutilizables. Sin embargo, la tasa de recuperación sigue siendo baja: en Estados Unidos, aunque se generan 38 kg de consumo per cápita de fibra al año, más de 18 kg se descartan, y únicamente el 30% de los desechos textiles logra desviarse hacia reciclaje [5-6].

Paralelamente, en la construcción, el concreto sigue siendo uno de los materiales más empleados, aunque presenta limitaciones como fragilidad y baja resistencia a esfuerzos de tensión [7]. En este sentido, el refuerzo con fibras ha surgido como una opción eficiente para optimizar sus propiedades mecánicas. Si bien las fibras sintéticas suelen otorgar mejores características, las fibras naturales representan una opción atractiva debido a su bajo costo, abundancia, baja densidad, carácter renovable y biodegradabilidad. Además, estas fibras muestran propiedades intrínsecas como alta resistencia y rigidez específica [8-11].

Diversos estudios han reportado mejoras significativas en concretos reforzados con fibras de origen natural. Se ha comprobado que la incorporación de fibras naturales sometidas a irradiación gamma mejora hasta en un 40% la capacidad de compresión del concreto. Asimismo, investigaciones con fibras de celulosa han mostrado reducciones en la fisuración de hasta un 85.00% respecto al concreto convencional, además de mejorar la durabilidad frente a ciclos de congelación-descongelación, gracias a su capacidad de absorción de agua cercana al 85.00% que favorece el fraguado interno. Además, en otros trabajos, se evidenció que el comportamiento a compresión de concretos confinados con polímeros reforzados con fibras naturales fueron eficaces para incrementar la capacidad de confinamiento [12-16].

Sin embargo, a pesar de los resultados positivos, diferentes investigaciones han reportado también ciertas debilidades asociadas al uso de fibras naturales en el concreto, particularmente vinculadas al procedimiento de mezclado, la falta de homogenización, el tamaño y la proporción de las fibras. Estas limitaciones pueden crear reducción en la resistencia a la compresión, causar comportamientos mecánicos inestables o afectar la tensión por rotura, lo que resalta la importancia en el proceso de incorporación de las fibras y de mejorar el diseño de la mezcla [17-21].

En este contexto, se plantea que la adecuación de la mezcla de concreto, incorporando fibras textiles de algodón desechado provenientes de ropa en proporciones de 0.5%, 1.0% y 5.0%, permitirá la reutilización de este material residual. Además, el

concreto conservará su resistencia a la compresión axial simple, sin que se vea afectada negativamente, mejorando al mismo tiempo su trabajabilidad. Por lo tanto, esta combinación podría emplearse como concreto convencional.

El principal objetivo de este manuscrito es estudiar el comportamiento mecánico a compresión de un concreto modificado con fibras de algodón reciclado, evaluando su desempeño frente a un concreto convencional, a fin de determinar la viabilidad técnica de su aplicación. A diferencia de otros estudios que han empleado fibras naturales con resultados variables debido a problemas de dispersión, heterogeneidad o pérdida de resistencia, el presente trabajo propone una metodología que busca superar dichas limitaciones mediante el uso controlado de fibras de algodón de desecho.

A continuación, se mencionan brevemente las posibles contribuciones de este manuscrito:

- a) Se establece una metodología para el diseño de concretos con fibras de algodón de desecho.
- b) Se establece la dosificación de 0.5% para mejorar la resistencia a compresión sin afectar la trabajabilidad.
- c) Se demuestra que un residuo textil puede convertirse en un recurso alternativo para la construcción, con resultados cuantitativos que validan su viabilidad como material de refuerzo en concretos convencionales.

Finalmente, el manuscrito se organiza de la siguiente manera: en la parte de Materiales y métodos se mencionan los procesos empleados, la preparación de las fibras y el procedimiento de mezclado, así como los ensayos realizados. En el apartado de Resultados y discusión, se presentan los valores conseguidos de resistencia a la compresión, discutiendo los resultados en función del porcentaje de fibras. Por último, en la sección de Conclusiones se destacan los hallazgos más relevantes y las implicaciones de la utilización de fibras textiles de algodón recicladas en mezclas de concreto.

2. Materiales y métodos

La investigación se enfocó en analizar el comportamiento mecánico del concreto con integración de fibras textiles de algodón provenientes de ropa desechada. Se estudiaron tres proporciones de adición de fibras (0.5, 1.0 y 5.0% en peso respecto al concreto seco), las cuales fueron comparadas con un concreto de

referencia elaborado sin fibras.

Se elaboraron 36 probetas cilíndricas de concreto, de las cuales 27 correspondieron a mezclas con fibras en las tres proporciones mencionadas, mientras que 9 se utilizaron como grupo de control sin fibras.

El procedimiento de caracterización y preparación de los materiales pétreos, así como las pruebas aplicadas a las mezclas y especímenes de concreto, se realizaron siguiendo las pautas de las normas ASTM correspondientes, con el fin de asegurar la fiabilidad y la reproducibilidad de los resultados conseguidos.

2.1 Materiales pétreos

Los agregados utilizados para la elaboración del concreto (finos, gruesos y cemento) se recolectaron en un banco de materiales del estado de Querétaro, México.

El muestreo se realizó según la norma ASTM D75/D75M-19 [22], con el fin de obtener muestras representativas de los agregados pétreos.

Para el caso de la grava o agregado grueso, que estaba almacenado en pilas, se aplicó el procedimiento de remezclado recomendado por la norma, formando un montículo que posteriormente fue dividido en cuatro cuadros, de los cuales se tomaron cantidades iguales de material. La cantidad total de agregado grueso que se recolectó fue de 150kg.

Para el agregado fino, se eligieron cinco sitios al azar en el banco de materiales, teniendo en cuenta que este material tiende a segregarse durante el almacenamiento. Una vez recolectadas las muestras, se colocaron en costales secos y limpios, asegurando en todo momento evitar la contaminación con residuos u otros materiales extraños. Finalmente, los costales fueron sellados adecuadamente para prevenir pérdidas o alteraciones. El volumen total de agregado fino recolectado fue de 100kg.

2.1.1 Granulometría de los agregados pétreos

El análisis granulométrico se determinó con las normas estandarizadas ASTM-D422 [23] y ASTM-D6913-04 [24]. Para los agregados gruesos (principalmente fracciones arenosas), se utilizó el tamizado en seco mediante una serie de mallas estándar con rendijas entre 4,75 mm y 0,075 mm.

Previo al ensayo, las muestras fueron secadas al horno a 110°C durante 24 horas, asegurando la eliminación de humedad superficial. Posteriormente, se registró el peso de cada porción retenida en las diferentes mallas y con esta información se construyó la curva granulométrica correspondiente, representando el porcentaje pasante en función del tamaño de las partículas.

2.1.2 Contenido de partículas finas

Para obtener el material que atraviesa la malla #200 se usó la norma ASTM C117-23 [25]. Siguiendo la norma las muestras se homogenizaron, fueron secadas en un horno a 110±5°C, y posteriormente fueron sometidas a lavado y tamizado a través de las mallas N°100 y N°200 hasta obtener agua limpia. El material que se retuvo se volvió a secar hasta masa estable para obtener el porcentaje de finos.

2.1.3 Masa volumétrica de los agregados pétreos

La masa volumétrica de la grava y de la arena se determinó usando la norma ASTM D2726/D2726M-21 [26], aplicable a partículas de hasta 101 mm (4 in). Las muestras se obtuvieron por cuarteo, luego fueron homogenizadas y secadas al horno a 110±5°C hasta alcanzar una masa que se mantiene estable.

El ensayo de masa volumétrica se realizó mediante el método de compactación con varilla, colocando el material en tres capas dentro del recipiente, cada una compactada con 25 penetraciones uniformemente distribuidas y enrasadas al final. Posteriormente, el recipiente con material se pesó y, por diferencia con la masa del recipiente vacío, se calculó la masa volumétrica de los agregados gruesos y finos.

2.1.4 Resistencia a la degradación del agregado grueso

Para el agregado grueso, la resistencia a la degradación se determinó utilizando la máquina de la norma ASTM C131/C131M-20 [27]. Para ello, se colocó una muestra representativa junto con esferas metálicas en el cilindro giratorio, operado durante 500 revoluciones a 33 rpm. Posteriormente, el agregado fue cribado en el tamiz N°12 (1.7 mm), desechando la fracción que la atravesó. La pérdida resultante permitió calcular la resistencia a la abrasión del agregado.

2.1.5 Absorción y densidad de los

agregados

Para obtener la capacidad de absorción y densidad real de los agregados, se utilizó la norma ASTM-C128-15 [28] utilizada para agregados finos y ASTM-C127-15 [29] para agregados gruesos.

La densidad de los agregados finos se obtuvo mediante desplazamiento de agua, mientras que la de los gruesos se calculó pesando la muestra en aire y sumergida. La absorción se calculó como el agregado en su estado saturado con superficie seca por el porcentaje de agua retenida, en relación con su peso seco.

2.1.6 Contenido de humedad de los agregados

Se evaluó el contenido de humedad siguiendo la norma ASTM-C566-19 [30].

El procedimiento comienza con el pesaje de una muestra característica de los agregados en estado húmedo. Posteriormente, la muestra se seca al horno a $110 \pm 5^\circ\text{C}$ hasta llegar a masa estable, eliminando toda el agua presente. Tras el secado, se pesó de nuevo la muestra para determinar la masa de sólidos secos.

2.2 Preparación y evaluación de fibras textiles naturales de algodón

Para obtener el algodón en fibras, se recolectaron residuos provenientes de la industria textil de Querétaro. Estos desechos correspondieron a ropa marcada como “100% algodón”, la cual no cumplía con los estándares de calidad para su comercialización. Se seleccionó únicamente material libre de estampados, liendres, cierres, resortes, botones, insectos, restos de suciedad u otros contaminantes.

La valoración del algodón reciclado se realizó de forma visual, considerando exclusivamente aquellas fibras que no presentaran manchas, residuos o cualquier materia ajena al algodón, asegurando que su uso no afectara el comportamiento de la mezcla modificada de concreto. Posteriormente, se retiró y separó el material innecesario antes de su procesamiento [18-19].

La extracción de las fibras se realizó mediante un proceso similar al utilizado en la producción de estopa, utilizando una desfibradora de tela. El material se

introdujo en la máquina en tamaños uniformes previamente cortados por dos cortadoras rotativas colocadas a 90° , generando piezas cuadradas de aproximadamente 10 mm por lado.

Luego, el material fue transportado de manera uniforme a través de un sistema neumático hacia la máquina deshilachadora modular, compuesta por 6 secciones. En el interior de la máquina, los residuos fueron procesados por un cilindro de gran diámetro, cuyo revestimiento consistía en finas puntas de acero, que giró a alta velocidad para desgarrar, deshilachar y convertir los residuos en fibras.

Es importante destacar que las fibras de algodón reciclado pueden contener rastros de productos químicos no visibles o presentar signos de degradación orgánica, lo cual podría influir en la mezcla de concreto. No obstante, la propiedad más relevante es su capacidad de adsorción de agua [20-21].

La Fig. 1 ilustra el proceso de preparación utilizado para la fabricación de las fibras de algodón.



Figura 1: Fabricación de las fibras textiles naturales de algodón.

2.3 Mezclas de concreto con fibras

La mezcla de concreto se preparó para un total de 36 especímenes, organizados en cuatro grupos: 9 probetas cilíndricas con un 0.5% de fibras de algodón, 9 con un 1.0%, 9 con un 5.0%, y por último 9 especímenes de concreto convencional sin fibras. Para el diseño se estableció una resistencia a la compresión axial simple de $210\text{kg}/\text{cm}^2$ y un revenimiento máximo de 10 cm, asegurando la trabajabilidad adecuada para su manipulación y vaciado en los moldes. Todos los cilindros seguirán la misma proporción de materiales y

procedimiento de mezcla, garantizando la comparabilidad de los resultados, y serán evaluados mediante ensayos de compresión a 7, 14 y 28 días de fraguado como en la Tabla 1.

Los porcentajes de fibras utilizados en los experimentos fueron seleccionados basándose en los estudios [17-21] que indican los posibles contenidos de fibras que permiten evaluar mejoras mecánicas sin afectar significativamente la trabajabilidad del concreto. El número de probetas cilíndricas se estableció de acuerdo con la norma internacional de ensayo (ASTM-C39/C39M-21), garantizando que los resultados obtenidos fueran representativos y confiables.

Tabla 1: Combinaciones, curado y numero de probetas para cada prueba.

		Tiempo de curado			
Prueba		7,0	14,0	28,0	
Porcentaje de algodón del total del peso de una probeta de concreto en estado seco.	0,0%	Compresión	3,0	3,0	3,0
	0,5%	Compresión	3,0	3,0	3,0
	1,0%	Compresión	3,0	3,0	3,0
	5,0%	Compresión	3,0	3,0	3,0
Total de probetas		12,0	12,0	12,0	

2.3.1 Metodología para el diseño de una mezcla de concreto modificado con fibras de algodón

La mezcla de concreto modificada se diseñó tomando como referencia las investigaciones [12-21], la norma ACI PRC-211.1-22 [31] y la norma ASTM C94/C94M-22^a [32]. A partir de la resistencia objetivo, el revenimiento esperado y con base en la granulometría de los materiales, se determinaron las cantidades de cemento, agua, agua/cemento, así como las proporciones de grava y arena necesarias. Posteriormente, se calculó el peso para el porcentaje de fibras de algodón a agregar por m^3 de concreto, multiplicando dicho porcentaje por el peso total de los materiales.

La mezcla se preparó en una revolvedora. En primer lugar, se añadió el 50% de la grava total y el 50% de la arena, mezclando durante 120 segundos. A continuación, se incorporó el 50% del cemento y se mezcló por 30 segundos. Paralelamente, las fibras de

algodón se sumergieron en el 20% del agua total durante 15 minutos para formar una suspensión que garantizara la uniformidad con los otros ingredientes. Una vez preparada la suspensión, se añadieron los agregados y el cemento restante, y se mezclaron durante 2 minutos. Luego, se incorporó el 80% del agua faltante y se mezclaron durante 3 minutos. Después, se dejó reposar 2 minutos, seguido de una mezcla final de 2 minutos para garantizar la homogeneidad.

Posteriormente la mezcla se colocó en moldes con forma cilíndrica de 20cm de altura por 10cm de diámetro, siguiendo la norma ASTM C172-08 [33]. Cada molde se llenó en tres secciones: la primera hasta una tercera parte de su capacidad, la segunda hasta dos terceras partes, y la tercera hasta completar el molde, compactando cada sección con 25 impactos uniformemente distribuidos usando una varilla de compactación, asegurando que la varilla penetrara aproximadamente 2 cm en la capa anterior. Se retiró el exceso de material y se enrasó la parte superior del molde.

Después del colado, los recipientes se cubrieron con plástico y se dejaron a una temperatura de 24°C durante 24 horas. Luego, se procedió al desmoldeo y las probetas fueron trasladadas a una cámara de curado a 23±2°C y a 95% de humedad relativa, por 28 días, en conformidad con la normativa ASTM-C39/C39M-21 [34].

Con ello se prepararon mezclas con fibras de algodón al 0.5%, 1.0% y 5.0%, así como mezclas convencionales sin fibras, utilizando los mismos procedimientos, proporciones y condiciones de curado, para asegurar la comparabilidad de los valores obtenidos en los ensayos posteriores.

La Fig. 2 enseña la preparación que se realizó para la obtención de las probetas cilíndricas de concreto.



Figura 2: Preparación de probetas cilíndricas de concreto.

2.3.2 Revenimiento del concreto fresco

La consistencia de la mezcla se evaluó mediante la prueba de revenimiento, siguiendo los lineamientos de ASTM-C143/C143M-20 [35]. El proceso consistió en llenar un molde cónico truncado de dimensiones estandarizadas en tres secciones, siendo cada una compactada con 25 impactos de varilla. Una vez lleno el molde se retiró de manera vertical y continua, permitiendo que el concreto se asentara. Finalmente, se registró la disminución en la altura del espécimen respecto a la altura inicial del molde, obteniendo así el valor del revenimiento, expresado en centímetros.

2.3.3 Ensayos de resistencia a la compresión axial simple

La prueba se realizó con la norma ASTM-C39/C39M-21 [36], mediante probetas cilíndricas creadas con una relación de altura y diámetro de 2:1 y valores menores a 500 kg/cm^2 .

Cada cilindro de concreto fue medido en su diámetro y altura antes del ensayo, y posteriormente colocado de forma centrada en la máquina universal. La carga se aplicó de manera continua y uniforme, con una velocidad de entre $84 \text{ y } 210 \text{ kg/cm}^2/\text{min}$, hasta alcanzar su carga máxima soportada.

La resistencia a compresión axial simple se determinó con la carga máxima que se registró mediante la Eq. 1:

$$R = \frac{10P}{A} \quad (1)$$

Donde “A” es el área promedio de la sección transversal de la probeta (cm^2), “P” es la carga máxima (kN) y “R” es la resistencia a la compresión axial (MPa).

La Fig. 3 presenta una probeta de concreto en la prensa hidráulica.



Figura 3: Prueba de compresión axial simple en prensa hidráulica universal.

3. Resultados y Discusión

En este apartado se muestran los resultados obtenidos con las pruebas elaboradas tanto a los agregados como a las mezclas con y sin fibras textiles de algodón. Los análisis incluyen la granulometría, propiedades de los agregados (absorción, densidad, peso volumétrico y humedad), así como su resistencia a la degradación. Posteriormente, se enseñan los resultados del diseño de mezclas, el revenimiento del concreto fresco y finalmente, la resistencia a la compresión a distintos días de fraguado.

3.1 Granulometría de los agregados

En la grava, se observó que el mayor porcentaje retenido corresponde al tamiz de $12,5\text{mm}$, con un 41,26%, mientras que la fracción más gruesa ($37,5\text{mm}$, 50mm y 75mm) no presentó material retenido. Esto indica que la grava utilizada tiene un tamaño máximo nominal de 25mm , con una distribución continua en las fracciones intermedias.

En el caso de la arena, el porcentaje con mayor retención se presentó en el tamiz de $0,300\text{mm}$, con un 23,76%, seguido del tamiz de $1,18\text{mm}$, con un 22,51%. El porcentaje que pasa por la abertura de $0,075\text{mm}$ fue de 0%, lo que confirma que la fracción de finos es limitada. La curva granulométrica construida a partir de estos resultados mostró que la

arena empleada se clasifica como arena bien graduada, apropiada para su uso en mezclas de concreto. La Tabla 2 y 3 resumen los valores de las pruebas granulométricas de grava y arena.

Tabla 2: Análisis granulométrico (grava).

Grava			
Tamaño de Partícula (mm)	Peso (gr)	Retenido (%)	Pasante (%)
75,000	0,000	0,000	100,000
50,000	0,000	0,000	100,000
37,500	0,000	0,000	100,000
25,000	134,400	1,760	98,239
19,000	1920,000	25,148	73,091
12,500	3150,000	41,256	31,832
9,500	1180,000	15,455	16,377
4,750	1250,370	16,377	0,000

Tabla 3: Análisis granulométrico (arena).

Arena			
Tamaño de Partícula (mm)	Peso (gr)	Retenido (%)	Pasante (%)
4,750	22,300	4,849	95,150
2,000	60,800	13,220	81,930
1,180	103,520	22,510	59,419
0,500	83,000	18,048	41,371
0,300	109,260	23,758	17,613
0,150	47,320	10,289	7,323
0,075	33,680	7,323	0,000

3.2 Contenido de partículas finas

Se utilizó una muestra con peso inicial de 2000 g, obteniéndose un peso final de 89,57 g después del proceso de lavado.

A partir de estos valores, se calculó el contenido de partículas finas que fue de 4,47%, lo cual se encuentra dentro de los rangos indicados por la normativa que van de 0 a 10% [25] para agregados destinados a la elaboración de concreto hidráulico.

3.3 Masa volumétrica de los agregados pétreos

La Tabla 4 enseña los valores obtenidos, se observa que el peso volumétrico del agregado grueso fue de 1554.18 kg/m^3 y para el agregado fino se obtuvo 1039.64 kg/m^3 .

Tabla 4: Masa volumétrica - Agregados pétreos.

Masa volumétrica		
Agregado	Grueso	Fino
Peso charola	3,841kg	1,000kg
Peso charola con agregado	18,730kg	4,830kg
Volumen charola (m^3)	0,00958	0,002876
Peso volumétrico (kg/m^3)	1554,18	1039,64

El peso volumétrico obtenido para el agregado grueso (1554.18 kg/m^3) se encuentra dentro del rango típico de los agregados pétreos naturales (1400 a 1700 kg/m^3), lo cual indica una adecuada compactación y distribución granulométrica.

Por su parte, el agregado fino presentó un peso volumétrico correspondiente a 1039.64 kg/m^3 , valor que se ubica en el rango esperado para arenas naturales (1000 a 1200 kg/m^3). Este resultado refleja una granulometría acorde con la trabajabilidad de la mezcla y confirma que el material no expone excesiva porosidad ni vacíos.

3.4 Resistencia a la degradación del agregado grueso

La resistencia a la degradación se evaluó conforme a la norma ASTM-C131/C131M-20 [27]. Los resultados presentan una masa inicial de 5000 gr, después del ensayo permanecieron 4350 gr, lo que representa un porcentaje de desgaste del 13%, que se encuentra adentro de los rangos determinados por la normativa, que recomienda valores menores al 40% para agregados destinados a concretos hidráulicos de uso general.

Este resultado sugiere que el agregado grueso utilizado tiene alta resistencia tanto al desgaste como a la abrasión, características deseables para garantizar la durabilidad del concreto. Un bajo porcentaje de desgaste como el obtenido asegura un mejor desempeño del concreto frente a procesos de trituración interna durante el mezclado, transporte y colocación, reduciendo la generación de partículas finas no deseadas y contribuyendo a mantener la resistencia mecánica proyectada para el diseño de mezcla.

3.5 Absorción y densidad de los agregados

Las pruebas se realizaron según las normas ASTM-C128-15 [28] para agregado fino y ASTM-C127-15 [29] para agregado grueso.

Las Tablas 5 y 6 presenta los resultados obtenidos, correspondientes a la arena y a la grava, respectivamente.

Tabla 5: Densidad real - Arena.

Densidad real (finos)	
Denominación	Cantidad
Masa del agregado (g)	329,20
Masa de agua desalojada por muestra (g)	122,80
Volumen de agua desalojada (cm^3)	123,12
Densidad real de finos (g/cm^3)	2,67

Los valores de densidad real obtenidos fueron 2.67 g/cm^3 para los finos (arena) y 2.69 g/cm^3 para los gruesos (grava), los cuales se encuentran en los valores típicos reportados para agregados que son naturales silíceos y calcáreos, que rondan entre 2.55 y 2.75 g/cm^3 .

Tabla 6: Densidad real - Grava.

Densidad real (gruesos)	
Denominación	Cantidad
Masa de muestra Saturada Superficialmente Seca en agua	2568,00g
Masa de muestra Saturada Superficialmente Seca en aire	4085,00g
Volumen real de muestra (cm^3)	1517,00
Densidad real (g/cm^3)	2,69

Estos resultados confirman que tanto la arena como la grava utilizada presentan una composición mineralógica adecuada y estable, sin presencia significativa de materiales livianos o contaminantes que pudieran alterar la densidad.

La similitud de la densidad real del agregado grueso y del fino asegura consistencia en el comportamiento del concreto, favoreciendo el control volumétrico en el diseño de mezcla y reduciendo riesgos de segregación.

La capacidad de absorción de los materiales permitió determinar la cantidad de agua que cada material puede mantener en sus poros. Los valores obtenidos para el agregado fino y grueso se muestran en las Tablas 7 y 8.

Tabla 7: Capacidad de absorción - Arena.

Absorción (finos)	
Peso - Masa Saturada Superficialmente Seca (gr)	600,00
Peso - Masa Seca (gr)	622,27
Absorción (%)	3,71

Tabla 8: Capacidad de absorción - Grava.

Absorción (gruesos)	
Peso de Masa Saturada Superficialmente Seca (kg)	2,50
peso de Masa Seca (kg)	2,43
Absorción (%)	2,80

La arena presentó una capacidad de absorción de 3.71%, mientras que la grava registró un valor de 2.80%. Ambos valores se encuentran dentro de los valores comunes reportados [7-9]: entre 2% y 4% para arenas y entre 0.5% y 3% para gravas naturales.

El valor relativamente alto de la arena indica una mayor porosidad del agregado fino, lo cual puede agrandar la cantidad de agua en la mezcla. En contraste, la grava mostró un nivel de absorción moderado y adecuado para concretos estructurales.

3.6 Contenido de humedad de los agregados

El contenido de humedad de los agregados se evaluó con a la norma ASTM-C566-19 [30], obteniéndose los valores de las Tablas 9 y 10.

Se observa un contenido de humedad significativamente alto en la arena (20.45%), en comparación con la grava (1.493%). Este valor elevado en el agregado fino puede deberse a su mayor porosidad y superficie específica, lo que facilita la retención de agua. Por el contrario, la grava, al tener menor superficie expuesta y capacidad de absorción, presentó un contenido de humedad bajo y más estable.

Tabla 9. Contenido de humedad - Arena.

Designación	Valor
Peso de inicio (gr)	217,30
Peso de fin (gr)	180,40
Humedad (%)	20,45

Tabla 10. Contenido de humedad - Grava.

Designación	Valor
Peso de inicio (<i>gr</i>)	998,29
Peso de fin (<i>gr</i>)	985,90
Humedad (%)	1,49

3.7 Diseño de mezcla de concreto modificado con fibras de algodón

Para la elaboración del concreto con inclusión de fibras de algodón se consideraron los parámetros técnicos de los materiales empleados, de acuerdo con lo mostrado en la Tabla 11.

Tabla 11: Especificaciones técnicas del material para concreto modificado con fibras de algodón.

Especificaciones técnicas		
Denominación		Valor
f'c a la compresión (kg/cm^2)		210,00
Cemento utilizado		CPC 30R RS
Revenimiento de diseño (<i>cm</i>)		10,00
Revenimiento obtenido (<i>cm</i>)		10,50
Incorporación de aire		Sin aire
Densidad real (gr/cm^3)	Arena	2,67
	Cemento	2908,00
	Grava	2,69
Módulo de finura	Arena	2,92
	Grava	1039,64
Peso volumétrico (kg/m^3)	Arena	1554,18
	Grava	25,00
Tamaño nominal máximo (<i>mm</i>)	Arena	3,71
	Grava	2,80
Humedad (%)	Arena	20,45
	Grava	1,49

La resistencia esperada se definió en 210.00 kg/cm^2 , utilizando cemento tipo Portland CPC 30R RS, con un revenimiento o consistencia de diseño de 10.00 cm, obteniéndose experimentalmente un valor de 10.50 cm, lo cual indica una adecuada trabajabilidad de la mezcla.

Tabla 12: Proporciones de material por m^3 sin corrección por absorción y humedad.

Material	Cantidad (kg) para un m^3
Grava	1026
Agua	193
Cemento	284
Aire	20
Arena	823

La Tabla 12 presenta las cantidades de material por m^3 de concreto en condiciones teóricas, sin considerar las correcciones por humedad y absorción. Teniendo una relación agua con cemento de 0,68.

A continuación, se realizó la corrección por absorción y humedad correspondiente. En la mezcla base, se emplearon 284kg de cemento, 823kg de arena, 1026kg de grava y 193kg de agua, sumando un total de 2326kg. La corrección por humedad se aplicó a la arena y grava, ajustando las cantidades de estos materiales para reflejar el contenido de agua que contienen. Para el caso de la arena, la humedad es del 20,45%, lo que corresponde a 168,30 kg de agua, mientras que la absorción de la arena es de un 3,71%, lo que añade 30,53 kg adicionales, resultando en un total de 960,77 kg de arena. Por otro lado, la grava tiene una humedad del 1,49%, lo que implica 15,28 kg de agua, y su absorción es de un 2,80%, añadiendo 28,72 kg, dando un total de 1012,55 kg de grava. Finalmente, el agua se ajusta a 183,59 kg por la corrección de humedad, resultando en una cantidad real de 68,67 kg de agua. Después de aplicar estas correcciones, el total de los materiales fue 2326 kg.

Para calcular la cantidad de concreto necesario para 36 cilindros con un volumen total de 0.05654844 m^3 , se requiere una cantidad específica de concreto. Considerando que 1 m^3 de concreto pesa 2326 kg, por lo que el concreto necesario para llenar los 36 cilindros se calcula multiplicando el peso por el volumen de los cilindros. Dando aproximadamente 131.12 kg de concreto.

La cantidad de material por cilindro se muestran en la Tabla 13, asegurando la homogeneidad y representatividad en el proceso de moldeo.

Tabla 13: Cantidad del material para cada cilindro de concreto.

Material	Peso total del material (kg)	Total de cilindros	Peso del material por cilindro (kg)
Cemento	16,059	36	0,446
Arena	54,330	36	1,509
Grava	57,258	36	1,590
Agua	3,883	36	0,107

Finalmente, en la Tabla 14 se muestra la dosificación del algodón como fibra de refuerzo, la cual se incorporó en diferentes proporciones: 0%, 0.5%, 1.0% y 5.0% en peso respecto al concreto por cilindro. Cada porcentaje se aplicó a 9 especímenes. El peso total de algodón utilizado fue de aproximadamente 2.14

kg, siendo el mayor aporte en los especímenes con 5% de refuerzo.

Tabla 14: Cantidad del algodón para cada una de las probetas de concreto.

% de algodón por probeta			
% algodón	Probetas	Peso algodón por cilindro (kg)	Cantidad total de algodón por % (kg)
0.0	9	0	0
0.5	9	0,0182	0,1644
1.0	9	0,0365	0,3288
5.0	9	0,1826	1,6441
Suma			2,1373

3.8 Resistencia a la compresión axial simple

Se midió la resistencia del concreto a 7, 14 y 28 días de fraguado, utilizando muestras con forma cilíndrica de acuerdo con las normas ASTM aplicables. Para cada grupo se realizaron pruebas en tres cilindros con el fin de obtener un promedio distintivo, considerando cuatro proporciones de fibra de algodón: 0%, 0.5%, 1.0% y 5.0%.

Los valores obtenidos se encuentran en las Tablas 15, 16 y 17 de cada edad de curado. A los 7 días (Tabla 15), el concreto sin fibras alcanzó resistencias entre 123.8 y 134.4 kg/cm^2 , mientras que con 0.5% de algodón se registraron valores ligeramente menores (118 a 119 kg/cm^2).

Tabla 15: Resistencia f'_c de probetas cilíndricas de concreto con 7 días.

f'_c de probetas cilíndricas de concreto a 7 días de fraguado		
Algodón (%)	Área sección transversal (cm^2)	Resistencia a compresión axial simple (kg/cm^2)
0,0	80,595	126,030
	78,383	123,863
	79,960	134,428
	79,327	118,031
0,5	78,697	119,857
	78,854	118,946
	77,288	60,546
	79,012	58,077
1,0	79,012	60,155
	79,643	34,519
	77,444	34,327
5,0	79,485	34,651

En cambio, las mezclas con 1% y 5% de algodón mostraron reducciones significativas, con valores que van desde los 34.3 kg/cm^2 a 60.5 kg/cm^2 , respectivamente.

A 14 días (Tabla 16), el concreto de referencia sin fibras alcanzó valores entre 182.7 y 186.9 kg/cm^2 , en tanto que la mezcla con 0.5% de fibras demostró un rendimiento comparable a (171.9 a 178.3 kg/cm^2). Sin embargo, los especímenes con 1% y 5% de algodón alcanzaron un promedio de 98.7 kg/cm^2 y 60.0 kg/cm^2 , evidenciando una reducción superior a 45% en comparación con el concreto patrón.

Tabla 16: Resistencia f'_c de probetas cilíndricas de concreto con 14 días.

f'_c de probetas cilíndricas de concreto a 14 días de fraguado		
Algodón (%)	Área sección transversal (cm^2)	Resistencia a compresión axial simple (kg/cm^2)
0,0	77,288	182,760
	79,801	186,958
	77,444	183,853
	78,697	175,342
0,5	79,169	171,951
	79,485	178,298
	78,069	99,125
	77,132	99,153
1,0	79,801	97,894
	78,697	60,849
	79,012	59,458
5,0	80,118	59,833

Por último, a 28 días (Tabla 17), la mezcla de concreto patrón presentó su mayor resistencia de 208.2 a 218.1 kg/cm^2 , en concordancia con la resistencia a compresión axial simple esperada de diseño (210 kg/cm^2). La adición de 0.5 % de algodón no afectó el desempeño, alcanzando valores incluso ligeramente superiores (212.7 a 221.4 kg/cm^2). Por el contrario, con 1% de fibras se observó una resistencia media de 127.4 kg/cm^2 , y con 5% de fibras un valor aún menor (84.3 kg/cm^2), lo cual confirma el impacto negativo del exceso de refuerzo con fibras de algodón sobre la matriz cementante.

Tabla 17: Resistencia f'_c de probetas cilíndricas de concreto con 28 días.

f'c de probetas cilíndricas de concreto a 28 días de fraguado		
Algodón (%)	Área sección transversal (cm ²)	Resistencia a compresión axial simple (kg/cm ²)
0,0	81,713	211,549
	79,012	208,186
	80,277	218,102
0,5	78,069	212,671
	77,600	221,421
	79,169	213,271
1,0	81,073	120,608
	79,960	133,905
	77,132	127,722
5,0	78,383	87,112
	79,643	78,192
	77,913	87,703

Los resultados indican que la adición controlada de fibras de algodón tiene el potencial de mejorar o mantener las propiedades mecánicas del concreto sin comprometer la resistencia. En particular, la dosificación de 0.5% de fibras mostró un comportamiento parecido al concreto de referencia en todas las edades, con ligeras mejoras a los 28 días, lo que sugiere que dicha proporción permite una adecuada integración de las fibras dentro de la matriz de cemento, actuando como un refuerzo secundario que contribuye al control de microfisuras.

Por el contrario, con contenidos de 1% y 5% de algodón, la resistencia se redujo drásticamente, indicando que el exceso de fibras genera discontinuidades en la matriz, aumentando la relación agua/cemento efectiva y dificultando la compactación, lo que conduce a una pérdida de homogeneidad en el material.

Una dosificación moderada de 0.5% es viable, mientras que mayores proporciones comprometen seriamente el desempeño mecánico.

Después de 28 días de fraguado, la resistencia de las probetas de concreto con 0.5% de fibras de algodón reciclado mostraron un incremento del 1.48% en comparación con los cilindros que no tienen fibras. No obstante, las probetas con 1.0% de fibras experimentaron una disminución del 40.09%, y

aquellos con 5.0% de fibras presentaron una reducción del 60.33%.

La Fig. 4 muestra el progreso de la resistencia a compresión de las probetas con diferentes cantidades de fibras de algodón.

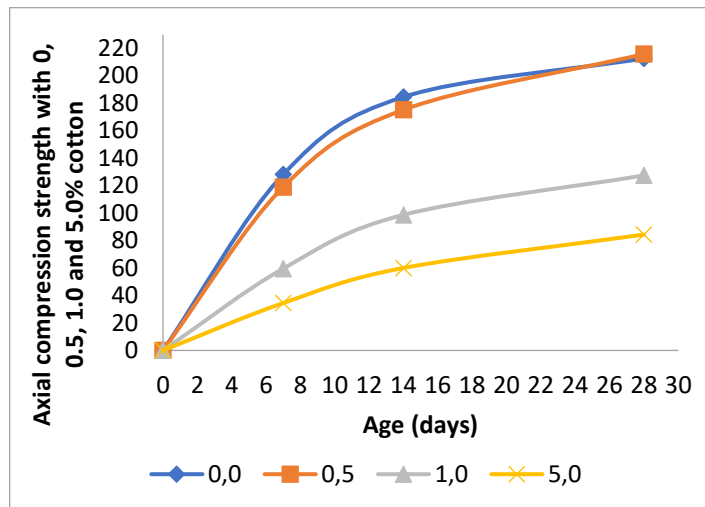


Figura 4: Compresión axial simple de muestras cilíndricas de concreto con 0.0%, 0.5%, 1.0% y 5.0% de adición de fibras de algodón.

La reducción de la resistencia a medida que incrementa el porcentaje de fibras de algodón reciclado a los 7, 14 y 28 días de fraguado, para los porcentajes de 1.0% y 5.0%, posiblemente sea debido al incremento en la cantidad de fibras y a la reducción de la trabajabilidad al añadir un agregado adicional a la mezcla. No obstante, se puede notar que el porcentaje que se reduce se estrecha conforme avanza el tiempo de curado, lo que podría explicarse por el hecho de que las fibras de algodón actúan como depósito del agua, favoreciendo el curado interno del concreto. Por otro lado, para el 0.5%, se nota un incremento en la resistencia a los 28 días de fraguado, lo cual posiblemente se debe tanto al mejor fraguado interno del concreto como a su mayor trabajabilidad, dado que presenta un menor porcentaje de adición de fibras de algodón reciclado.

Lo que sugiere que la incorporación de 0.5% de fibras de algodón no afecta negativamente la trabajabilidad del concreto. Es relevante destacar que la porción de fibras añadidas al concreto desempeña un papel crucial en el incremento o disminución de la resistencia. Por lo que este porcentaje de fibras podría representar una opción eficaz para optimizar las propiedades mecánicas del concreto. Asimismo, al tratarse de fibras de algodón reciclado, su uso ayuda a la reducción de residuos y a la disminución del impacto

ambiental.

3.9 Tipos de fallas en las probetas cilíndricas de concreto

Para los especímenes sin fibras (0%), la falla observada fue del tipo común en concretos sin refuerzo, con formación en “X”, resultado de una carga de compresión adecuadamente colocada sobre muestras debidamente elaboradas, como se observa en la Fig. 5.



Figura 5: Fallas por compresión - cilindros de concreto con fibras y cilindros sin fibras de algodón.

En las probetas cilíndricas con fibras de algodón se observó una disminución promedio del 6.75% en la altura respecto a la altura inicial (20 cm). Esto podría sugerir que aumentar las fibras de algodón reciclado al concreto contribuye a mejorar la distribución de los esfuerzos y redistribuir las tensiones del material. Además, las fibras previenen la transmisión de grietas, lo que, junto con un porcentaje adecuado de fibras que no afecte la trabajabilidad, incrementa la durabilidad y la resistencia del concreto.

Este estudio presenta fortalezas destacables, como el uso de metodologías normalizadas (ASTM y ACI), lo que aporta confiabilidad a los resultados, así como la propuesta de incorporar fibras de algodón desechado al concreto. El diseño experimental permitió observar el efecto de diferentes porcentajes de fibras y analizar propiedades tanto del concreto fresco como endurecido.

Además, los resultados experimentales se analizaron y discutieron en conjunto con las normas ASTM correspondientes, lo que permitió comparar el comportamiento de los agregados pétreos y las mezclas de concreto con los valores esperados e idóneos establecidos en las normativas. Aunque se han desarrollado estudios previos sobre concretos con fibras naturales, la metodología propuesta en este trabajo difiere en el tratamiento, dosificación e incorporación de las fibras de algodón de desecho,

ofreciendo un enfoque alternativo y aplicable en el desarrollo de materiales sostenibles para la construcción.

No obstante, se identifican limitaciones: las pruebas se realizaron con condiciones controladas de laboratorio con un número limitado de especímenes, y altas proporciones de fibras (5%) que redujeron la trabajabilidad y resistencia. Además, solo se evaluó un tipo de fibra y hasta 28 días de curado, sin considerar comportamientos a largo plazo.

Entre las posibles fuentes de error se encuentran la distribución no uniforme de fibras, ligeras variaciones en curado y humedad de los agregados, así como pequeñas imprecisiones en las mediciones.

Aun con estas limitaciones, los métodos empleados son válidos y los resultados sugieren que bajas adiciones de fibras de algodón ayudan a redistribuir tensiones y controlar grietas, lo que abre posibilidades en aplicaciones sostenibles, principalmente en elementos no estructurales.

Finalmente, es recomendable que futuras investigaciones consideren porcentajes intermedios de fibras, evalúen el desempeño a edades mayores y en condiciones ambientales adversas, y además analicen otras propiedades mecánicas como la flexión o el módulo de elasticidad. También sería útil comparar las fibras de algodón con otros tipos de fibras sintéticas y naturales, para ampliar la aplicabilidad práctica de la metodología empleada en la creación de las mezclas modificadas de concreto de este manuscrito. Además, de probar tratamientos de superficie para mejorar su adherencia, realizar ensayos a escala real y un análisis de sensibilidad que permita evaluar la influencia relativa de los distintos factores, tales como el contenido de fibras, tipo de agregado, relación agua/cemento y tiempo de curado, sobre las propiedades mecánicas y físicas del concreto reforzado.

Estos esfuerzos podrían consolidar el uso de fibras de desecho en concretos con aplicaciones prácticas y ambientalmente responsables.

4. Conclusión

Este estudio permitió evaluar como la adición de fibras de algodón interactúa en las propiedades mecánicas y físicas del concreto.

Los resultados revelan que la adición de fibras de algodón en pequeñas cantidades, especialmente en proporciones del 0.5%, mejoran la resistencia a la

compresión al aumentar los puntos de sujeción de las partículas de cemento y agua, lo que permite una redistribución más eficiente de las tensiones. A los 28 días de curado, esta dosificación logró un aumento aproximado del 1.48% en comparación con el concreto convencional, lo que confirma su efectividad como refuerzo mecánico en aplicaciones específicas. Además, se observó que las fibras contribuyen a controlar la propagación de grietas, mejoran la absorción de cargas y reducen la deformación, lo que favorece el rendimiento general del material.

Desde una perspectiva ambiental, la reutilización de fibras de algodón de desecho representa un aporte significativo en términos de sostenibilidad, al reciclar un material que de otro modo sería desechado en vertederos o sometido a incineración. Dado que el algodón es un recurso orgánico, ligero y con alto contenido de celulosa, su aplicación en la construcción ofrece ventajas ecológicas y técnicas al mismo tiempo, lo que se alinea con la economía circular.

Sin embargo, el uso de fibras de algodón de reciclado también presenta limitaciones. Entre ellas destacan su naturaleza hidrófila, que puede aumentar la absorción de agua y modificar la trabajabilidad del concreto, así como la variabilidad en la limpieza y calidad de las fibras, que incide directamente en el desempeño mecánico. Asimismo, se identificó que dosis elevadas ($\geq 1\%$) disminuyen la resistencia y generan problemas de homogeneidad en la mezcla. Estos aspectos deben ser cuidadosamente controlados mediante una adecuada dosificación y un correcto proceso de mezclado y curado.

Finalmente, aunque los resultados obtenidos son alentadores, se requiere continuar investigando para optimizar la proporción, tamaño y distribución de las fibras, evaluar su efecto sobre otras propiedades mecánicas (flexión, tracción, torsión) y analizar la durabilidad del concreto en circunstancias reales de uso. El estudio abre la puerta a futuras líneas de investigación orientadas a mejorar la tecnología de incorporación de fibras, así como a validar su aplicabilidad en distintos tipos de estructuras, contribuyendo al desarrollo de concretos más seguros, duraderos y sostenibles.

5. Referencias bibliográficas

[1] Seto, K.C.; Golden, J.S.; Alberti, M.; Turner, B.L. Sustainability in an urbanizing planet, *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* **2017**, *114*, 8935-8938. <https://doi.org/10.1073/pnas.1606037114>

[2] Wei, L.; Ming, Y. Urbanization, economic growth and environmental pollution: Evidence from China, *Sustainable Computing: Informatics and Systems*. **2019**, *21*, 1-9. <https://doi.org/10.1016/j.suscom.2018.11.007>.

[3] Ambrus, M.; Mucsi, G. Open-loop recycling of end-of-life textiles as geopolymer fibre reinforcement. *Waste Management & Research*. **2024**, *42*, 823-831. <https://doi.org/10.1177/0734242X241242708>

[4] Karimi, N. Assessing Global Waste Management: Alternatives to Landfilling in Different Waste Streams—A Scoping Review. *Sustainability*. **2023**, *15*, 13290. <https://doi.org/10.3390/su151813290>

[5] Juanga-Labayen, J.P.; Labayen, I.V.; Yuan, Q. A Review on Textile Recycling Practices and Challenges. *Textiles*. **2022**, *2*, 174-188. <https://doi.org/10.3390/textiles2010010>

[6] Shadia, M.; Lijing, W. Fugen Daver, Enda Crossin, Environmental impact of discarded apparel landfilling and recycling. *Resources, Conservation and Recycling*. **2021**, *166*, 105338. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.105338>

[7] Haniyeh, H.; Amir, M.S.; Mojtaba, M.; Gholamreza, A. The effects of steel, polypropylene, and high-performance macro polypropylene fibers on mechanical properties and durability of high-strength concrete. *Construction and Building Materials*. **2023**, *386*, 131589, 0950-0618. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.131589>

[8] Mohammad, A.M.; Ashish, K. Utilization of Electronic Waste and Textile Fibers as Reinforcements in Concrete Pavement. *International Journal of Innovative Research in Engineering and Management*. **2024**. <https://doi.org/10.55524/IJIREM.2024.11.5.7>

[9] Hansong, W.; Aiqin, S.; Qianqian, C.; Yanxia, C.; Guiping, R.; Hongmei, P.; Shiyi, D. A review of recent developments in application of plant fibers as reinforcements in concrete. *Journal of Cleaner Production*. **2023**, *419*, 138265. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.138265>

[10] Yanzhi, W.; Pizhong, Q.; Jing, S.; An, C. Influence of fibers on tensile behavior of ultra-high performance concrete: a review. *Construction and Building Materials*. **2024**, *430*, 136432. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.136432>

[11] Shadheer, A.M.; Ravichandran, P.; Krishnaraja, A.R. Natural Fibers in Concrete – A Review. *Materials Science and Engineering*. **2021**. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1055/1/012038>

[12] Jawad, A.; Zhiguang, Z. Mechanical Properties of Natural as well as Synthetic Fiber Reinforced Concrete: A Review. *Construction and Building Materials*. **2022**, *333*, 127353. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127353>

- [13] Haigh, R.; Sandanayake, M.; Yaghoubi, E.; Joseph, P.; Vrcelj, Z. The mechanical and microstructural investigations of concrete incorporating waste textile and cardboard fibers following thermal and freeze–thaw cycles. *Structural Concrete*. **2025**, 26, 2757–2772. <https://doi.org/10.1002/suco.202401334>
- [14] Roberto, M.; Michele, P.; Alessia, Acampora.; Maria, C.; Elisabetta, P. Recycled fibers in reinforced concrete: A systematic literature review. *Journal of Cleaner Production*. **2020**, 248, 119207. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119207>
- [15] Thamer, A.; Babar, A. Effect of plant fiber type and content on the strength and durability performance of high-strength concrete. *Construction and Building Materials*. **2023**, 394, 132166. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.132166>
- [16] More, F.M.D.S.; Subramanian, S.S. Impact of Fibres on the Mechanical and Durable Behaviour of Fibre-Reinforced Concrete. *Buildings*. **2022**, 12, 1436. <https://doi.org/10.3390/buildings12091436>
- [17] Jamal, A.A.; Rami A.H.; Bahurudeen, A.; Jyothsna, G.; Sofi, A.; Vigneshwaran, S.; Thomas, B.S. A comprehensive review on the use of natural fibers in cement/geopolymer concrete: A step towards sustainability. *Case Studies in Construction Materials*. **2023**, 19, e02244. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2023.e02244>
- [18] Bartulović, B.; Juradin, S.; Žižić, D.; Galić, M. Influence of Cotton Knitted Fabric Waste Addition on Concrete Properties. *Buildings*. **2022**, 12, 1121. <https://doi.org/10.3390/buildings12081121>
- [19] Juradin, S.; Mihanović, F.; Ostojić-Škomrlj, N.; Rogošić, E. Pervious Concrete Reinforced with Waste Cloth Strips. *Sustainability*. **2022**, 14, 2723. <https://doi.org/10.3390/su14052723>
- [20] Haigh, R.; Sandanayake, M.; Yaghoubi, E.; Joseph, P.; Vrcelj, Z. The mechanical and microstructural investigations of concrete incorporating waste textile and cardboard fibers following thermal and freeze–thaw cycles. *Structural Concrete*. **2025**, 26, 2757–2772. <https://doi.org/10.1002/suco.202401334>
- [21] Nayanatara, G.; Yulin, Patrisia.; Chamila, G.; David, W.L.; Shadi, H.; Sujeeva, S. Shrinkage induced crack control of concrete integrating synthetic textile and natural cellulosic fibres: Comparative review analysis. *Construction and Building Materials*. **2024**, 427, 136275. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.136275>
- [22] ASTM. Standard Practice for Sampling Aggregates. *ASTM D75/D75M-19*. **2019**. https://doi.org/10.1520/D0075_D0075M-19
- [23] ASTM. Standard Test Method for Particle-Size Analysis of Soils. *ASTM D422 63*. **2007**. <https://doi.org/10.1520/D0422-63R07>
- [24] ASTM. Standard Test Methods for Particle-Size Distribution (Gradation) of Soils Using Sieve Analysis. *ASTM D6913-04(2009)e1*. **2017**. <https://doi.org/10.1520/D6913-04R09E01>
- [25] ASTM. Standard Test Method for Materials Finer than 75-µm (No. 200) Sieve in Mineral Aggregates by Washing. *ASTM C117-23*. **2023**. <https://doi.org/10.1520/C0117-23>
- [26] ASTM. Standard Test Method for Bulk Specific Gravity and Density of Non-Absorptive Compacted Asphalt Mixtures. *ASTM D2726/D2726M-21*. **2021**. https://doi.org/10.1520/D2726_D2726M-21
- [27] ASTM. Standard Test Method for Resistance to Degradation of Small-Size Coarse Aggregate by Abrasion and Impact in the Los Angeles Machine. *ASTM C131/C131M-20*. **2020**. https://doi.org/10.1520/C0131_C0131M-20
- [28] ASTM. Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Fine Aggregate. *ASTM C128-15*. **2023**. <https://doi.org/10.1520/C0128-15>
- [29] ASTM. Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Coarse Aggregate (Withdrawn 2024). *ASTM C127-15*. **2024**. <https://doi.org/10.1520/C0127-15>
- [30] ASTM. Standard Test Method for Total Evaporable Moisture Content of Aggregate by Drying. *ASTM C566-19*. **2019**. <https://doi.org/10.1520/C0566-19>
- [31] American Concrete Institute. Selecting Proportions for Normal-Density and High Density-Concrete – Guide. *ACI PRC-211.1-22*. **2022**, 38, 9781641951869. https://www.concrete.org/store/productdetail.aspx?ItemID=211122&Language=English&Units=US_Units
- [32] ASTM. Standard Specification for Ready-Mixed Concrete. *ASTM C94/C94M-22a*. **2023**. https://doi.org/10.1520/C0094_C0094M-22A
- [33] ASTM. Standard Practice for Sampling Freshly Mixed Concrete. *ASTM C172-08*. **2017**. <https://doi.org/10.1520/C0172-08>
- [34] ASTM. Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens. *ASTM C39/C39M-21*. **2023**. https://doi.org/10.1520/C0039_C0039M-21
- [35] ASTM. Standard Test Method for Slump of Hydraulic-Cement Concrete. *ASTM C143/C143M-20*. **2020**. https://doi.org/10.1520/C0143_C0143M-20
- [36] ASTM. Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens. *ASTM C39/C39M-21*. **2023**. https://doi.org/10.1520/C0039_C0039M-21

Mercado y Productos Identitarios del Bajío: Narrativa Patrimonial desde San Miguel de Allende

Market and Identity Products of the Bajío: A Heritage Narrative from San Miguel de Allende

Murillo Cuevas, Damarix Sarai*, Escobedo Navarrete, David**, Flores Gutiérrez Avatar*

*Facultad de Ingeniería**

Universidad Autónoma de Querétaro

Querétaro de Arteaga, México

dmurillo21@alumnos.uaq.mx; <https://orcid.org/0009-0003-9636-8239>

avatar.flores@uaq.mx; <https://orcid.org/0000-0001-9581-3853>

*Departamento de Arquitectura***

Universidad de Guanajuato

Guanajuato, México

davidnavarrete@ugto.mx; <https://orcid.org/0000-0002-7170-2507>

Resumen: Este artículo analiza las transformaciones sociales, espaciales y simbólicas del Mercado Ignacio Ramírez “El Nigromante” en San Miguel de Allende, ciudad inscrita en la Lista de Patrimonio Mundial de la UNESCO desde 2008. A partir de un enfoque cualitativo y crítico, sustentado en los aportes de Paulo Freire [1] y Pierre Bourdieu [2], se examinan las tensiones entre los procesos de patrimonialización, turistificación y resistencia popular que reconfiguran las dinámicas contemporáneas de los mercados públicos en el Bajío mexicano. El estudio parte del supuesto de que el conocimiento popular -expresado en la transformación de productos alimenticios, las prácticas comerciales y las relaciones cotidianas- constituye un capital cultural vivo, históricamente transmitido y en disputa dentro del espacio urbano. Mediante observación directa, entrevistas semiestructuradas y senderos del dialogo con locatarios y clientes de larga data, se documentaron los cambios en la oferta de productos, las estrategias de adaptación al turismo y las alteraciones en el tejido social del mercado. Los resultados evidencian la pérdida de productos identitarios, la estilización de los alimentos tradicionales y la reconfiguración del mercado como escenario turístico, al tiempo que persisten prácticas de resistencia que mantiene su función como espacio comunitario y de abasto local. En conclusión, el mercado patrimonial se revela como un territorio de disputa simbólica, donde el conocimiento popular encarna una praxis emancipadora que desafía la lógica mercantil de la conservación y propone nuevas lecturas del patrimonio como memoria viva y justicia espacial.

Palabras clave: ARQ; Productos identitarios; Ciudades patrimonio mexicanas; Turistificación, Patrimonialización,

Abstract: This article analyzes the social, spatial, and symbolic transformations of the Ignacio Ramírez “El Nigromante” Market in San Miguel de Allende, a city inscribed on the UNESCO World Heritage List since 2008. Using a qualitative and critical approach grounded in the works of Paulo Freire [1] and Pierre Bourdieu [2], it examines the tensions among patrimonialization, touristification, and popular resistance that reshape the contemporary dynamics of public markets in Mexico’s Bajío region. The study assumes that popular knowledge—expressed through the transformation of food products, commercial practices, and everyday relationships—constitutes a living cultural capital, historically transmitted and contested within urban space. Through direct observation, semi-structured interviews, and dialogical pathways with long-standing vendors and customers, the research documented changes in product offerings, strategies of adaptation to tourism, and alterations in the market’s social fabric. The findings reveal the loss of identity products, the stylization of traditional foods, and the reconfiguration of the market as a tourist stage, while practices of resistance persist, maintaining its role as a community and local supply space. In conclusion, the heritage market emerges as a territory of symbolic and epistemic struggle, where popular knowledge embodies an emancipatory praxis that challenges the mercantile logic of conservation and proposes new readings of heritage as living memory and spatial justice.

Keywords: ARQ; Identity products; Mexican heritage cities; Touristification; Patrimonialization;

1. Introducción

Los mercados tradicionales en México han sido espacios fundamentales de intercambio económico, social y cultural a lo largo de la historia. En el Bajío, ciudades como San Miguel de Allende, en el estado de Guanajuato, inscrita en la Lista de Patrimonio Mundial de la UNESCO bajo el título de “Villa Protectora de San Miguel el Grande y Santuario de Jesús Nazareno de Atotonilco” desde el año 2008, ha experimentado procesos de transformación impulsados por el turismo. Estos cambios han modificado la dinámica comercial y la permanencia de productos identitarios.

El presente trabajo analizó este fenómeno desde una perspectiva histórico-crítica, con el objetivo de examinar la relación entre patrimonialización, turismo y vulnerabilidad del abasto popular. Se plantea como aporte central la identificación de la transformación, sustitución y en algunos casos el desplazamiento de productos alimenticios y enseres utilitarios como indicador de fragilidad cultural y alimentaria, en el mercado Ignacio Ramírez “El Nigromante” cuya oferta, cada vez está más orientada al consumo turístico.

El patrimonio urbano constituye hoy uno de los ejes más visibles de las políticas de planeación, conservación y turismo cultural. Desde la Convención sobre la Protección del Patrimonio Mundial, Cultural y Natural de 1972, la UNESCO estableció el principio de *valor universal excepcional* con fundamento para identificar y preservar bienes culturales considerados de relevancia para toda la humanidad [3]. No obstante, en contextos latinoamericanos, este paradigma ha sido objeto de crítica por reproducir criterios eurocéntricos y estéticos, que privilegian la monumentalidad arquitectónica sobre las prácticas sociales que sostienen la vida cotidiana.

Diversos estudios [4], [5] han mostrado que las declaratorias patrimoniales en México han impulsado procesos de turistificación y gentrificación, especialmente en las ciudades históricas del Bajío. Estas dinámicas han transformado los usos sociales del espacio, han desplazado a los actores populares y han reconfigurado los significados del patrimonio. En este contexto, el mercado Ignacio Ramírez “El Nigromante” en San Miguel de Allende se presenta como un caso paradigmático para analizar las tensiones entre conservación material y pérdida de sentido social del espacio urbano.

El presente estudio se justifica por su intención de revelar las formas de conocimiento popular que persisten y se transforman en los mercados públicos patrimoniales, donde convergen los efectos de la modernización turística y las resistencias comunitarias. Desde los aportes de Paulo Freire [1] y Pierre Bourdieu [2], se examina como la política patrimonial convencional tiende a domesticar el saber popular, convirtiéndolo en recurso simbólico y económico, pero también como los actores locales reapropian y resignifican el espacio a través de sus prácticas cotidianas.

El objetivo general es analizar los efectos de la patrimonialización y la turistificación sobre los saberes populares y las dinámicas espaciales del Mercado Ignacio Ramírez “El Nigromante”, en el marco de la marca UNESCO de la ciudad de San Miguel de Allende. De manera específica, se busca (1) identificar transformaciones en los productos alimenticios y enseres identitarios, y (2) discutir las implicaciones sociales y urbanas derivadas de estos procesos.

El artículo se estructura en siete apartados: introducción histórica a los mercados en México, la revisión del contexto patrimonial de las ciudades inscritas en la Lista de Patrimonio Mundial de la UNESCO, el caso de estudio en San Miguel de Allende, la metodología cualitativa aplicada, los resultados obtenidos del trabajo de campo, la discusión crítica que integra los aportes teóricos de Freire y Bourdieu para repensar el papel del conocimiento popular en las políticas de patrimonio urbano y finalmente, las conclusiones con los principales hallazgos del trabajo, destacando su aporte al conocimiento existente y su relevancia.

1.1. Una mirada histórica a los mercados en México

Desde tiempos prehispánicos, los mercados en México han sido espacios clave para el intercambio de bienes, no solo alimenticios sino socioculturales; organizados y regidos por normas propias. Cronistas como Sahagún [6] y Matos Moctezuma [7] destacan el papel central del Gran Mercado de Tlatelolco en la economía mesoamericana a la llegada de los españoles. Durante el virreinato, estos espacios se consolidaron como nodos comerciales y sociopolíticos marcados por relaciones jerárquicas entre comerciantes peninsulares e indígenas.

La guerra de independencia y el Porfiriato trajeron rupturas y modernizaciones. Tras la interrupción del comercio internacional [8] y una paulatina recuperación comercial [9], el Porfiriato impulsó nuevas arquitecturas de mercado bajo influencias higienistas [10].

Posteriormente, la Revolución transformó el abasto como parte de un proyecto igualitario [11], destacando iniciativas como el mercado Abelardo Rodríguez, concebido como un lugar para el desarrollo comunitario y cultural de la Ciudad de México [12].

Durante el siglo XX, afamados arquitectos como Pedro Ramírez Vázquez, Rafael Mijares Alcérreca, Félix Candela, Fernando Pereznieta, entre otros; diseñaron nuevos mercados para mejorar la distribución de alimentos, mayoritariamente en grandes zonas urbanas como la Ciudad de México [13]. No obstante, las crisis económicas de los años setenta y ochenta [14], junto con las reformas neoliberales [15] redujeron la inversión y precipitaron el deterioro de muchos mercados públicos, procurando atenciones paliativas con remodelaciones superficiales y, por otro lado, el impulso de nuevos formatos comerciales usualmente excluyentes [16].

Recientemente, la pandemia por COVID-19 presentó un nuevo golpe: los mercados fueron estigmatizados como focos de contagio, y “zonas de alto riesgo de contagio” lo que profundizó la ya de por sí, crisis alimentaria [17]. Sin embargo, en el último sexenio del Gobierno de México, la Secretaría de Desarrollo Agrario, Territorial y Urbano (SEDATU) impulsó políticas para la rehabilitación y construcción de nuevos mercados con enfoque social, equidad y fortalecimiento comunitario, particularmente en regiones del país históricamente abandonadas [13], que devuelve la importancia primigenia de estos equipamientos urbanos.

Caso particular son los mercados localizados en ciudades mexicanas inscritas en la Lista de Patrimonio Mundial de la UNESCO, cuyas dinámicas se ven afectadas por las políticas de turistificación y cómo éstas permean en diferentes niveles.

1.2. Las Ciudades Patrimonio Mexicanas

La Convención sobre la Protección del Patrimonio Mundial, Cultural y Natural de 1972, adoptado por la Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (UNESCO) es un tratado internacional cuyo objetivo es identificar, proteger y conservar aquellos bienes culturales y naturales de valor universal excepcional, considerados patrimonio común de la humanidad [3]; sin embargo, sus procesos no están exentos de tensiones políticas y desigualdades.

En México, existen 14 ciudades inscritas en la Lista de Patrimonio Mundial, como se muestra en el Cuadro 1; la mayoría de ellas, ciudades que privilegian narrativas

eurocéntricas, que minimizan las memorias locales y los procesos de resistencia que han tenido a lo largo de la historia cada una de ellas.

Cuadro 1. Relación de Ciudades Mexicanas inscritas en la Lista de Patrimonio Mundial de la UNESCO

Estado	Ciudad	Inscripción	Año
Ciudad de México	Ciudad de México Xochimilco	Centro histórico de México y Xochimilco	1987
Oaxaca	Oaxaca	Centro histórico de Oaxaca y zona arqueológica de Monte Albán	1987
Puebla	Puebla	Centro histórico de Puebla	1987
	Guanajuato	Ciudad histórica de Guanajuato y minas adyacentes	1988
Guanajuato	San Miguel de Allende	Villa Protectora de San Miguel el Grande y Santuario de Jesús Nazareno de Atotonilco	2008
Michoacán	Morelia	Centro histórico de Morelia	1991
Zacatecas	Zacatecas	Centro histórico de Zacatecas	1993
Querétaro	Querétaro	Zona de monumentos históricos de Querétaro	1996
Veracruz	Tlacotalpan	Zona de monumentos históricos de Tlacotalpan	1998
Campeche	Campeche	Ciudad histórica fortificada de Campeche	1999
San Luis Potosí	San Luis Potosí	Ciudades del Camino Real de Tierra Adentro:	
Querétaro	San Juan del Río	San Luis Potosí, San Juan del Río y	2010
Durango	Durango	Durango	

Ciudades como Morelia, Oaxaca, Puebla, Guanajuato o San Miguel de Allende, revelan procesos de gentrificación en sus polígonos urbanos definidos con la marca UNESCO. En Ciudad de México, la declaratoria ha invisibilizado a los barrios originarios desplazados, mientras que Xochimilco enfrenta la pérdida ecológica y de prácticas agrícolas identitarias [18].

Ciudades mineras como Zacatecas y Guanajuato rara vez enfatizan las condiciones de explotación extrema colonial de la que fueron objeto. Tlacotalpan y Campeche viven deterioro infraestructural y exclusión indígena. Mientras que, San Luis Potosí, San Juan del Río y Durango

enfrentan desigualdades socioeconómicas derivada de la migración forzada y la precarización laboral [19].

El discurso patrimonial, lejos de ser neutro, ha contribuido a la valorización simbólica y económica del espacio urbano, sin necesariamente reconocer a las memorias subalternas. Como señalan autores como Delgadillo, Díaz y Salinas [4], el *branding*¹ patrimonial implica beneficios turísticos, pero también procesos de exclusión y cambios de usos de suelo; dinámicas que también permean en los mercados públicos de abasto popular.

Mónica Lecarrieu [5] describe dos formas de patrimonialización: (1) la patrimonialización del *contenedor*, es decir; si el mercado de abasto posee características histórico-arquitectónicas relevantes, (2) la patrimonialización del *contenido*, cuando probablemente el contenedor no presenta particularidades destacadas, pero sí, relevancia para la exotización de los productos que ahí se ofertan.

Ambas formas pueden conducir a la mercantilización y al desplazamiento de los actores locales, particularmente de aquellos de larga data [20].

1.3. El Bajío: los mercados de San Miguel de Allende

Se denomina Bajío a la región del centro-norte de México, con características geográficas, históricas, económicas y culturales particulares que abarca partes de los estados de Guanajuato, Querétaro, Michoacán y Jalisco [21]. Esta región, ha sido históricamente una zona agrícola, de intercambio cultural y de conexión entre Mesoamérica y Aridoamérica [22].

Se consideran cinco ciudades patrimonio con la marca UNESCO, las que forman parte de la zona del Bajío: Guanajuato, San Miguel de Allende, Morelia, Querétaro y San Juan del Río, Figura 1.



Figura 1. Distribución geográfica de las Ciudades Mexicanas Patrimonio Mundial en la zona del Bajío.

Fuente: Mapa Digital de México 2025 con información de la Lista de Patrimonio Mundial de la UNESCO y la Asociación Nacional de Ciudades Mexicanas de Patrimonio Mundial AC.

Utilizando como caso de estudio la ciudad de San Miguel de Allende, encontramos tres mercados de abasto popular, dos mercados de artesanías y una plaza con comercios semifijos; todos ellos ubicados dentro de los límites del área de amortiguamiento de la zona de inscripción de la UNESCO.

Los mercados San Juan de Dios, Plaza San Miguel e Ignacio Ramírez “El Nigromante” aun funcionan como mercados de abasto popular. Los dos primeros de ellos, más ligados al abasto regional, derivado de su estrecha relación con la parada de autobuses de transporte hacia distintas comunidades. El tercero, ligado al abasto local y turístico, derivado de su localización estratégica colindante a la zona núcleo de la inscripción de la ciudad y al corredor Lucas Balderas, con comercios especializados en el turismo.



Figura 1. Localización de los distintos mercados en color naranja y su relación con la poligonal núcleo y de amortiguamiento en San Miguel de Allende. Fuente: Elaboración propia con información del marco geoestadístico 2023 y el sistema para la consulta de la información censal.

2. Metodología

Se planteó una investigación cualitativa, con enfoque crítico. Se realizó un estudio documental sobre los antecedentes históricos de los mercados en México, las ciudades patrimonio mexicanas inscritas en la Lista de Patrimonio Mundial de la UNESCO y se realizó un análisis teórico crítico de los impactos socioespaciales en estas ciudades a partir de sus nombramientos

¹ Marca

patrimoniales, con particular enfoque en la ciudad de San Miguel de Allende, Guanajuato, México.

Se identificó y se eligió el mercado muestra Ignacio Ramírez “El Nigromante”, por ser ejemplo de transformación y resiliencia en la región del Bajío, por estar dentro de la poligonal urbana de una ciudad patrimonio, en este caso, San Miguel de Allende y por presentar características dinámicas contrastantes de adaptación al turismo.

Se determinó identificar actores clave para recuperar la memoria de las transformaciones del mercado a través de personas adultas mayores quienes incluso hubiesen conocido el antiguo mercado, a través de entrevistas semiestructuradas y senderos del dialogo para identificar las transformaciones en el abasto popular y sus impactos.

La observación directa se realizó en recorridos de campo y registros etnográficos en el mercado seleccionado; la comparación permitió identificar diferencias y similitudes en la oferta de productos identitarios acorde a las entrevistas semiestructuradas.

El análisis se basó en criterios de presencia o ausencia de productos y enseres identitarios previamente identificados y su estrategia de comercialización frente a la presión turística y la población visitante con mayor poder adquisitivo. La triangulación de métodos garantizó la solidez interpretativa del estudio.

2.1 Caso de estudio

El mercado original se localizaba en la Plaza de la Soledad, -actualmente conocida como la Plaza Cívica en San Miguel de Allende-, colindante con la calle de Mesones, llamada así por la cantidad de posadas para viajeros que ahí se encontraban y fue construido como solución al comercio ambulante.

Esté mercado fue inaugurado en 1889 durante el periodo porfirista como parte de una estrategia de modernización urbana. Sin embargo, en 1963 sufrió un incendio, y tras su demolición fue reubicado en su localización actual a media cuadra de dicha plaza. El nuevo mercado Ignacio Ramírez “El Nigromante” fue inaugurado en 1970 [23].



Figura 3. Antiguo mercado en San Miguel de Allende. Autor: José Vidargas Herrera, año desconocido.

A pesar de que cada vez es menos frecuentado por personas de comunidades aledañas como se acostumbraba en antaño, derivado de los procesos de la modernidad y al auge de cadenas comerciales que se localizan a las afueras de la ciudad, así como el encarecimiento generalizado de la vida en San Miguel de Allende, se ha podido observar que esté sigue brindando servicios. El mercado sigue constituyendo un importante referente arquitectónico urbano, y ha sido objeto de numerosas intervenciones que han dado lugar a su actual estructura, con techumbres metálicas, zonificación por giros comerciales, remozamiento de fachadas y remodelación de sus instalaciones.

Su oferta combina en 97 locales registrados en el DENU 2025, distintos giros comerciales entre alimentos frescos, procesados, artículos de primera necesidad como ropa, zapatos y objetos de consumo turístico como las artesanías que, reflejan su función dual como mercado local y atractivo turístico. Los locatarios provienen de diversos orígenes: mujeres de comunidades rurales, familias de larga tradición comercial, y algunos concesionarios con relaciones institucionales. Las funciones simbólicas del mercado incluyen su papel como espacio de encuentro, escenario de festividades religiosas y referente patrimonial.



Figura 4. Sección de comidas al interior del actual mercado Ignacio Ramírez “El Nigromante”. Autor: Damarix Murillo.

3. Resultados

De acuerdo con la aplicación de la metodología antes expuesta, los resultados evidenciaron la transformación y en algunos casos la desaparición de productos tanto alimenticios como enseres identitarios en el mercado muestra.

De acuerdo con los entrevistados de larga data: cinco comerciantes (entre 45 y 75 años en el mercado) y cinco clientes (entre 45 y 75 años de frecuentar el mercado) se ha obtenido una lista de más de treinta productos alimenticios y más de cuarenta enseres cotidianos que han sufrido cambios en su comercialización a través del mercado muestra.

A través de los senderos del dialogo con algunos de los entrevistados, los participantes recordaron: qué se solía vender en los actuales locales comerciales e incluso quiénes eran los antiguos propietarios, entre otros detalles.

A continuación, se enlistan los productos alimenticios identificados por los entrevistados, clasificándolos en “estilizados” todos aquellos que aún se comercializan pero que ya no se sirven, ni se presentan o se emban como originalmente se hacía. Por otro lado, los “desaparecidos” aquellos productos que ya no se comercializan en el mercado, derivado en la mayoría de los casos, al desplazamiento o defunción de los antiguos comerciantes, como se muestra en el siguiente cuadro.

Cuadro 2. Relación de productos alimenticios transformados

No.	Nombre	Tipo de Transformación
1	Queso de tuna	Estilizado
2	Quiote	Desaparecido
3	Mancuernas de piloncillo	Desaparecido
4	Pulque en olla cruda	Desaparecido
5	Jocoque con frijoles	Desaparecido
6	Queso de cabra en hoja de tepozán o guanamosa	Desaparecido
7	Plato de borachitos o granjenos	Desaparecido
8	Atole de mezquite	Desaparecido
9	Aguamiel de trigo o garbanzo	Desaparecido
10	Sopitas de leche de aguamiel	Desaparecido

11	Gorditas de piedra de hormiga y hoja de guanamosa	Desaparecido
12	Gorditas de elote tierno	Estilizado
13	Caldo de pichón	Desaparecido
14	Polvos de zarcón para el empacho	Desaparecido
15	Manteca	Desaparecido
16	Naranja con chile	Estilizado
17	Rebanada de piña	Estilizado
18	Preparado de vitualla (garbanzo con repollo)	Desaparecido
9	Tabaco	Desaparecido
20	Chocol	Desaparecido
21	Pan de agua	Estilizado
22	Callitos de piloncillo	Desaparecido
23	Acocote	Desaparecido
24	La rellena	Desaparecido
25	Tunas en plato de barro con espina de maguey	Desaparecido
26	La charamusca	Desaparecido
27	Pinole en vaso	Estilizado
28	Garambullo	Desaparecido
29	Camote	Estilizado
30	Gorditas de horno (rellenas de piloncillo)	Estilizado
31	Cecina en tiras	Desaparecido
32	Pan de colores	Desaparecido

Algunos de los productos en la categoría de productos alimenticios “estilizados” han caído en procesos de gourmetización y por tanto su comercialización ha sido relegada a tiendas especializadas para el turismo, tal es el caso del queso de tuna. Por otro lado, el pinole, las gorditas de elote tierno y los panes de agua, se venden ocasionalmente y con embalajes plásticos muy diferentes a como solía venderse en cucuruchos o bolsas de papel.

Más significativo, resulta los productos alimenticios “desaparecidos” entre ellos, ingredientes, alimentos preparados, dulces y bebidas que solían comercializarse en el mercado; relegando recetas y saberes culinarios en muchos casos al olvido.

Así también, los entrevistados identificaron una lista de productos utilitarios que también han sufrido transformaciones. A continuación, en el Cuadro 3, se enlistan los productos identificados, clasificándolos en productos utilitarios “estilizados” todos aquellos que aún se comercializan pero que ya no los consideran verdaderamente utilitarios por ser de mala calidad y estar asociados a los *souvenirs*². Así como, los “desaparecidos” aquellos que ya no se ofertan.

² Recuerdos

Cuadro 3. Relación de enseres utilitarios transformados

No.	Nombre	Tipo de Transformación
1	Cazuelas	Estilizado
2	Jarros en mancuerna	Desaparecido
3	Platos de barro	Estilizado
4	Velas de cera	Desaparecido
5	Petróleo	Desaparecido
6	Afilador	Desaparecido
7	Huaraches y rollos de cuero	Estilizado y desaparecido
8	Ajuar para caballos y reces	Desaparecido
9	Yugos	Desaparecido
10	Utensilios para la siembra	Desaparecido
11	Cubeta de fierro y parchado	Desaparecido
12	Rebozos	Estilizado
13	Chambras para bebé	Estilizado
14	Velos para misa	Estilizado
15	Resorte para la resotera	Desaparecido
16	Lavadero de madera	Desaparecido
17	Petate	Estilizado
18	Metate	Estilizado
19	Molcajete	Estilizado
20	Servilletas e hilos para bordar	Desaparecido
21	Canastas y chiquihuites	Estilizado
22	Espejos para conquistar	Estilizado
23	Raspador de maguey	Desaparecido
24	Jícara	Desaparecido
25	Cafetera de peltre	Desaparecido
26	Sombrero de campo	Desaparecido
27	Ponchos y jorongos	Estilizado
28	Baúl	Desaparecido
29	Pasadores de goma	Estilizado
30	Listones para el cabello	Estilizado
31	Peinetas	Desaparecido
32	Oaxacas para el burro	Desaparecido
33	Botas para el pulque	Desaparecido
34	Silla de madera	Desaparecido
35	Garabato	Desaparecido
36	Calabaza de burro	Desaparecido
37	Manta	Desaparecido

En la categoría de productos estilizados se encuentra el ejemplo de las cazuelas y platos de barro, los huaraches, los rebozos y velos para ir a misa, las chambras para bebé, el petate, el metate y el molcajete, las canastas, los chiquihuites, los espejos para conquistar -anteriormente usados entre los jóvenes para conquistar a las jóvenes en el jardín principal de la ciudad-; los ponchos y jorongos de lana, los pasadores de goma y los listones para entretejer las trenzas.

Los productos en la categoría de “desaparecidos”

corresponden a aquellos que ya no se ofertan en el mercado y que se relacionan a un proceso de sustitución en la modernidad. Entre ellos, están los jarros en mancuerna, las velas de cera, el petróleo para las lámparas, el afilador, los rollos de cuero para fabricar huaraches y la manta. Objetos relacionados al campo como, el ajuar para caballos y reces, yugos, oxacas para el burro, utensilios para la siembra, raspador de maguey, botas para pulque, el resorte para las resoteras y el sombrero para campo. Además de otros enseres domésticos como la cafetera de peltre, las cubetas de fierro y su parchado, el lavadero de madera, la jícara, el garabato, el baúl, la silla de madera tejida y las servilletas e hilos para bordar.

Los productos identificados son una muestra importante de los cambios y transformaciones en los hábitos de consumo en la población, que también se asume con la brecha generacional y a los procesos de la modernidad.

La turistificación y la gentrificación en San Miguel de Allende, no solo modifican las formas de consumo, sino que alteran los significados sociales de los productos, desplazando saberes ancestrales en favor de lógicas de mercado que privilegian la estetización y la rentabilidad; y fomentan el desplazamiento cultural y económico que afecta directamente la continuidad de las prácticas tradicionales en las ciudades mexicanas patrimonio del Bajío.

Frente a estas dinámicas, es fundamental repensar el papel de los mercados públicos como nodos de defensa del patrimonio cultural y alimentario. La exotización de los productos también puede representar un riesgo. Para ello, se requiere de políticas públicas orientadas al fortalecimiento de las economías locales, la participación comunitaria y el reconocimiento de la diversidad como valor estructural del país.

4. Discusión

La discusión resalta la contradicción entre la declaratoria de valor universal excepcional por parte de la UNESCO y la pérdida de prácticas vivas que sostienen la identidad cultural. Asimismo, se plantea la necesidad de repensar los modelos de gestión patrimonial para equilibrar el atractivo turístico con la salvaguarda de saberes y consumos comunitarios.

El pensamiento de Paulo Freire [1] y Pierre Bourdieu [2] permite cuestionar críticamente las políticas convencionales de turistificación y protección del patrimonio, las cuales, bajo el discurso de la conservación, tienden a subordinar los saberes populares a lógicas de mercado y de prestigio simbólico. En los mercados públicos patrimoniales, el conocimiento sobre los

productos transformados -resultado de prácticas culinarias, agrícolas y sociales históricamente situadas- se convierten en objeto de exhibición antes que en fuente viva de aprendizaje colectivo.

Desde la visión freireana, este proceso puede entenderse como una domesticación del conocimiento, donde la práctica popular pierde su potencial emancipador al ser reinterpretada para el consumo turístico. Se conserva la forma material, pero se desactiva su contenido político y pedagógico: los sujetos del saber son desplazados por el relato oficial del patrimonio.

En términos bourdieuanos estas políticas refuerzan una estructura de dominación simbólica, en la cual el capital cultural de las elites redefine lo “auténtico” y lo “valioso”, relegando el *habitus* popular a una posición subalterna. El mercado deja de ser un espacio de intercambio y solidaridad para transformarse en un escenario de distinción y consumo.

A nivel arquitectónico y urbano, estas dinámicas producen una ciudad que privilegia la estética patrimonial sobre la funcionalidad social, consolidando un modelo excluyente de desarrollo. Frente a ello, una política patrimonial verdaderamente crítica debería reconocer el valor epistemológico y comunitario de los saberes populares, garantizando su reproducción viva y su participación en la gestión del espacio.

Solo al recuperar el conocimiento encarnado en las prácticas del mercado -como praxis colectiva y capital cultural legítimo- será posible reorientar la conservación hacia una justicia espacial y epistémica, donde el patrimonio se viva y no solo se contemple.

5. Conclusión

El estudio permitió concluir que la turistificación de los mercados patrimoniales en ciudades como San Miguel de Allende ha conducido a la transformación y desplazamiento de productos alimentarios y utilitarios identitarios de la región. Esta situación constituye un síntoma de vulnerabilidad alimentaria y cultural, al limitar el acceso a bienes tradicionales y transformar los patrones de consumo.

Se sugiere que las políticas patrimoniales incorporen criterios de continuidad identitaria, reconociendo el papel de los mercados como espacios vivos y no únicamente como atractivos turísticos. Asimismo, se recomienda ampliar el análisis a otros productos y ciudades patrimonio, con el fin de construir un diagnóstico regional sobre la fragilidad de los sistemas de abasto local.

Los mercados tradicionales constituyen espacios fundamentales de la vida social y cultural mexicana. Sin embargo, en el contexto de las Ciudades Patrimonio, enfrentan amenazas por procesos de turistificación y gentrificación. La transformación o desaparición de productos identitarios de los mercados del Bajío, evidencia estos cambios. Los hallazgos sugieren que el desplazamiento de ciertos productos, constituyen un indicador de vulnerabilidad en los patrones de consumo alimentario identitario, accesible y asequible.

Es imperativo que las políticas patrimoniales consideren la soberanía alimentaria y el derecho a la ciudad de las poblaciones locales. En ese sentido, las políticas de intervención en las instalaciones del mercado (contenedor) debe analizar los impactos positivos y negativos en los productos de abasto popular (contenido), para que los mercados deban y puedan mantenerse como espacios de memoria, abasto justo y transmisión de saberes culinarios y culturales, en espacios auténticamente públicos.

Preservar este tipo de productos, no implica únicamente garantizar su disponibilidad física, sino también proteger los significados culturales que los sostienen. Los productos identitarios ofertados a través de los mercados públicos tradicionales son mucho más que una mercancía: son una narrativa viva del territorio, testimonio de resistencia simbólica y expresión identitaria que no puede ser reducida a un atractivo turístico ni a un objeto de consumo exotizado, por lo que su transformación o desaparición respalda la transformación espacial de los mercados.

Fuentes de financiamiento

Los autores agradecen a la Secretaria de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación SECIHTI, por los recursos otorgados.

Agradecimientos

Se agradece a los comerciantes y clientes del Mercado Ignacio Ramírez “El Nigromante” en la ciudad de San Miguel de Allende por compartir sus experiencias. Así como a los colegas que aportaron valiosas observaciones para enriquecer este estudio.

Conflictos de interés

Los autores declaran que no existen conflictos de interés.

Abreviaturas

Las siguientes abreviaturas se utilizan en este

manuscrito:

SEDATU: Secretaría de Desarrollo Agrario, Territorial y Urbano.

UNESCO: Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura.

6. Referencias bibliográficas

- [1] P. Freire, *Pedagogía de lo Oprimido*, Madrid: Siglo XXI, 1970.
- [2] P. Bourdieu, *La Distinción. Criterios y bases sociales del gusto*, Madrid: Taurus, 1979.
- [3] UNESCO, *Convención sobre la Protección del Patrimonio Mundial Cultural y Natural*, París, 1972.
- [4] V. Delgadillo, I. Díaz y L. Salinas, *Perspectivas del estudio de la gentrificación en México y América Latina*, México: Instituto de Geografía, UNAM, 2015.
- [5] M. Lacarrieu, «"Mercados tradicionales" en los procesos de gentrificación/recualificación. Consensos, disputas y conflictos.», *Alteridades*, pp. 29-41, 2016.
- [6] B. d. Sahagún, *Historia General de las Cosas de Nueva España*, México: Consejo Nacional para la Cultura y las Artes, [1577] 2000.
- [7] E. Matos Moctezuma, «El mercado de Tlatelolco,», *Arqueología Mexicana*, n° 98, pp. 54-60, 2010.
- [8] L. Jáuregui, «La economía de la guerra de independencia y la fiscalidad de las primeras décadas del México independiente,», de *Historia económica general de México: de la colonia a nuestros días*, México, El Colegio de México, 2010, pp. 245-274.
- [9] C. Marichal, «La economía de la época borbónica al México independiente, 1760-1850,», de *En Historia económica general de México: De la colonia a nuestros días*, México, El Colegio de México, 2010, pp. 173-210.
- [10] M. C. Díaz de León, *Mercados porfiristas del estado de Guanajuato*. Guanajuato, Guanajuato: Secretaría de Turismo del Estado de Guanajuato, 2015.
- [11] A. Giglia, *Comercio, consumo y cultura en los mercados públicos de la Ciudad de México*, Ciudad de México: Universidad Autónoma Metropolitana, 2018.
- [12] E. Fuentes Rojas, «El Abelardo Rodríguez, un Mercado del pueblo y para el pueblo,», *Crónicas*, pp. 17-24, 2010.
- [13] Secretaría de Desarrollo Agrario, Territorial y Urbano (Sedatu), *Transformando el territorio con mercados*, México: Secretaría de Desarrollo Agrario, Territorial y Urbano (Sedatu), 2024.
- [14] D. Navarrete, «Mercados Tradicionales, Turismo y Gentrificación,» de *Comercio Tradicional y Ciudades Contemporáneas*, Guanajuato, Universidad de Guanajuato, 2019, pp. 13-36.
- [15] V. Delgadillo, «La dimensión económica y cultural de los Mercados de Abasto,» *Andamios*, pp. 351-355, 2020.
- [16] S. González, *Contested Markets, Contested Cities*, London, UK: Routledge, 2017.
- [17] Gobierno de la Ciudad, *Mercados Públicos de la Ciudad de México, Pasado, Presente y Futuro: Perspectivas desde la Gestión Integral de Riesgos*, México: Secretaria de Desarrollo Económico, 2023.
- [18] D. Navarrete, «Turismo gentrificador en ciudades patrimoniales. Exclusión y transformaciones urbano-arquitectónicas del patrimonio en Guanajuato, México,» *INVI*, vol. 32, n° 89, pp. 61-83, mayo 2017.
- [19] M. Solórzano Gil, «Ciudades Patrimonio Mundial en México. Reflexiones sobre la calidad de vida urbana, la prosperidad y la sustentabilidad,» *Hereditas*, n° 30, pp. 16-29, 2019.
- [20] V. Delgadillo, «Patrimonialización de los mercados,» *Ciudades*, pp. 2-9, 2017.
- [21] D. C. Wright Carr y D. Vega Macías, *Los pueblos originarios del estado de Guanajuato, México*: Universidad de Guanajuato, 2014.
- [22] J. E. Espinosa Aguirre, «Sangre, polvora y minería. El Camino de la Plata y el proceso de independencia novohispano,» de *Camino Real Tierra Adentro. Por Guanajuato*, México, Gobierno del Esatdo de Guanajuato, 2022, pp. 247-260.
- [23] D. G. Velázquez Juárez, *La antigua Plaza de la Soledad de San Miguel de Allende: Centralidad desplazada, permanencias e identidad colectiva*, Guanajuato: Universidad de Guanajuato, 2019.

Lenguaje de Patrones; oportunidades metodológicas en arquitectura

Pattern language; methodological opportunities in architecture

Alvarado Zambrano, Erick Daniel y Flores Gutiérrez, Avatar.

Maestría en Arquitectura, Facultad de ingeniería

Universidad Autónoma de Querétaro

Querétaro, México

alvarado26@alumnos.uaq.mx avatar.flores@gmail.com

<https://orcid.org/0009-0002-9288-2938>

Resumen: Este artículo presenta una revisión bibliográfica sistémica sobre la literatura del lenguaje de patrones desarrollado por Christopher Alexander y sus colaboradores. El objetivo fue analizar sus aplicaciones e interpretaciones en la investigación del diseño arquitectónico, además de descubrir el impacto de la propuesta más allá del ámbito anglosajón. La metodología consistió en la recopilación de artículos de revistas indexadas que aportaron diversas conclusiones respecto al uso de la propuesta desarrollada por Alexander. A través de tablas de contenido se organizaron los autores y sus observaciones, para después categorizarlos según el tipo de estudio realizado. La sistematización de artículos permitió orientar la valoración de la pertinencia actual del lenguaje de patrones como recurso para aportar certezas metodológicas a la investigación del diseño arquitectónico. Los resultados mostraron que las críticas más frecuentes se relacionaron con la dificultad de integrarlo en los procesos proyectuales contemporáneos. No obstante, la revisión identificó interpretaciones recientes que abrieron la posibilidad de resignificarlo a partir de perspectivas neurocientíficas, así como de enfoques interdisciplinarios -como los provenientes de la informática y el urbanismo- que han influido en los debates arquitectónicos. Se concluyó que el lenguaje de patrones puede constituir un marco fértil para repensar las bases metodológicas de la arquitectura actual.

Palabras clave: Arquitectura, Lenguaje de patrones, Christopher Alexander, Certezas metodológicas

Abstract: This article presents a systemic bibliographic review of the literature on the pattern language developed by Christopher Alexander and his collaborators. The objective was to analyze its applications and interpretations in architectural design research, as well as to identify the impact of the proposal beyond the Anglo-Saxon context. The methodology consisted of compiling articles from indexed journals that offered various conclusions regarding the use of Alexander's proposal. Authors and their observations were organized through content tables and later categorized according to the type of study conducted. The systematization of articles guided the evaluation of the current relevance of the pattern language as a resource to provide methodological certainties for architectural research. The results showed that the most frequent critiques were related to the difficulty of integrating it into contemporary design processes. Nevertheless, the review identified recent interpretations that opened the possibility of resignifying it through neuroscientific perspectives, as well as interdisciplinary approaches—such as those from computer science and urbanism—that have influenced architectural debates. It was concluded that the pattern language can constitute a fertile framework for rethinking the methodological foundations of contemporary architecture.

Keywords: Architecture, Pattern language, Christopher Alexander, Methodological certainties.

1. Introducción

El presente artículo tiene como objetivo realizar una revisión sistemática de bibliográfica sobre el lenguaje de patrones de Christopher Alexander, con el fin de evidenciar su vigencia en la práctica arquitectónica

contemporánea. Asimismo, se destacan sus aportaciones como posibles certezas metodológicas para orientar la práctica proyectual.

El lenguaje de patrones [4], desarrollado junto con su equipo Alexander, Ishikawa, Silverstein, Jacobson, Fiksdahl-King y Angel, en la década de 1970, y

complementado con el libro [5], surgió como un marco innovador en el diseño arquitectónico. Su propósito era humanizar los procesos compositivos y garantizar que estos respondieran de manera sensible a las necesidades tanto del entorno como de sus habitantes. Esta propuesta se basa en la identificación y sistematización de soluciones recurrentes a problemas específicos de la práctica arquitectónica, articulando una red de patrones que, combinados, pueden guiar el acto de proyectar.

Con el paso del tiempo, el lenguaje de patrones trascendió la arquitectura y fue acogido por otras disciplinas. En informática, por ejemplo, los patrones de diseño han sido esenciales para el desarrollo de sistemas operativos, videojuegos y aplicaciones. Según Mehaffy et al. [1]: *“In many fields today, pattern languages have been used successfully to develop and share best practice design tools and strategies.”* En este campo, incluso dieron origen a herramientas como los wikis, que más tarde se popularizaron con plataformas como Wikipedia. De forma similar, en el urbanismo, los patrones han servido como método lógico para enfrentar problemas complejos, influyendo en el pensamiento del Nuevo Urbanismo y en la creación de ciudades más habitables y vecindarios funcionales [2].

En contraste, la arquitectura no ha integrado los patrones con la misma facilidad. Una de las razones radica en la formación académica, donde se privilegia la innovación formal por encima de soluciones sistemáticas [3]. Esta observación muestra que, aunque los patrones han demostrado su fertilidad en distintos campos, en la arquitectura contemporánea aún existen líneas de investigación necesarias para actualizar y resignificar su potencial.

En este sentido, la revisión sistemática que aquí se presenta busca reconocer cómo la literatura especializada ha discutido y transformado el lenguaje de patrones, identificar sus aplicaciones o interpretaciones recientes en la práctica arquitectónica, analizar las críticas que han limitado su integración en los procesos proyectuales, y explorar las perspectivas que lo plantean como una herramienta capaz de aportar certezas metodológicas a la práctica proyectual contemporánea. La búsqueda se centró en literatura en lengua española, lo cual responde al

interés de fortalecer la pertinencia de la investigación en el ámbito hispanohablante, donde los problemas arquitectónicos y urbanos presentan características propias que pueden enriquecer el debate, cuyo desarrollo académico complementa y amplía la reflexión sobre la vigencia del lenguaje de patrones en contextos diversos.

2. Metodología

La búsqueda se realizó en Google Académico y en bases de datos indexadas (Scopus, Web of Science, SciELO y Dialnet), considerando publicaciones en español entre los años 2015 y 2025. Este recorte temporal se estableció con el propósito de concentrar la revisión en estudios recientes, capaces de reflejar la vigencia del lenguaje de patrones en los debates actuales del diseño arquitectónico. Dado que la obra de Alexander constituye un corpus con una alta tasa de citación, delimitar el periodo a la última década permitió priorizar aportes contemporáneos y evitar repeticiones de interpretaciones anteriores.

Términos de búsqueda empleados:

- “lenguaje de patrones” “Christopher Alexander” “arquitectura” “académico” “aplicación”

Etapas de la metodología:

a. Búsqueda inicial.

Se realizaron búsquedas en Google Académico y en bases de datos indexadas utilizando las palabras clave relacionadas con el tema y los objetivos del artículo.

b. Primer filtro.

Se descartaron los documentos que:

- i. Tuvieran una antigüedad mayor a 10 años.
- ii. No fueran artículos indexados.
- iii. Temas no relacionados al uso del lenguaje de patrones.
- iv. Publicaciones repetidas.

c. Segundo filtro.

Se descartaron artículos cuyo contenido:

- i. No evalúe al lenguaje de patrones como una oportunidad disciplinar.
- ii. Se limite a referencias superficiales sin discusión propositiva.

- iii.No aporte a la reflexión sobre su vigencia, aplicabilidad o resignificación.
- iv.No sean aportaciones directas al corpus del lenguaje de patrones.

d. Selección final de artículos.

Los documentos resultantes se organizaron en una tabla con los siguientes campos:

- i.Código: LP-ARQ (arquitectura), LP-URB (urbanismo), LP-CS (ciencias computacionales) y LP-OTR (otras disciplinas).
- ii.Nombre del artículo.
- iii.Año de publicación.
- iv.País de origen.
- v.Área de estudio.
- vi.Principales aportaciones.
- vii.Vinculación con la práctica proyectual.

e. Síntesis de la información.

Del análisis de la tabla se desprende la lectura donde distintas disciplinas han discutido y utilizado el lenguaje de patrones, al mismo tiempo ponen en relieve aportaciones que apuestan por la vigencia como herramienta para abordar la actividad proyectual contemporánea en la arquitectura y en distintas disciplinas dentro de Latinoamérica y Europa.

3. Resultados

a. Búsqueda inicial.

La aplicación del primer filtro en Google Académico, donde se exploraron 32 páginas de información con un total de 480 referencias derivadas de las palabras clave “lenguaje de patrones”, “Christopher Alexander”, “arquitectura”, “académico” y “aplicación”, permitió realizar un primer descarte conforme a la *Tabla 1*.

b. Primer filtro.

Se cuantificaron las referencias mostradas por Google Académico a partir de las categorías de descarte previamente enunciadas en metodología con el fin de conseguir el primer filtro de descarte, encontrando que en su mayoría se muestran tesis que abordan el corpus desde distintas perspectivas.

Descarte de primer filtro	
Mayor a 10 años antigüedad	169
Artículos repetidos	8
Temas no relacionados	33
Libros	12
Tesis	217

Tabla 1. Primer filtro de análisis bibliográfico. Elaboración propia.

c. Segundo filtro.

Utilizando los criterios previamente definidos, se buscó garantizar que los artículos seleccionados aportaran de manera directa al estudio del lenguaje de patrones de Christopher Alexander [4].

En esta etapa se descartaron veinticinco textos que, si bien ofrecían reflexiones relevantes en otras áreas, no cumplían con los criterios definidos: oportunidad contemporánea, profundidad propositiva, reflexión sobre vigencia y resignificación, ni aportación directa al corpus del lenguaje de patrones [4].

Por ejemplo, el artículo [6], fue descartado debido a que su enfoque se limita al ámbito de la informática, aplicando patrones en el diseño de software sin establecer puentes conceptuales con la arquitectura y su actividad proyectual.

De manera similar, en la referencia [7] presentan una reflexión valiosa sobre el posthumanismo y la tecnología en el diseño, pero no establecen relación alguna con el lenguaje de patrones, por lo que quedó fuera del corpus de análisis.

En otro caso, el artículo [8], fue descartado porque, aunque aporta al debate urbano y social, no hace referencia al lenguaje de patrones ni a la obra de Alexander, lo cual lo sitúa fuera de los objetivos de esta revisión.

La aplicación de criterios claros permitió distinguir entre trabajos con aportaciones tangenciales y aquellos que realmente ofrecen una resignificación o aplicabilidad contemporánea de la propuesta de Alexander [4]. En conclusión, en la tabla 2 se presenta la clasificación bibliográfica de los artículos seleccionados para el análisis, que constituyen el corpus final de esta investigación.

d. Selección final de artículos.

En la etapa final se seleccionaron 18 artículos, los cuales se analizaron a detalle y se clasificaron en una tabla general con los datos previamente mencionados en la fase de metodología, incorporando aspectos de su pertinencia, aportaciones y vinculación con la práctica proyectual. Estos se enlistan en la *Tabla 2*.

Tabla 2. Clasificación bibliográfica de artículos finales. Elaboración propia.

Código	Nombre del artículo	Año de publicación	País de origen	Área de estudio	Principales aportaciones	Vinculación con la práctica proyectual
LP-ARQ	Diseño y habitabilidad con lenguaje de patrones. [9]	2018	México	Arquitectura / Vivienda	Aplica el lenguaje de patrones para evaluar la habitabilidad en vivienda; genera un método práctico	Relaciona directamente el lenguaje de patrones con la mejora del espacio habitable
LP-ARQ	Aproximaciones teóricas del habitar y la transformación de la vivienda. [10]	2022	Perú	Arquitectura / Vivienda	Análisis crítico sobre vivienda popular y patrones de transformación; enfoque latinoamericano	Evidencia la vigencia de los patrones en contextos sociales vulnerables
LP-ARQ	Caracterización gráfica de las interacciones de patrones alexandrinios en la Plaza Santander (UNAL Bogotá) [11]	2023	Colombia	Arquitectura / Representación	Uso de dotplots para representar gráficamente relaciones entre patrones	Propone nuevas herramientas gráficas para aplicar patrones en análisis urbano-arquitectónico
LP-ARQ	Christopher Alexander y sus patrones en Mexicali. [12]	2019	México	Arquitectura / Urbanismo	Análisis de la aplicación del lenguaje de patrones en proyectos locales	Evidencia su potencial como herramienta de planeación urbana y social
LP-ARQ	Bases para una consideración sistémica del diseño arquitectónico. [13]	2022	México / Argentina	Arquitectura / Teoría sistémica	Propone un marco sistémico para el diseño arquitectónico con apoyo en Alexander	Aporta fundamentos teóricos para integrar patrones como certezas metodológicas
LP-URB	De proyecto a proceso. Trayectorias posibles para un proyecto urbano basado en la escucha. [14]	2023	España	Urbanismo / Participación	Reflexiona sobre la escucha y participación en proyectos urbanos; vincula con Alexander (Oregon Experiment)	Relaciona los patrones con procesos participativos y de escala humana
LP-ARQ	Memoria conceptual: herramienta para la invención de imágenes visuales arquitectónicas. [15]	2024	México	Arquitectura / Procesos proyectuales	Propone la memoria conceptual como herramienta en diseño; vincula a Alexander como antecedente	Aporta a la reflexión sobre procesos proyectuales contemporáneos

LP-ARQ	El lenguaje de patrones en los espacios abiertos. [16]	2020	España	Arquitectura / Espacio público	Propone el uso de patrones de Alexander para diseñar y evaluar espacios abiertos urbanos	Evidencia cómo los patrones pueden guiar intervenciones en espacio público
LP-ARQ	Espacios sagrados contemporáneos. [17]	2018	México	Arquitectura / Espiritualidad	Analiza cómo los patrones ayudan a articular espacios de culto contemporáneos	Integra los patrones como guía de diseño en contextos simbólicos
LP-ARQ	Fractales en arquitectura. [18]	2016	Argentina	Arquitectura / Teoría	Relaciona la geometría fractal con el lenguaje de patrones de Alexander	Aporta a la reflexión sobre formas complejas aplicables al diseño arquitectónico
LP-ARQ	Habitar, la cualidad sin nombre y la arquitectónica. [19]	2019	España	Arquitectura / Filosofía	Reflexiona sobre la “cualidad sin nombre” de Alexander y su vigencia en el habitar	Conecta la teoría de Alexander con prácticas contemporáneas del habitar
LP-ARQ	Habitar la quebrada. [20]	2021	Argentina	Arquitectura / Contexto natural	Aplica patrones al análisis de vivienda en contextos de quebradas y territorios vulnerables	Propone lineamientos proyectuales sensibles al entorno natural
LP-URB	Hacia un diseño urbano guiado por la inteligencia colectiva. [21]	2015	España	Urbanismo / Complejidad	Explora cómo la inteligencia colectiva puede guiar procesos urbanos y conecta con patrones	Vincula la lógica de patrones con procesos urbanos bottom-up
LP-ARQ	Infancia y confinamiento. [22]	2021	México	Arquitectura / Espacio doméstico	Observa patrones de uso del espacio doméstico durante el confinamiento infantil	Evidencia vigencia del enfoque de Alexander en contextos emergentes
LP-URB	Intervenciones urbanas en La Boca: relevamiento de patrones urbanos y culturales. [23]	2019	Argentina	Urbanismo / Cultura urbana	Identifica patrones urbanos y culturales aplicando Alexander y Nikos Salingaros	Ejemplo concreto de adaptación del lenguaje de patrones a escala barrial
LP-ARQ	La casa como escenario lúdico. [24]	2017	España	Arquitectura / Espacio doméstico	Vincula juego infantil y patrones domésticos (Alexander: cuevas, escondites)	Aporta a la comprensión del espacio doméstico como escenario creativo
LP-OTR	Los patrones de diseño como herramientas para guiar la práctica del profesorado. [25]	2016	España	Educación / Tecnología educativa	Adapta el lenguaje de patrones a la práctica pedagógica universitaria	Muestra la transferencia metodológica de Alexander hacia la enseñanza
LP-ARQ	Los patrones que habita la mujer. [26]	2023	Ecuador	Arquitectura / Vivienda / Género	Identifica patrones de comportamiento en el habitar femenino en vivienda contemporánea latinoamericana	Propone lineamientos de vivienda flexibles y sensibles a la perspectiva de género
LP-URB	Saberes compartidos del hábitat: una arquitectura para el paisaje rural. [27]	2019	Colombia	Arquitectura / Paisaje / Diseño participativo	Desarrolla metodología de saberes colectivos integrando Alexander, Habraken y Aravena	Modelo metodológico participativo aplicable a proyectos de hábitat rural

e. Síntesis de la información.

Distintos países y disciplinas han abordado a los patrones desde la búsqueda de certezas metodológicas, como guías o directrices que ayudan a orientar la práctica espacial y social de una manera más humana.

En este sentido, la *Tabla 3* presenta los países hispanohablantes con mayor y menor acercamiento a la investigación sobre el lenguaje de patrones. Esto evidencia que la vigencia de Alexander [4] trasciende su país de origen y que existen otros contextos interesados en abordar su propuesta, con el propósito de enriquecer los procesos y resultados de estudios contemporáneos en distintas disciplinas.

Tabla 3. Recuento de artículos. Elaboración propia.

Cantidad de artículos por país	
México	6
Colombia	2
España	6
Argentina	4
Ecuador	1
Perú	1

Siguiendo el conteo de los códigos se puede hacer una lectura clara de cuáles son las disciplinas con mayor acercamiento a la exploración del uso de patrones como herramienta exploratoria de solución, a continuación, en la *Fig. 1* se muestra la gráfica porcentual que permite identificar tendencias y contrastes en su aplicación.

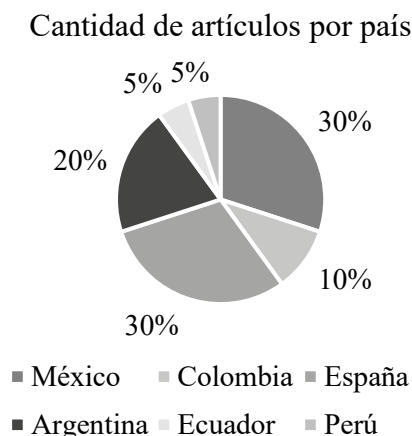


Figura 1. Gráfica de porcentajes de incidencia por país. Elaboración propia.

En la *Tabla 4* permite observar cuales son las áreas principales que estudian al lenguaje de patrones desde una lengua hispana, en ella se enlistan el recuento de códigos por disciplina.

Tabla 4. Recuento de códigos. Elaboración propia.

Cantidad de artículos por disciplina	
LP-ARQ	14
LP-URB	4
LP-OTR	1

En términos generales, la sistematización de los artículos seleccionados permite observar que el lenguaje de patrones ha sido retomado en una diversidad de áreas del conocimiento dentro del ámbito hispanohablante. Predomina su análisis en arquitectura, aunque también se identifican aplicaciones en urbanismo, diseño participativo, paisaje natural, espiritualidad, nuevas tecnologías e incluso pedagogía, lo que evidencia la versatilidad de la propuesta de Alexander [4].

Más allá de su reconocimiento teórico, varios de los estudios lo utilizan como metodología proyectual, aplicando sus patrones para guiar decisiones de diseño tanto en proyectos urbanos como arquitectónicos. Otros lo emplean como marco teórico para sustentar aproximaciones críticas o para resignificar el habitar en contextos contemporáneos, especialmente en investigaciones vinculadas a vivienda social, espacio público y participación ciudadana. En algunos casos, los patrones funcionan como instrumentos de análisis, utilizados para identificar configuraciones espaciales y prácticas culturales en distintas escalas, desde la vivienda hasta el entorno urbano.

Asimismo, el recuento por países muestra una presencia destacada en México, España, Argentina y Colombia, con aportes puntuales desde Perú y Ecuador, lo que sugiere que la reflexión sobre los patrones no se limita a un contexto local, sino que atraviesa distintos escenarios latinoamericanos y europeos. Este panorama confirma que, pese a las críticas y los vacíos detectados en la literatura, existe un interés sostenido por explorar la vigencia del lenguaje de patrones y adaptarlo a problemas contemporáneos de la práctica proyectual.

4. Discusión

El análisis bibliográfico realizado permite reflexionar sobre cómo el lenguaje de patrones sigue generando un diálogo transversal entre teoría, práctica y enseñanza. En los textos revisados se observa que su aplicación se orienta hacia una reinterpretación crítica de los patrones como estrategias para afrontar los desafíos del diseño contemporáneo. Esta tendencia demuestra que el lenguaje de patrones mantiene su potencial como una herramienta de integración metodológica, capaz de vincular la reflexión teórica con la acción proyectual.

En el campo de la arquitectura, diversos autores recuperan el lenguaje de patrones como un instrumento que aporta coherencia y continuidad a los procesos de diseño. Esta recuperación implica reconocer la complejidad de los entornos actuales, donde las decisiones arquitectónicas deben responder simultáneamente a condicionantes sociales, ambientales y tecnológicas. La idea de Alexander sobre la “cualidad sin nombre” aparece resignificada en estos trabajos como un intento por reconciliar la dimensión humana del habitar con las dinámicas productivas y digitales de la arquitectura contemporánea. Así, el lenguaje de patrones se posiciona como un sistema que permite articular lo técnico y lo sensible dentro del proceso proyectual.

Por otra parte, investigaciones en urbanismo y diseño participativo evidencian que los patrones pueden funcionar como herramientas de mediación social. Su empleo en procesos colaborativos facilita la traducción de necesidades colectivas en soluciones espaciales coherentes, fortaleciendo la apropiación del espacio y la construcción de comunidades más inclusivas. En este sentido, el lenguaje de patrones actúa como un medio de comunicación entre actores con distintos saberes y niveles de experiencia, favoreciendo la toma de decisiones compartidas y la consolidación de prácticas más democráticas en el diseño.

Entre las interpretaciones contemporáneas del lenguaje de patrones, cobran especial relevancia las propuestas que amplían su alcance metodológico. Retomar esta estructura conceptual en la actualidad representa una oportunidad para actualizar su enfoque

y reafirmar su pertinencia en la práctica arquitectónica. La revisión contemporánea reconoce su potencial como un marco flexible para abordar las problemáticas actuales de la habitabilidad y la sostenibilidad, sin limitarse a su valor histórico.

Antes de la incorporación de nuevas lecturas, resulta pertinente recordar que Alexander estructuró su propuesta en una lógica tripartita que articula tres dimensiones fundamentales: la constitutiva, vinculada al contexto y a las condiciones del entorno donde surge un problema de diseño; la compositiva, que aborda la formulación del problema y la relación entre las partes que lo integran; y la morfológica, correspondiente a la solución formal o espacial que materializa la respuesta proyectual. Estas tres dimensiones permiten comprender a los patrones como unidades de conocimiento que integran contexto, conflicto y solución.

En esta línea, [28] propone incorporar una cuarta dimensión valorativa que complemente las dimensiones constitutiva, compositiva y morfológica planteadas por Alexander. Esta incorporación permite analizar los patrones desde su capacidad para integrar criterios sociales, ambientales y culturales en los procesos de diseño, fortaleciendo su dimensión ética.

Desde esta perspectiva, los patrones adquieren un papel activo en la generación de entornos más coherentes con las necesidades humanas. Su reinterpretación permite orientar decisiones proyectuales que prioricen la calidad del habitar, la sostenibilidad y el sentido de pertenencia, de este modo, la dimensión valorativa refuerza la idea de que los patrones son estructuras de significado que median entre el diseño y la vida cotidiana.

Pese a su versatilidad, persisten limitaciones en su aplicación práctica. Una de las principales se relaciona con la dificultad de traducir los principios del lenguaje de patrones a los métodos y herramientas de diseño contemporáneo, especialmente en contextos donde prevalece la lógica de la innovación formal sobre la reflexión metodológica. Asimismo, la literatura revisada muestra una escasez de estudios empíricos que evalúen el impacto real de los patrones en la mejora de los espacios habitables.

Finalmente, la articulación entre el lenguaje de patrones y las nuevas epistemologías de la complejidad sugiere una expansión del conocimiento aplicado en arquitectura. Esta

convergencia abre líneas futuras de investigación orientadas a desarrollar métodos híbridos que combinen la estructura relacional de los patrones con herramientas digitales, enfoques participativos y criterios de responsabilidad con el medio ambiente. En este escenario, el lenguaje de patrones se reafirma como un método que puede integrar teoría y práctica, recuperando su vocación original de humanizar el diseño arquitectónico.

5. Conclusión

El presente artículo permitió constatar que el lenguaje de patrones de Christopher Alexander continúa siendo un referente metodológico vigente, con distintos niveles de apropiación según disciplina y país. Su versatilidad ha favorecido su adopción en campos como la arquitectura, el urbanismo, el diseño participativo, la pedagogía y las tecnologías emergentes, demostrando su capacidad para adaptarse a contextos diversos y a problemáticas actuales del diseño.

El análisis evidenció que las reinterpretaciones contemporáneas del lenguaje de patrones no se limitan a su estructura original, sino que promueven nuevas lecturas centradas en la dimensión humana del habitar. Estas aproximaciones destacan su potencial para ofrecer marcos de trabajo flexibles, capaces de equilibrar la innovación formal con la reflexión metodológica. En consecuencia, el lenguaje de patrones reafirma su papel como herramienta que favorece la coherencia entre el proceso proyectual, las condiciones del entorno y las necesidades de los usuarios.

A partir de la revisión, se concluye que las líneas de investigación más prometedoras se orientan hacia la incorporación de valores sociales, ambientales y culturales en la práctica proyectual, así como en la exploración de enfoques interdisciplinarios que fortalezcan su aplicabilidad en contextos contemporáneos. El lenguaje de patrones, por tanto, no debe entenderse como un sistema cerrado, sino como un marco evolutivo que puede seguir nutriendo los procesos de diseño desde una perspectiva más humana y sostenible.

Finalmente, este estudio reafirma la necesidad de

continuar investigando en torno a su potencial metodológico, especialmente en el ámbito latinoamericano, donde las particularidades sociales y urbanas ofrecen un campo fértil para su adaptación. El lenguaje de patrones se mantiene, así como una herramienta vigente para reflexionar, proyectar y construir entornos que respondan de manera sensible y coherente a la complejidad de la vida contemporánea.

6. Agradecimientos

El autor y los autores agradecen a la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación de México y a la Universidad Autónoma de Querétaro por los recursos otorgados para la realización de esta investigación.

Durante la preparación de este manuscrito, los autores utilizaron Chat GPT 5 con el propósito de revisar faltas ortográficas y gramaticales. Los autores revisaron y editaron el contenido generado y asumen plena responsabilidad por el contenido de esta publicación.

7. Conflictos de interés

Los autores declaran que no existen conflictos de interés.

8. Referencias

- [1] Mehaffy, M., Kryazheva, Y., Rudd, A., & Salingaros, N. A. (2020). *A new pattern language for growing regions*. Centre for the Future of Places, KTH Royal Institute of Technology, & UN-Habitat. pp. 11
- [2] Arvizu, J. (2005). El nuevo urbanismo: Ciudades habitables y vecindarios funcionales. *Bitácora Urbano*
- [3] Salingaros, N. A. (1999). Architecture, patterns, and mathematics. *Nexus Network Journal*, 1, 75-86. *Territorial*, 9(1), 45-57.
- [4] Alexander, C., Ishikawa, S., Silverstein, M., Jacobson, M., Fiksdahl-King, I., & Angel, S. (1977). *A pattern language: Towns, buildings, construction*. Oxford University Press.
- [5] Alexander, C. (1979). *The timeless way of building*. Oxford University Press.
- [6] Quilindo, L. A., & Vega, J. S. (2023). Especificación

de la arquitectura de software. *Revista TIA: Tecnología, Investigación y Academia*, 11(2), 170–181.

[7] Abdel Castro Salgado, S., & Sosa Tamayo, D. M. (2020). Panal. Hacia una arquitectura posthumana. *RUA: Revista de Arquitectura, Universidad Autónoma de Aguascalientes*, 23(1), 49–56.

[8] Zacarías Capistrán, P., Mendoza Kaplan, L., & Hernández Bonilla, M. (2018). Aproximaciones críticas a los modos institucionales de intervención a las prácticas ciudadanas en el centro histórico de Xalapa, Veracruz, México. *Rita. Revista Indexada de Textos Académicos*, (9), 166–171.

[9] Blasco Lucas, M. (2018). Diseño y habitabilidad con lenguaje de patrones. Laocoonte. *Revista de Estética y Teoría de las Artes*, (5), 231–245.

[10] Failoc Su, V. G. (2022). Aproximaciones teóricas del habitar y la transformación de la vivienda popular en el Perú. *Revista de Arquitectura PUCP*, 14(1), 55–70.

[11] Patiño, D., & Arango, L. (2020). Caracterización gráfica de las interacciones de patrones alexandrinos en la Plaza Santander. *Revista DAYA. Diseño, Arte y Arquitectura*, 14, 51–58.

[12] Alexander, C., & Salinger, N. A. (2019). Christopher Alexander y sus patrones en Mexicali. *Hábitat y Sociedad*, (12), 45–63.

[13] Flores Gutiérrez, A. (2022). Bases para una consideración sistémica del diseño arquitectónico. *AREA*, 28(2), 1-14. Recuperado de https://www.area.fadu.uba.ar/wp-content/uploads/AREA2802/2802_flores-gutierrez.pdf

[14] Marrodán Ciordia, E. (2023). De proyecto a proceso: Trayectorias posibles para un proyecto urbano basado en la escucha. *ZARCH. Journal of Interdisciplinary Studies in Architecture and Urbanism*, 20, 72–85.

[15] Acosta Pérez, F. F. (2024). Memoria conceptual: Herramienta para la invención de imágenes visuales arquitectónicas. Cuaderno 212, Universidad de Buenos Aires.

[16] Rivas, L. M. (2018). El lenguaje de patrones en los espacios abiertos: Plazas de la Parroquia Bolívar de Maracaibo. *Revista de la Universidad del Zulia, 3a época. Ciencias del Agro, Ingeniería y Tecnología*, 9(23), 76–90.

[17] Fernández, M., & colaboradores (2018). Espacios sagrados contemporáneos. *Revista Arquitectura y Religión*, 12(1), 77–89.

[18] González, F. (2016). Fractales en arquitectura. *Procesos Urbanos*, (3), 21–34.

[19] López, J. (2019). Habitar, la cualidad sin nombre y la arquitectónica. *Astrágalo. Cultura de la Arquitectura y la Ciudad*, (31), 217–230.

[20] Moreno, L. (2021). Habitar la quebrada. *Revista de Arquitectura Sur*, 15(2), 55–70.

[21] Arteta Grisaleña, J. (2015). Hacia un diseño urbano guiado por la inteligencia colectiva. *Bitácora Urbano Territorial*, 25(2), 57–67. <https://doi.org/10.15446/bitacora.v25n2.46338>

[22] Freire-Pérez, E. (2021). Infancia y confinamiento: Prácticas espaciales de resistencia. *Arte, Individuo y Sociedad*, 33(2), 489–506. <https://doi.org/10.5209/aris.70764>
Dearq, (24), 74–89. <https://doi.org/10.18389/dearq24.2019.05>

[23] Zavaglia, M. (2019). Intervenciones urbanas: Relevamiento de patrones urbanos y culturales de La Boca. En XIII Jornadas de Investigación CAEAU. Facultad de Arquitectura, Universidad Abierta Interamericana, Buenos Aires.

[24] Benito, A. de. (2017). La casa como escenario lúdico. *Revista REIA*, (8), 95–109.

[25] Gros, B., Escofet, A., & Marimón, M. (2016). Los patrones de diseño como herramientas para guiar la

práctica del profesorado. *Revista de Educación a Distancia* (RED), (50), 1–23.
<https://doi.org/10.6018/red/50/4>

[26] Rodríguez, A. (2023). Los patrones que habita la mujer. *PURIQ*, 5(2), 77–92.
<https://doi.org/10.37073/puriq.5.2.178>

[27] García-Reyes, M. I., & Anzellini, S. (2019). Saberes compartidos del hábitat: Una arquitectura para el paisaje rural.

[28] Hidalgo Pérez, A. (2018). Diseño y habitabilidad con lenguaje de patrones. *Cuaderno de Proyectos Arquitectónicos*, (8), 43–56. Universidad Politécnica de Madrid. <https://doi.org/10.20868/cpa.2018.8.3910>

Reconstrucción de dibujo paramétrico CAD, sketch, desde imágenes usando redes neuronales

CAD parametric drawing reconstruction from images using neuronal networks

Valencia Gonzalez, Jonatan; Takacs, Andras; Pedraza Ortega, Jesus Carlos; Ramos-Arreguin, Juan-Manuel.

*Afiliación: Facultad de Ingeniería
Universidad Autónoma de Querétaro
Querétaro, México*

*jonvg7k@gmail.com, andras.takacs@uaq.edu.mx, caryoko@yahoo.com, jsistdig@yahoo.com.mx;
ORCID (ORCID: [<https://orcid.org/0009-0000-9155-8808>], [<https://orcid.org/0000-0003-2200-307X>], [<https://orcid.org/0000-0001-5125-8907>], [<https://orcid.org/0000-0002-2604-9692>])*

Resumen: Los archivos 3D de diseño mecánico son ampliamente usados, la mayoría de sus características se definen en el dibujo paramétrico o sketch. Este trabajo propone un método para reconstruir el sketch a partir de imágenes de contornos. Se genera una base de datos sintéticos, de imágenes de contornos, compuestos únicamente por líneas rectas, con entre 3 y 6 líneas. Se usan redes convolucionales para procesar las imágenes y predecir las coordenadas de los vértices de las líneas. Posteriormente con estas coordenadas se genera un script que es la representación en código del sketch, usando la librería de FreeCAD en Python. Finalmente el script es ejecutado en el software FreeCAD para generar el sketch en la interfaz gráfica de FreeCAD, lo que permite la completa edición y manipulación del sketch.

Palabras clave: IAR; CAD; Sketch; convolución; reconstrucción de coordenadas.

Abstract: 3D mechanical design files are widely used, most of its characteristics are defined in the parametric drawing or sketch. In this work a method to reconstruct the sketch from contour images is proposed. A synthetic database of contours images is generated, made only of straight lines, from 3 to 6 lines. Convolutional networks are used to process images and predict line's coordinates. Then those coordinates are used to generate a script that is a code representation of the sketch, using the FreeCAD library in Python. Finally the script is executed in FreeCAD software, generating the sketch in the graphics user interface, which enables the full manipulation of the sketch.

Keywords: IAR; CAD; Sketch; convolution; coordinates reconstruction.

1. Introducción

Los archivos 3D son representaciones computarizadas de un objeto o pieza, estos archivos tienen una amplia gama de enfoques y aplicaciones. Las técnicas para crear estos archivos 3D se pueden dividir en 2 categorías principales: de diseño mecánico y de diseño gráfico. Las principales diferencias entre estas categorías son: el proceso de diseño, el tipo de geometría y la aplicación. El presente trabajo se enfoca en archivos 3D de diseño mecánico.

El diseño gráfico tiene las siguientes características: usa formas irregulares, las geometrías se van esculpiendo y deformando, no se enfoca en dimensiones o parámetros, el

proceso de diseño se centra en la geometría final, y no en las operaciones que se usaron, por lo que no hay forma de editar una operación pasada específica. Tiene aplicaciones en entretenimiento, mercadotecnia entre otras.

En contraste el diseño mecánico se caracteriza por lo siguiente: se usan geometrías regulares como líneas rectas y superficies planas, las geometrías se controlan con parámetros de dimensión o restricciones geométricas, el proceso de diseño se centra en operaciones que se guardan en un árbol de operaciones.

Estas características en el diseño mecánico permiten por ejemplo, controlar el radio y punto tangente de un arco, o el ángulo y

longitud de una línea. Un elemento como una línea recta no se puede deformar en una curva, hay que cambiar el tipo de geometría lo que genera consistencia en las geometrías deseadas. Las geometrías y operaciones se guardan por etapas en un árbol de operaciones, por lo que cualquier operación y geometría pasada se puede editar y reconstruir la geometría con los cambios.

Todo esto permite diseñar geometrías muy complejas y editarlas de forma precisa para adaptarse a cambios, nuevas aplicaciones, corregir errores de diseño, entre otras. Estas cualidades hacen que los archivos 3D de diseño mecánico sean indispensables en aplicaciones como manufactura, ingeniería, análisis mecánico entre otras.

De forma simplificada para poder generar un "archivo 3D de diseño mecánico" se siguen 3 pasos: el primero es seleccionar un plano, segundo generar un dibujo paramétrico o sketch sobre el plano, tercero y último es aplicar una operación volumétrica al dibujo paramétrico. Repitiendo estos 3 pasos se crean geometrías complejas con variedad de aplicaciones. El paso 2 es fundamental ya que es en el dibujo o sketch que se definen la mayoría de las características del archivo 3D.

El "sketch" o dibujo paramétrico es la base del "archivo 3D de diseño mecánico", porque en el sketch se definen, geometrías primitivas (líneas y arcos), geometrías paramétricas (curvas, trayectorias, patrones), restricciones dimensionales (longitud, radio), restricciones geométricas (tangencia, perpendicularidad, simetría), referencias a otras geometrías (por ejemplo para ensamble).

Los "archivos 3D de diseño mecánico" son ampliamente usados. Una de sus principales aplicaciones es en manufactura, ya que la gran mayoría de los objetos que se producen en la actualidad requieren un archivo 3D de diseño mecánico, ya sea para diseñar la pieza que se va a fabricar como un engrane o pistón, o para diseñar la herramienta que va a fabricar la pieza, como moldes de inyección para la suela de un tenis.

Si bien los archivos 3D de diseño mecánico son ampliamente usados, estos archivos rara vez están disponibles, esto limita la capacidad

de edición, modificación y la capacidad de volver a fabricar las piezas. Incluso si se cuenta con el archivo no hay compatibilidad entre diferentes marcas de software, en ocasiones incluso no hay compatibilidad entre versiones del mismo software. A causa de estas limitaciones, y considerando las ventajas mencionadas anteriormente, poder reconstruir de forma automática estos archivos abriría una amplia gama de posibilidades, por las aplicaciones que tienen los archivos 3D de diseño mecánico.

Para realizar la reconstrucción considerando que no se tenga el archivo de una pieza más que la pieza misma, se propone reconstruir a partir de fotografías, la idea es procesar fotos para generar una imagen de la cara principal de la pieza, con el contorno exterior identificado, esta imagen después se va a analizar con una red convolucional, para extraer las coordenadas de los vértices, los vértices a su vez describen las líneas, luego con esas coordenadas reconstruir las líneas (elementos) del contorno en FreeCAD que es un software de diseño mecánico.

A continuación se describen las limitaciones del proyecto. El dataset usado se genera de forma sintética por la gran cantidad de datos que se requieren para entrenar una red neuronal. Se van a usar imágenes pequeñas de 128 por 128 píxeles por limitaciones de poder de cómputo. Las imágenes sólo tendrán líneas rectas para facilitar el análisis y la generación del dataset, quedan fuera otro tipo de geometrías como arcos. Para ajustarse a la salida de tamaño fijo de la red convolucional, se propone usar imágenes de entre 3 y 6 líneas, y de esta forma tener siempre una salida de la red de 6 elementos por 2 componentes x, y.

Si bien hay varios trabajos enfocados en modificar y procesar archivos 3D de diseño mecánico, se considera que ninguno se enfoca realmente en la reconstrucción del sketch, como se aborda en el trabajo presente, a continuación se discuten trabajos similares que se pueden dividir en tres categorías, enfocados en modificación de archivos de malla de polígonos, en específico en formato de lenguaje de triangulación estándar (STL por sus siglas en inglés), trabajos enfocados en el procesamiento de los archivos 3D y

sketch, y por último, enfocados en la identificación de vértices.

Respecto a la modificación de archivos de malla de polígonos en formato STL tenemos, el caso de [1] que busca mejorar el mallado del archivo para realizar análisis de elemento finito, o el caso de [2] que intenta modificar los STL mediante operaciones booleanas, también tenemos el caso de [3] que busca generar una malla de control para modificar el STL. En [4] busca identificar superficies en el archivo de mallas de polígonos pero no avanza a generar el sketch.

Respecto al procesamiento del archivo 3D y sketch tenemos los siguientes trabajos, el caso de [5] que busca analizar el sketch mediante la representación de grafos, también tenemos el caso de [6] y [7] que busca generar una representación del sketch pero mediante un lenguaje de dominio específico el cual es propietario lo cual limita su uso, además parten de modelos 3D ya existentes.

Siguiendo con trabajos de reconstrucción del sketch, en [8] se busca digitalizar dibujos a mano al identificar sus elementos, pero no llega a generar el sketch como tal en una interfaz gráfica enfocado en su modificación y parametrización.

Pasando a trabajos que busquen encontrar bordes o vértices en imágenes, tenemos el caso de [9], que busca encontrar los bordes y por último vértices para describir los polígonos para poder encontrar edificios en imágenes satelitales, su método toma como entrada el mapa de probabilidad de una red convolucional para después procesarlo, y encontrar los vértices. En [10] se extraen los vértices desde una imagen usando una red convolucional para generar un mapa de características, posteriormente crear una máscara de detección al pasar el mapa de características por una capa convolucional 1x1, y posteriormente extraer los vértices con un algoritmo de supresión de “no-máximos”, para extraer los picos más relevantes que serían los vértices. El caso de [11] para encontrar los vértices o en este caso esquinas, usa árboles de decisión, la idea es tomar un píxel “x” que se va comparar con los píxeles

que están a su alrededor, y ver si son más oscuros, más brillantes o similares. Con esta información luego se calcula la entropía para clasificar si el píxel “x” que se está analizando es un vértice o no.

En la identificación de polígonos para edificios en imágenes satelitales, en [12] usan una red convolucional con forma de U también llamada “U-net” para generar 3 salidas, una máscara de bordes, una máscara interior, y un “campo de marcos”, estas salidas de la U-net son procesadas posteriormente para generar los polígonos de edificios, en específico la parte de encontrar los vértices se realiza un procesamiento posterior, el cual consiste en alinear la máscara interior con el “campo de marcos”, para detectar los bordes usando el “modelo de esqueleto activo”, y por último se realiza la detección de los bordes usando “campos de marcos” eliminando los vértices que no está en esquinas.

Las propuestas anteriores parten de puntos de inicio diferentes al propuesto en este trabajo, o no llegan a generar el sketch o dibujo paramétrico en la interfaz de usuario gráfica lo que limita las aplicaciones y su modificación.

2. Materiales y métodos

El proceso propuesto para reconstruir el sketch se muestra en la figura 1, la idea es a partir de imágenes extraer las coordenadas de los vértices usando redes convolucionales, para con esas coordenadas reconstruir el sketch en el software de diseño FreeCAD. Esto permite editar completamente el sketch, agregar parámetros como dimensiones, agregar operaciones volumétricas, y usarlo en análisis mecánicos entre otras aplicaciones.

Los datos de entrada son imágenes del contorno de un objeto o pieza, la idea es en el futuro ampliar el alcance para procesar fotografías de piezas reales. Para acotar el alcance de éste proyecto se consideran ciertas limitaciones, para las imágenes de entradas como: la cantidad de datos requeridos para entrenar las redes, la capacidad de cómputo disponible, simplificar el análisis usando sólo

líneas rectas.

Las imágenes de entrada por las limitaciones comentadas, se define de la siguiente manera, el contorno está compuesto solo por líneas rectas excluyendo curvas o otro tipo de geometrías, las líneas del contorno no se cortan entre sí, el contorno está compuesto por entre 3 y 6 líneas rectas, la imagen tiene el contorno ya identificado en blanco con fondo negro, el tamaño es pequeño de 128x128 píxeles.

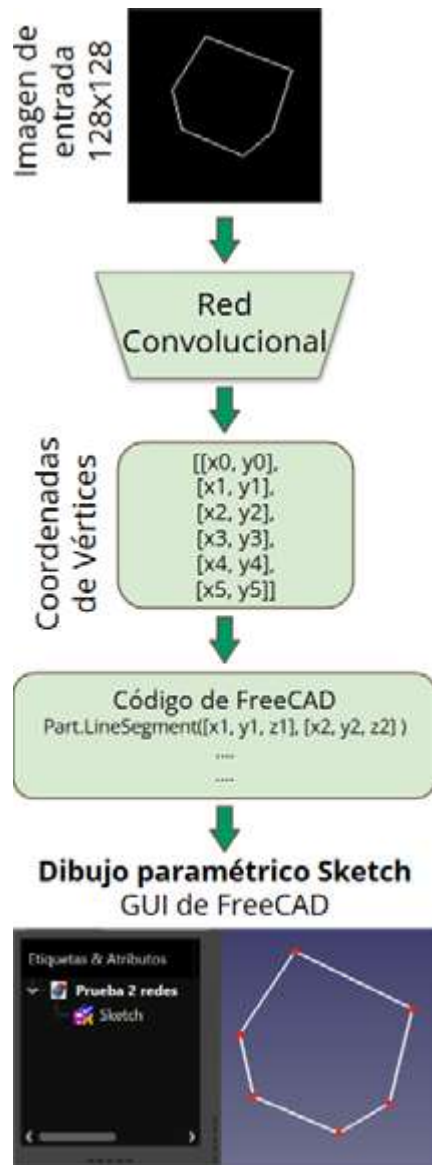


Figura 1. Proceso de reconstrucción de sketch, a partir de imágenes de contornos.

Se usan redes neuronales por su capacidad para procesar imágenes como se observa en [9] y [10], con este tipo de redes se pueden

extraer las coordenadas de los vértices como se describe más adelante. Las líneas rectas del contorno están definidas por pares de los vértices identificados. Con estas coordenadas se necesita generar un script que describa al sketch, este script va a contener el código para dibujar cada una de las líneas rectas del contorno. Este script o “sketch en forma de código” se puede ejecutar FreeCAD que es un software de diseño mecánico, lo cual generaría el sketch en la interfaz gráfica de FreeCAD, esto a su vez permite la completa edición del sketch.

2.1. Base de datos

La base de datos que se va a usar fue generada de forma sintética, por tres razones principales: primera las redes convolucionales requieren una gran cantidad de datos para entrenar, segunda la diversidad de formas en figuras solo compuestas por líneas es reducida, por lo general son rectángulos, tercera el tiempo para adquirir y procesar datos de figuras reales sería extenso y excede el alcance.

La base de datos se generó considerando limitaciones de equipo de cómputo y complejidad de análisis. Por esas razones el tamaño de las imágenes es pequeño de 128 x128 píxeles, de un solo canal (blanco y negro). Para simplificar el análisis se generan imágenes compuestas exclusivamente por líneas rectas, con un máximo de 6 líneas, de contorno cerrado, las líneas no se cortan, el formato es Gráficos de Red Portátiles (PNG por sus siglas en inglés).

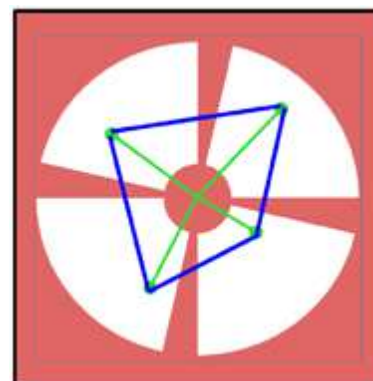


Figura 2. Ejemplo de 4 líneas o elementos, para la generación de la base de datos. En rojo se observa la zona restringida. En verde se

muestra la representación de las coordenadas polares, y en azul se muestra el contorno para generar la imagen.

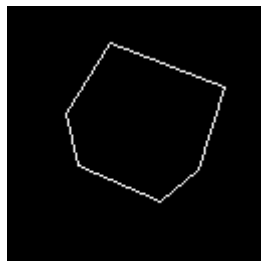


Figura 3. Ejemplo de una imagen generada de forma sintética, de 128 x 128 píxeles.

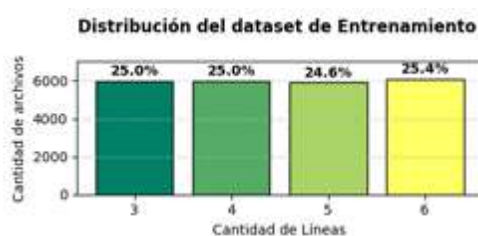


Figura 4. Distribución de clases en el dataset de Entrenamiento.



Figura 5. Distribución de clases en el dataset de Pruebas.

El procedimiento para generar la base de datos fue el siguiente, primero definir un número aleatorio entre 3 y 6 que va a determinar el número de elementos o líneas en el contorno, dependiendo el número de elementos se van a definir un número de áreas válidas para generar cada coordenada, esto con el fin de evitar que la líneas se corten entre sí y poder tener un contorno válido, se genera una coordenada polar mostrada en verde en la figura 2. Se genera dentro de los límites de ángulo y radio para cada sección, las zonas prohibidas se observan en color rojo en la figura 2. Posteriormente las coordenadas polares se convierten a cartesianas, las unidades son píxeles. Se unen los vértices

para generar el contorno que se muestra en azul en la figura 2. Ahora se crea la imagen del contorno, y se guarda el par de imagen y coordenadas con el mismo índice para poder hacer el emparejamiento.

La base de datos final consta de 30,000 pares de imágenes y coordenadas, de entre 3 y 6 líneas o elementos, de imágenes de 128 por 128 píxeles, con fondo en negro y las líneas en blanco, sin gradientes o tonos intermedios, en formato PNG. Se muestra un ejemplo en la figura 3.

La base de datos está dividida en 80, 20. Son 24,000 elementos para entrenamiento, y 6,000 para pruebas, en la figura 4, 5 respectivamente, se observa la proporción por cada clase o número de líneas, y podemos observar que no hay un desbalance de clases en ninguna de las divisiones ya sea entrenamiento o pruebas. En el entrenamiento a su vez se hace una división 80, 20, para entrenamiento y validación respectivamente.

Antes de entrenar se normalizan los valores de las imágenes (entradas), y de las coordenadas (salidas).

A continuación se muestra un ejemplo de coordenadas generadas con valores en píxeles las coordenadas son de la imagen mostrada en la figura 3.

```
[[ 94 82]
 [ 72 95]
 [ 35 79]
 [ 29 52]
 [ 53 16]
 [104 41]]
```

A continuación se muestran las mismas coordenadas pero normalizadas.

```
[[0.7421875, 0.6328125],
 [0.59375, 0.7578125],
 [0.2734375, 0.6171875],
 [0.2265625, 0.4140625],
 [0.3984375, 0.140625 ],
 [0.84375, 0.3125  ]]
```

La base de datos está disponible en el siguiente repositorio de github: <https://github.com/jonvg7/Dataset-Lines-Contour-Figures>

En este repositorio se encuentran dos archivos zip en uno están las imágenes y en el segundo están las coordenadas de los vértices de cada imagen, los archivos tienen el mismo índice para poder emparejarlos. Considerar que los datos no están preprocesados en el dataset.

Se recalca que la imágenes usadas no son una representación de un caso de uso real, tienen limitaciones como que son de tamaño fijo, que no tienen un ángulo respecto a la cara principal, que no tienen ruido o defectos propios de la adquisición entre otros.

2.2. Arquitectura Convolucional

Las convoluciones en redes neuronales fueron usadas por primera vez en [13] en 1989, básicamente la idea de una red convolucional es aplicar un núcleo o kernel, a la imagen de entrada, ese núcleo recorre la imagen para generar un mapa de características. Estos parámetros pueden variar, la cantidad de mapas de características y por lo tanto cambia también la cantidad de kernels, el tamaño de esos kernels puede cambiar, pero suele ser de 3x3.

Otra parte importante en las redes convolucionales es el “submuestreo” que se usa para reducir el tamaño de la imagen y reducir la carga de cálculo. Se probaron filtros de “submuestreo máximo” y de “submuestreo promedio” siendo los segundos los que mejor desempeño tuvieron.

Existen muchas arquitecturas de redes neuronales convolucionales, aquí se van a proponer nuevas arquitecturas relativamente pequeñas, comparadas por ejemplo con “LeNet-5” [13]. La necesidad de usar redes pequeñas es por la limitación del equipo de computo.

Se probaron diferentes arquitecturas, que se muestran en las tablas 1 y 2, están separadas en dos tablas para mostrarlas de forma más ordenada. Los hiperparámetros están mostrados en la tabla 3. Hay arquitecturas que son similares como las versiones 16, 17 y 18 pero con diferentes hiperparámetros.

Para poder describir y comparar las arquitecturas usadas, se propone la siguiente forma de describir las arquitecturas, las capas

de convoluciones se nombraron con una letra c, seguida por el número de capa o de convolución que es, luego un guión bajo y por último el número de filtros o mapas de características de esa capa convolucional.

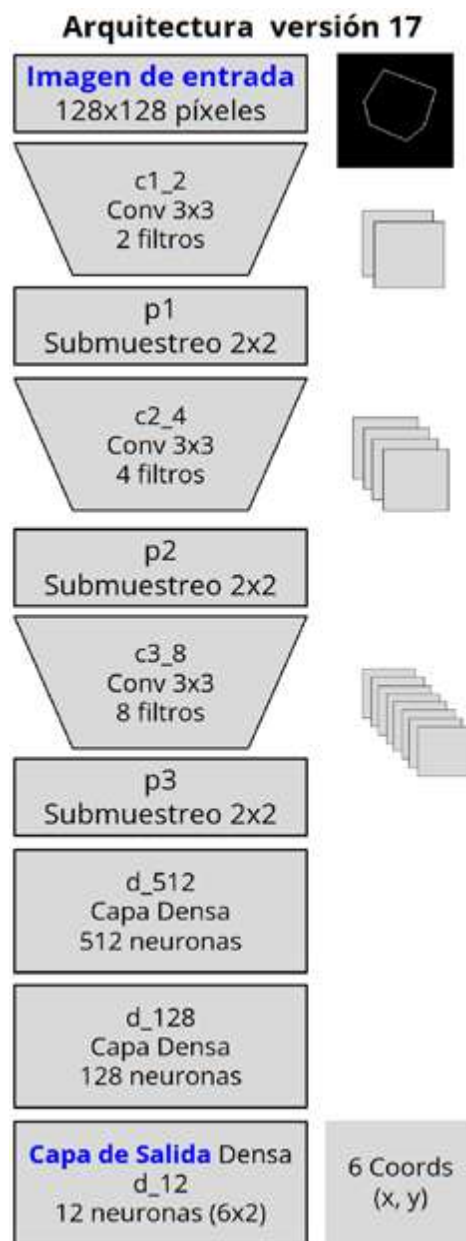


Figura 6. Arquitectura convolucional versión 17, usada para extracción de coordenadas de vértices.

Los siguientes hiperparámetros son iguales en todas las arquitecturas, el tamaño de kernel (3x3), “stride” o paso de 1, y la función de activación (ReLU). Estos hiperparámetros son ampliamente usados, como limitación del alcance del proyecto no se busca hacer comparaciones o variaciones de estos.

Por ejemplo en la arquitectura 17 tenemos “c3_128” esto significa que es la capa convolucional número 3, y que tiene 128 mapas de características.

Para las capas de “submuestreo”, se usó la letra p, seguida por el número de capa de “submuestreo” que es. Todas son de tipo “submuestreo promedio” de tamaño 2x2 y de paso o “stride” de 1.

De forma similar las capas densas o completamente conectas se describen con la letra “d” seguida del número de capa densa que es, luego separado por un guion bajo el número de neuronas. Todas las capas densas usan función de activación ReLU.

Se muestra en la figura 6, la arquitectura con mejor desempeño lo cual se muestra en la tabla 4 de métricas de evaluación. La arquitectura está descrita en la tabla 1, los hiperparámetros están descritos en la tabla 3.

Tabla 1. Arquitecturas usadas parte 1.

Versión	16	17	18	19
Capas	c1_2	c1_2	c1_2	c1_6
	p1	p1	p1	p1
	c2_4	c2_4	c2_4	c2_10
	p2	p2	p2	p2
	c3_8	c3_8	c3_8	c3_10
	p3	p3	p3	p3
	d1_512	d1_512	d1_512	d1_512
	d2_128	d2_128	d2_128	d2_128
	d3_12	d3_12	d3_12	d3_12

Tabla 2. Arquitecturas usadas parte 2.

Versión	21	22	op_2
Capas	c1_2	c1_2	c1_16
	c2_4	c2_4	p1
	p1	p1	c2_256
	c3_8	c3_8	p2
	c4_16	c4_16	c3_256
	p2	p2	p3
	c5_32	c5_32	c4_4
	c6_64	c6_64	p4
	p3	p3	c5_32
	d1_512	d1_512	p5
	d2_128	d2_128	d1_512
	d3_12	d3_12	d2_12

Para la función de pérdida se probaron tres, error absoluto medio (MAE por sus siglas en inglés), el error cuadrático medio (MSE por sus siglas en inglés), y error logarítmico cuadrático medio (MSLE por sus siglas en inglés). Estas funciones tienen diferentes propiedades y una de las más usadas es el MSE ya que penaliza errores grandes, a diferencia de MAE que es lineal.

Tabla 3. Hiperparámetros usados en las arquitecturas propuestas.

Ver	Función Pérdida	Épocas	Tamaño de lote
16	MAE	30	128
17	MAE	150	128
18	MSLE	150	128
19	MAE	100	128
21	MAE	150	128
22	MSE	150	128
op_2	MSE	150	32

2.3. Métricas de evaluación

Se van a usar 3 métricas de evaluación primeramente el error absoluto medio (MAE por sus siglas en inglés) ya que guarda relación con las unidades que se están midiendo, descrita en la ecuación 1, donde x_i es un valor objetivo o referencia, y_i son las predicciones, y n es el número de datos. Después para revisar qué tanto está desviado el error en cada una de las predicciones de forma individual, se usa la desviación estándar DS aplicado al error MAE, descrita en la ecuación 2, donde x_i es un valor del conjunto, en este caso el MAE de un dato individual, $\bar{x}$ es la media, en este caso el MAE global, y n es el la cantidad de datos. Ya que las coordenadas se van a usar para reconstruir el polígono o contorno de la pieza se usa la intersección sobre unión (IoU por sus siglas en inglés) que mide una relación entre los datos objetivo y la predicción, se calcula al dividir el área de intersección, entre el área unión. Si las áreas coinciden perfectamente se tiene un valor de IoU de 1, se describe en la ecuación 3, donde A es el área de la etiqueta o área objetivo, y B es el área de predicción.

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^n |y_i - x_i|}{n} \quad (1)$$

$$DS = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n}} \quad (2)$$

$$IoU = \frac{A \cap B}{A \cup B} \quad (3)$$

2.4. Técnicas de Optimización

Se probaron varias arquitecturas que se van a ir discutiendo, las primeras se fueron variando de forma empírica y se muestran en la tabla 1, y después se probaron dos técnicas de optimización por un lado se aumentó la profundidad, o el número de capas convolucionales de la red, siguiendo la estrategia usada en [14], donde se observa que al incrementar la profundidad de la red, en otras palabras aumentar las capas convolucionales, el rendimiento de la red mejora.

Probar de forma manual diferentes combinaciones de arquitecturas, consume mucho tiempo por lo que poder automatizar las pruebas y variaciones de redes es muy útil. Para eso se usó un método automatizado de optimización, usando la librería de optuna la cual fue publicada en [15], usando esta librería se exploró entre 1 y 5 capas convolucionales, variando los filtros desde 2 hasta 256 subiendo en potencias de 2, se mantiene constante el tamaño del kernel 3x3, la función de activación ReLU, y después de cada capa convolucional, se aplica “submuestreo promedio” de 2x2. También se varía entre 1 y 3 capas densas, de entre 64 a 512 neuronas que aumenta en potencias de 2.

En la tabla 2 se presentan arquitecturas a las que se les aplicaron optimizaciones por un lado la arquitectura 21 y 22 son pruebas de aumentar la profundidad de la red como se presentó en [14], y en el caso de la arquitectura op_2 se usó la librería de optuna presentada en [15].

La arquitectura op_2 es la mejor arquitectura que se pudo obtener en una corrida variando y probando algunas combinaciones de la cantidad de capas convolucionales, la cantidad de filtros, así como la cantidad de

capas densas y el tamaño de neuronas. No necesariamente es la arquitectura óptima variando esos hiperparámetros, ya que probar todas las posibles combinaciones es muy extenso y excede al alcance de este trabajo.

2.5. Materiales

El equipo para realizar la investigación, y el entrenamiento de las redes fue una laptop con procesador Ryzen 5 4500u, con 16 GB de memoria RAM, como entorno de desarrollo integrado se usó Visual Studio Code en su versión 1.104.0, la versión de python es 3.10.11, se trabajó en libretas de jupyter versión jupyterlab 4.4.2, tensorflow 2.19.0, numpy 2.1.3, matplotlib 3.10.3, scikit-learn 1.6.1, pygame 2.6.1, optuna 4.5.0, numpy-stl 3.2.0.

3. Resultados

Después de entrenar las redes propuestas en la tabla 1 y 2, se obtienen las coordenadas de los vértices, los valores de las coordenadas van de 0 a 1 pero se convierten a píxeles al multiplicarlos por 128, con estas coordenadas podemos reconstruir las figuras, como se muestra en la figura 7 y 8, ambos resultados son de la red versión 17. En la primera parte se muestran los valores de las coordenadas originales en azul, en la segunda parte se muestra la predicción en verde y por último la comparación entre ambas, los vértices se grafican en rojo lo que se muestra en la figura 9. En las figuras 7 y 8 se muestra en la parte inferior, la red que se usó, el índice del archivo, el error MAE y la métrica IoU.

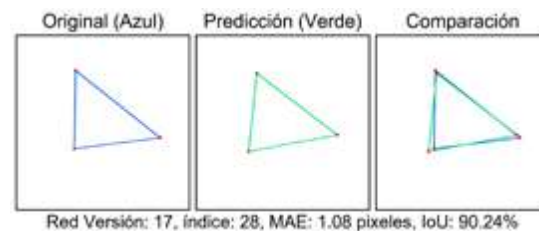


Figura 7. Reconstrucción de líneas, red v17. archivo 28. De izquierda a derecha, la primera en azul son las coordenadas originales, la segunda en verde es la predicción de la Red de las coordenadas, y la última es la comparación entre ambas.

De la comparación entre contorno original y

contorno de predicción mostrada en la figura 8, se presenta un zoom al error de predicción mostrado en la figura 9, donde se puede apreciar en rojo los vértices tanto originales como de predicción. En la figura 9 parte A, se aprecia que la predicción se alinea perfectamente con el original, mientras que en la figura 9 parte B, se aprecia un desfase de 1 pixel en el eje x, así como 1 pixel en el eje y.

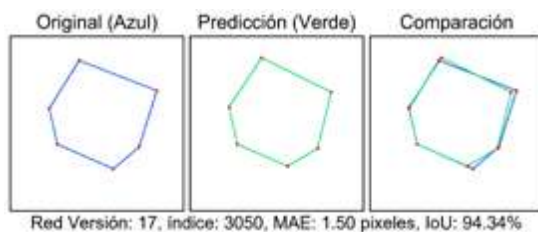


Figura 8. Reconstrucción de líneas, red v17 archivo 3050. De izquierda a derecha, la primera en azul son las coordenadas originales, la segunda en verde es la predicción de la Red de las coordenadas, y la última es la comparación entre ambas.

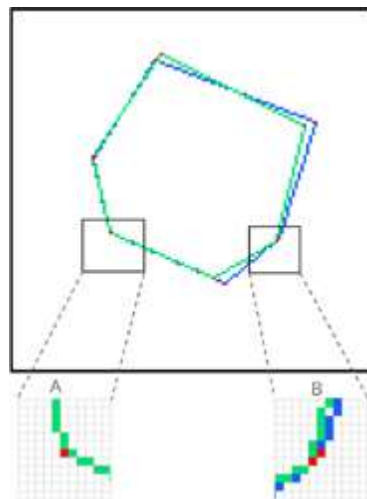


Figura 9. Zoom del desfase entre original en azul, y predicción en verde, en rojo se muestra los vértices de ambos contornos. Este es un zoom de la figura 8 pero en su tamaño de 128x128 para mostrar el desfase.

Para evaluar el rendimiento de las diferentes arquitecturas, se usan las métricas de MAE, IoU, y la desviación estándar DS pero aplicada al MAE para ver que tanto se varía el error MAE a lo largo del grupo de pruebas. Estos resultados junto con los hiperparámetros usados se muestran en la tabla 3. La tabla está ordenada de mayor a

menor según el error MAE. Siendo la arquitectura versión 17 la que tiene mejor desempeño, con el MAE menor y el IoU mayor. El MAE está en pixeles, el IoU es la proporción adimensional entre área de intersección y unión, la desviación estándar DS del error MAE está en pixeles.

Tabla 4. Métricas de evaluación de las redes. MAE en pixeles, IoU proporción adimensional, DS en pixeles. Resultados ordenados de peor a mejor del valor MAE.

Ver	MAE	IoU	Error DS
18	4.6625	0.7419	4.7719
16	4.0162	0.7699	4.1362
22	3.9634	0.7826	4.6866
op_2	3.6985	0.7378	3.8119
21	2.8938	0.856	4.5813
19	2.516	0.8505	3.1407
17	2.3303	0.8614	3.2693

Se muestra a continuación la distribución del error MAE de la arquitectura versión 17 en la figura 10, donde se puede ver, qué porcentaje de los archivos de prueba caen en cierto nivel de error, por ejemplo la primer barra son el 23.5% de los archivos de prueba con un error MAE entre 0 y 1 pixeles, la segunda barra que es el 45.6% tiene un error MAE entre 1 y 2, y así sucesivamente.

Para ejemplificar estos niveles de error, podemos observar las figuras 7, 8, 11 y 12. La figura 11, tiene un MAE de 0.75 pixeles, por lo que entraría en la primera barra 1 del 23.5% . Se ubica en un error entre 0 y 1.

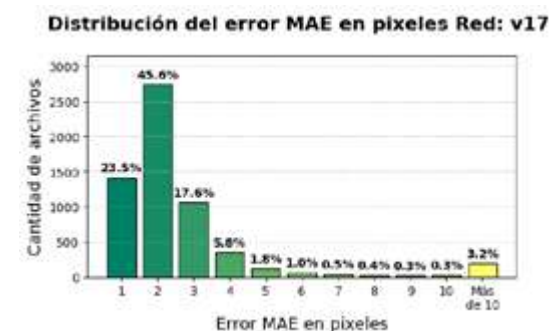


Figura 10. Distribución del error MAE, red 17.

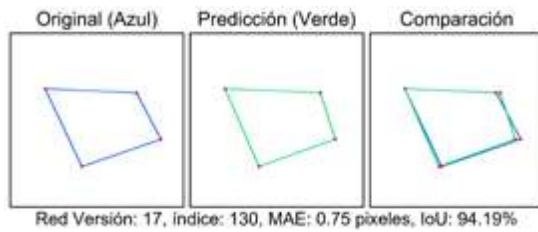


Figura 11. Error MAE de entre 0 y 1.

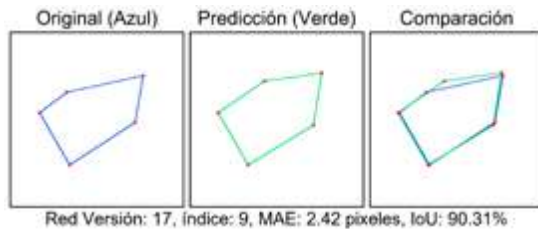


Figura 12. Error MAE de entre 2 y 3.

Las figura 7 y 8, tienen MAE de entre 1 y 2, por lo que caen en la barra 2, y representa el 45.6% de los archivos de prueba, y por último en la figura 12 se muestra un MAE de 2.42, lo que corresponde a la barra 3, de entre 2 y 3 de MAE, siendo el 17.6% de los datos.

Se considera de forma arbitraria, que hasta un error MAE de 3 píxeles de error, son buenos resultados. Si se suman los porcentajes de las primeras 3 barras tendremos un porcentaje de acierto “arbitrario” del 86.7%.

Por último con las coordenadas recuperadas se genera el código para describir cada una de las líneas rectas del contorno con la siguiente instrucción:

```
sketch.addGeometry(Part.LineSegment(App.Vector(94, -82, 0), App.Vector(72, -95, 0)), False)
```

Figura 13. Script en Python usando la librería de FreeCAD, que se usa para reconstruir el sketch. En otras palabras es el sketch en forma de código.

En la figura 13 vemos el script completo, que

es una representación del sketch en forma de código. Este código se ejecuta en FreeCAD para poder generar el sketch en la interfaz gráfica de usuario (GUI por sus siglas en inglés) como se ve en la figura 14, lo cual permite completa manipulación y edición del sketch. También en la figura 14 en la parte izquierda podemos ver cada una de las 6 líneas que componen al contorno, definidas como elementos del sketch.

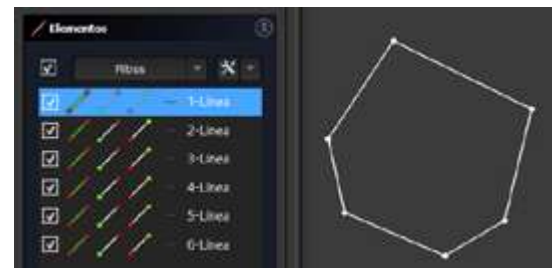


Figura 14. Sketch generado en la GUI de FreeCAD. Con el script mostrado en la figura 13 se genera el sketch mostrado. En la parte izquierda se muestran las 6 líneas rectas que componen al sketch. En la parte derecha se muestra la geometría o sketch generada. Todo esto en la GUI de FreeCAD.

4. Discusión

La reconstrucción del sketch de forma automática abre una gran cantidad de posibilidades, en varias aplicaciones como manufactura, diseño, refacciones, entre otras.

Comparar los resultados con trabajos previos es complicado porque como se menciona en la introducción no se tiene conocimiento de trabajos que sean iguales o que busquen reconstruir el sketch. Sin embargo se pueden realizar comparaciones usando la métrica de IoU por ejemplo los polígonos reconstruidos en [9] logran un IoU del 78%, mientras que los polígonos de [10] logran IoU de entre el 89.9% y 91.3%, por otro lado [12] logra entre 74% y 78% de IoU. Finalmente el enfoque propuesto en este trabajo logra IoU de 86.14% por lo que tiene un desempeño medio siendo superado solo por los resultados de [10], aunque como se menciona los datos de entrada y las salidas no son iguales por lo que estas comparaciones son solo una referencia, y no una comparación directa.

El trabajo actual tiene varias limitaciones restringidas por el tiempo, poder de cómputo y recursos. El trabajo se puede ampliar, por ejemplo, aquí se trabaja con contornos exclusivamente compuestos por líneas, en un trabajo futuro se puede ampliar las geometrías a arcos y a curvas paramétricas. El tipo de imágenes que se usan son sintéticas, se podrían adquirir imágenes reales, el problema sería encontrar los objetos y las complicaciones asociadas a la adquisición de fotos, como tiempo, almacenamiento, iluminación. Agregar operaciones volumétricas al sketch ayudaría a crear un archivo 3D primitivo.

En un trabajo futuro se podría expandir la optimización de hiperparámetros con optuna, usando un equipo con mayor capacidad de cómputo.

Se considera importante recalcar que los datos usados fueron generados de manera sintética por lo que hay limitaciones como que no tienen similitud con imágenes capturadas de piezas reales o que no tienen deformaciones o ruido de la adquisición. Para simplificar el análisis, se usaron imágenes de máximo 6 líneas rectas, esto limita los escenarios de aplicación del trabajo.

5. Conclusión

Si bien este trabajo usa datos sintéticos, lo cual limita su aplicación con imágenes de piezas reales, se considera que, la capacidad de reconstruir el sketch, como aquí se muestra, abre una gran cantidad de posibilidades y tiene mucho potencial, esto debido al amplio abanico de aplicaciones que tienes los archivos 3D de diseño mecánico.

Los resultados obtenidos están en el rango de desempeño de otros trabajos, el uso de técnicas de optimización ayudaron a mejorar el rendimiento, no se tiene registro de las horas empleadas en la pruebas empíricas contra las pruebas automatizadas, pero es definitivamente menor, si bien la versión op_02 queda por debajo de las otras redes, se acerca bastante y tal vez con mayor tiempo y capacidad de cómputo pueda incluso superar a la mejor red versión 17. Es muy interesante que la mejor red también sea la más pequeña.

Tal vez al ser imágenes pequeñas y tener entre 3 y 6 vértices objetivo, no sea tan necesario una red grande lo que hace que una red pequeña tenga un mejor desempeño ya que no tiene que ajustar tantos pesos.

Se considera muy importante la capacidad de reconstruir el archivo 3D de una pieza existente, o en el alcance de este trabajo reconstruir el dibujo paramétrico, tener acceso a estos archivos sin la necesidad de software específico, o del conocimiento de diseño pueda abrir la posibilidad a generar refacciones, adaptar piezas existentes, o corregir errores en la pieza que causaron fallas.

Si bien el alcance de este trabajo es limitado ya que no reconstruye el archivo 3D en su totalidad, sería interesante para otro trabajo buscar la forma de agregar operaciones volumétricas al sketch, o también abordar el problema de escanear y generar o analizar imágenes o archivos de mallas de polígonos de piezas ya existentes.

La reconstrucción del sketch y posteriormente del archivo 3D de diseño mecánico, tiene muchas aplicaciones: en manufactura, análisis de ingeniería, diseño de componentes, fabricación de refacciones, generación de prototipos entre otras. Por lo tanto el presente trabajo tiene mucho potencial en diversas aplicaciones.

Abreviaturas

Las siguientes abreviaturas se utilizan en este manuscrito:

CAD: Diseño asistido por computadora
STL: Lenguaje de triangulación estándar
MAE: Error medio absoluto
FEA: Análisis de elementos finitos
DS: Desviación Estándar
IoU: Intersección sobre union
PNG: Gráficos de Red Portátiles
ReLU: unidad lineal rectificada
GUI: Interfaz Grafica de Usuario

6. Referencias bibliográficas

- [1] F. Bianconi, "Bridging the gap between cad and cae using stl files,"

- International Journal of CAD/CAM, vol. 2, pp. 55–67, 01 2002.
- [2] K. B. Guo, L. C. Zhang, C. J. Wang, and S. H. Huang, “Boolean operations of stl models based on loop detection,” The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, vol. 33, p. 627–633, 06 2007.
 - [3] H. Park and K. H. Lee, “A new parametric control method for freeform mesh models,” The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, vol. 27, pp. 313–320, 2005.
 - [4] V. Sunil and S. Pande, “Automatic recognition of features from freeform surface cad models,” Computer-Aided Design, vol. 40, no. 4, pp. 502–517, 2008.
 - [5] W. Para, S. Bhat, P. Guerrero, T. Kelly, N. Mitra, L. J. Guibas, and P. Wonka, “Sketchgen: Generating constrained cad sketches”, “Advances in Neural Information Processing Systems, vol. 34, pp. 5077–5088, 2021.
 - [6] R. Wu, C. Xiao, and C. Zheng, “Deepcad: A deep generative network for computer-aided design models,” in Proceedings of the IEEE/CVF International Conference on Computer Vision, pp. 6772–6782, 2021.
 - [7] K. D. Willis, Y. Pu, J. Luo, H. Chu, T. Du, J. G. Lambourne, A. Solar-Lezama, and W. Matusik, “Fusion 360 gallery: A dataset and environment for programmatic cad construction from human design sequences”, ACM Transactions on Graphics (TOG), vol. 40, no. 4, pp. 1–24, 2021.
 - [8] L. Wang and X. Wang, “Ppi-net: End-to-end parametric primitive inference,” in Computer Graphics International Conference. Springer, pp. 67–78, 2023.
 - [9] Y. Chen, Y. Wu, L. Xu, and A. Wong, “Quantization in Relative Gradient Angle Domain For Building Polygon Estimation,” 2022 26th International Conference on Pattern Recognition (ICPR), Jan. 2021.
 - [10] S. Zorzi, Shabab Bazrafkan, S. Habenschuss, and Friedrich Fraundorfer, “PolyWorld: Polygonal Building Extraction with Graph Neural Networks in Satellite Images,” arXiv (Cornell University), Nov. 2021.
 - [11] E. Rosten and T. Drummond, “Machine Learning for High-Speed Corner Detection,” Computer Vision – ECCV 2006, pp. 430–443, 2006.
 - [12] N. Girard, D. Smirnov, J. Solomon, and Y. Tarabalka, “Polygonal Building Extraction by Frame Field Learning,” Thecvf.com, pp. 5891–5900, 2021.
 - [13] Y. Lecun, L. Bottou, Y. Bengio, and P. Haffner, “Gradient-based learning applied to document recognition,” Proceedings of the IEEE, vol. 86, no. 11, pp. 2278–2324, 1998.
 - [14] K. Simonyan and A. Zisserman, “Very Deep Convolutional Networks for Large-Scale Image Recognition,” arXiv.org, 2015.
 - [15] T. Akiba, S. Sano, T. Yanase, T. Ohta, and M. Koyama, “Optuna: A Next-generation Hyperparameter Optimization Framework,” Proceedings of the 25th ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery & Data Mining, Jul. 2019.

Análisis Estadístico de Puentes de la Red Federal de Carreteras en México

Statistical Analysis of Bridges of Mexico's Federal Highway Network

Pérez Dávila José F.^{1*}, Arjona Catzim Iván F.¹, Amézquita Sánchez Juan Pablo¹, Pérez Moreno L. Francisco¹

División de Investigación y Posgrado, Facultad de Ingeniería¹

Universidad Autónoma de Querétaro

Santiago de Querétaro, México

*josefr_dav@hotmail.com; ORCID: [https://orcid.org/0009-0003-3967-2250]**

Resumen: El análisis de bases de datos de puentes es una herramienta importante, que se usa para comprender la infraestructura vial y la toma de mejores decisiones en estrategias de conservación y mantenimiento. Este trabajo presenta un estudio estadístico, de los 9835 puentes de la red federal pavimentada libre de peaje en México, con información actualizada por la Secretaría de Infraestructura, Comunicaciones y Transportes (SICT) al día 24 de julio de 2025. La información dividida en archivos por estado en formato PDF fue recopilada, depurada y organizada en una base consolidada. Se analizaron variables como el número de claros, la longitud total, el ancho total, la altura libre promedio y tipo de obstáculo que cruzan los puentes. El análisis y tratamiento de los datos generó histogramas de frecuencias, gráficas circulares, diagramas de barras apiladas, mapas coropléticos y diagramas de dispersión. Estos permitieron identificar tendencias y patrones relevantes. Los resultados mostraron que la mayoría de los puentes son de un solo claro, con longitudes con rangos entre 10 y 20 m, anchos de 10 a 15 m y alturas libres promedio de 4 a 6 m. Asimismo, se identificó que los ríos y arroyos componen los obstáculos más frecuentes, mientras que el concreto reforzado y presforzado son los materiales predominantes. Este estudio constituye el primer análisis estadístico de la base de datos actualizada, aportando un panorama inédito de la infraestructura nacional y sirviendo como insumo para la gestión y conservación de puentes en México.

Palabras clave: EST; Puentes; Bases de Datos; Infraestructura; Conservación de carreteras; Análisis Estadístico

Abstract: The analysis of bridge databases is an important tool used to understand road infrastructure and to support better decision-making in conservation and maintenance strategies. This work presents a statistical study of the 9,835 bridges of Mexico's federal toll-free paved road network, with information updated by the Secretaría de Infraestructura, Comunicaciones y Transportes (SICT) on July 24, 2025. The data, divided into state-level PDF files, were collected, cleaned, and organized into a consolidated database. Variables such as number of spans, total length, total width, average clearance height, and type of obstacle crossed by the bridges were analyzed. Data processing generated frequency histograms, pie charts, stacked bar charts, choropleth maps, and scatter plots, which allowed the identification of relevant trends and patterns. The results showed that most bridges consist of a single span, with lengths ranging from 10 to 20 m, widths from 10 to 15 m, and average clearance heights between 4 and 6 m. It was also identified that rivers and streams are the most frequent obstacles, while reinforced and prestressed concrete are the predominant construction materials. This study represents the first statistical analysis of the updated database, providing an unprecedented overview of national infrastructure and serving as valuable input for the management and conservation of bridges in Mexico.

Keywords: Bridges; Databases; Infrastructure; Road Maintenance; Statistical Analysis

1. Introducción

Los puentes constituyen elementos esenciales en la infraestructura vial, al permitir la continuidad del transporte terrestre y garantizar la conectividad en situaciones ordinarias y de emergencia [1]. Aunque su función principal consiste en posibilitar el cruce de

obstáculos naturales o artificiales, su impacto trasciende lo meramente funcional: estas estructuras poseen un valor social, cultural y económico significativo, al contribuir a la consolidación de asentamientos humanos y al desarrollo de las naciones [2]. Un ejemplo histórico se observa en las ciudades latinoamericanas fundadas durante el virreinato, donde la construcción de puentes fue determinante para conectar urbes establecidas a

orillas de ríos caudalosos con sus poblados circundantes [3].

En las últimas décadas, diversos países han avanzado en la recopilación, organización y análisis de bases de datos de puentes. Ejemplos relevantes incluyen estudios sobre la publicación de bases de datos, de hasta 751 puentes de claros largos a nivel mundial, principalmente en Estados Unidos, China y Noruega, las cuales proporcionan información valiosa sobre el monitoreo estructural [4].

También se han realizado investigaciones sobre desempeño de materiales y deficiencias estructurales [5], y el análisis estadístico del Inventario Nacional de Puentes (*NBI*, por sus siglas en inglés) en Estados Unidos, mediante técnicas de minería de datos y métodos avanzados [6,7].

Asimismo, se han desarrollado modelos dinámicos simplificados, para la evaluación rápida sobre la vulnerabilidad sísmica, a través de bases de datos de los Departamentos del Transporte (*DOT* por sus siglas en inglés) en Estados Unidos, permitiendo una identificación eficaz de los puentes más vulnerables a eventos sísmicos en una red de puentes, lo cual sirve para tomar acciones como el mantenimiento o la rehabilitación [8].

Además, en Europa se han creado bases de datos relacionales, las cuales pueden usarse para la digitalización a gran escala de la operación y gestión de puentes, modelándolos como archivos de Modelado de la Información de la Construcción (*BIM*, por sus siglas en inglés), y catalogado de datos en Sistemas de Información Geográfica (*GIS* por sus siglas en inglés), para el mantenimiento o monitoreo de estas estructuras [9].

En Irlanda del Norte, el análisis de más de 3500 puentes en arco ha permitido identificar tendencias de deterioro y generar información estratégica para la gestión estructural [10].

El análisis de estas bases de datos ha demostrado su utilidad para la identificación de patrones de deterioro, la priorización de mantenimientos y la toma de decisiones en políticas de infraestructura. Sin embargo, en México no existía hasta ahora un análisis estadístico integral de los puentes de la red federal pavimentada libre de peaje. El 24 de julio de 2025, la SICT actualizó y publicó la base nacional de puentes, que comprende un total de 9835 estructuras distribuidas en los 31 estados y la Ciudad de México [11].

La presente investigación constituye un esfuerzo pionero por sistematizar y analizar de manera estadística esta información recién publicada. El objetivo general fue identificar tendencias, distribuciones y relaciones en variables clave de los puentes —número de claros, longitud total, ancho total, altura libre promedio y tipo de obstáculo cruzado— a partir de gráficos descriptivos y comparativos. Los objetivos específicos incluyeron: (i) caracterizar los puentes mediante histogramas de sus dimensiones principales, (ii) clasificar y cuantificar los tipos de obstáculos cruzados, (iii) evaluar diferencias regionales a través de mapas coropléticos y diagramas de barras, y (iv) explorar relaciones entre variables mediante diagramas de dispersión. Asimismo, este estudio se alinea con los Objetivos de Desarrollo Sostenible de la ONU, en particular con el ODS 9, que busca construir infraestructuras resilientes, impulsar la industrialización inclusiva y sostenible, y fomentar la innovación [12].

2. Materiales y métodos

Se recopilaron los 31 archivos en formato PDF disponibles en el portal de la SICT [11], correspondientes a cada estado de la república mexicana. Dichos archivos contenían listas con información de los puentes: nombre, carretera y kilómetro de localización, número de claros, longitud total (m), ancho total (m), altura libre promedio (m, dividida en cuatro secciones: izquierdo, izquierdo medio, derecho medio y derecho) y obstáculo cruzado.

Los documentos fueron importados y depurados en Microsoft Excel (versión 365). La depuración incluyó la estandarización de formatos numéricos y textuales, así como la validación cruzada del número de registros por estado contra la fuente oficial.

Asimismo, se identificaron valores atípicos en tres variables estructurales de los puentes registrados. En el caso de la longitud, dos puentes presentaron registros inconsistentes (uno con valor de 0 metros y otro sin dato), lo que representa el 0.02% del total. En cuanto al ancho total, se detectaron siete casos con valores de 0 o vacíos (0.07%). Finalmente, en la altura libre, se encontraron 95 registros atípicos con valores nulos o igual a cero (0.97%). Dado que estos porcentajes son bajos en relación con la población total, se optó por considerar dichos valores como cero para efectos del análisis estadístico. Este tratamiento mantiene la integridad del conjunto de datos. En estudios posteriores se recomienda aplicar métodos de imputación o depuración de datos faltantes.

El total de la base consolidada fue de 9835 puentes.

Posteriormente, se aplicaron procedimientos estadísticos descriptivos:

Frecuencias absolutas y relativas

$$f_i = \frac{n_i}{N} \times 100 \quad (1)$$

donde f_i es la frecuencia relativa (en porcentaje), n_i es el número de observaciones de la clase i , y N el total de observaciones.

Promedios por estado y categoría

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (2)$$

Empleados para calcular la altura libre promedio por cada puente, y por cada tipo de obstáculo.

Además del valor promedio, se aplicaron indicadores de variabilidad a las variables dimensionales de los puentes, para ello se hizo uso de los siguientes recursos estadísticos:

Desviación estándar poblacional

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \mu)^2} \quad (3)$$

donde:

σ : desviación estándar poblacional.

N : número total de observaciones.

x_i : valor individual.

μ : media de todos los valores.

Percentiles

Dado un conjunto de datos ordenados $x_1, x_2, \dots, x_N$, el percentil $k(P_k)$ se calcula mediante:

$$P_k = x_{\left(\frac{k}{100}(N-1)+1\right)} \quad (4)$$

donde:

P_k : valor del percentil.

k : posición del percentil (ej. 25, 50, 75).

N : número total de observaciones.

x_i : valor del dato de la posición i dentro de los datos ordenados de menor a mayor.

Diagramas de dispersión en escala logarítmica

$$X' = \log_{10}(X), \quad Y' = \log_{10}(Y) \quad (5)$$

Para facilitar la visualización en datos con alta dispersión.

Los gráficos generados incluyeron:

1. Histogramas de número de claros, longitudes, anchos y altura libre promedio.
2. Gráfico circular de tipos de obstáculos cruzados, en porcentaje.
3. Barras apiladas por tipo de obstáculo y tipo de red, agrupados por estado.
4. Mapa coroplético del número de puentes por estado y altura libre promedio.
5. Barras horizontales de los diez estados con mayor número de puentes.
6. Barras 3D por materiales empleados en la construcción de puentes.
7. Diagramas de dispersión de la relación entre longitud y ancho.

Los recursos empleados fueron: computadora personal con sistema operativo Windows 11, Microsoft Excel 365, acceso a internet y a la base de datos oficial de la SICT [11].

3. Resultados y discusión

A continuación, se presentan los hallazgos principales del análisis de los 9835 puentes, de la red federal pavimentada libre de peaje en México.

Distribución del número de claros

Los resultados muestran que 4732 puentes constan de un solo claro (Fig. 1). Esto representa aproximadamente el 48% de los puentes. Se observa que la frecuencia descende conforme aumenta el número de claros, confirmando prevalencia de topologías sencillas asociadas a la necesidad de cruzar obstáculos de pequeña a mediana longitud.



Figura 1. Distribución de puentes por número de claros

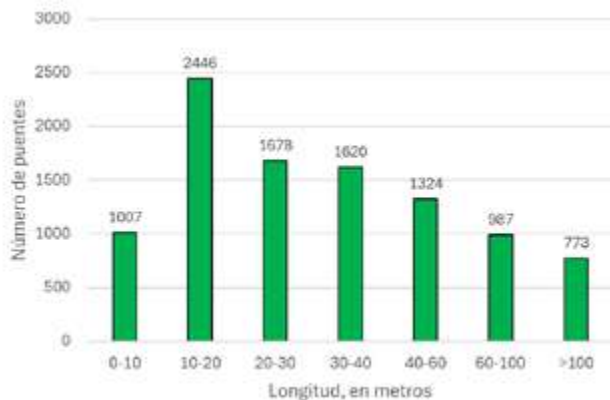


Figura 2. Distribución de puentes por longitud total

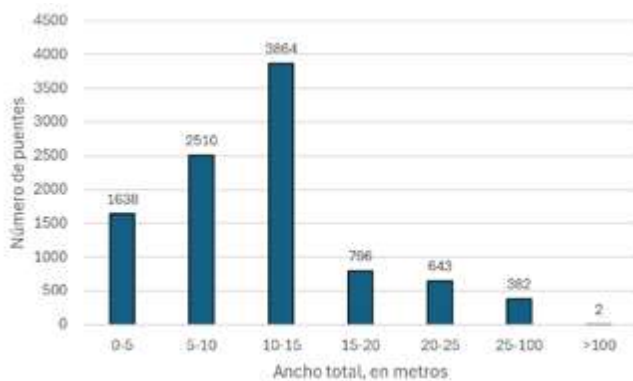


Figura 3. Distribución de puentes por ancho total

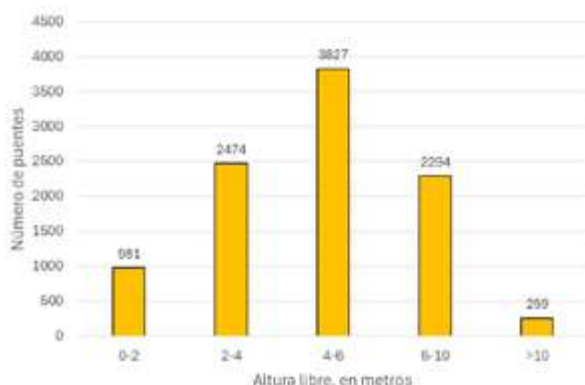


Figura 4. Distribución de puentes por altura libre promedio

Longitud total

Los resultados arrojaron que 2446 puentes tienen longitudes entre 10 y 20 metros (Fig. 2), representando aproximadamente el 25% del total. Se observa también que puentes con longitudes entre 20 y 30 metros, y entre 30 y 40 metros, representan en conjunto una tercera parte del total de los puentes. También, cabe recalcar que solo el 8% tienen longitudes mayores a 100 metros.

Por otra parte, se tiene un promedio de longitud de 44.52 m y una desviación estándar de ± 70.64 m. Además, el 25% de los puentes tiene una longitud menor o igual a 15.3 m, el 50% está por debajo de 28 m, lo que indica que la mitad de los puentes son relativamente cortos, y el 75% mide menos de 47.6 m.

Ancho total

La Fig. 3 muestra que 3864 tienen anchos totales entre 10 y 15 metros, esto es aproximadamente el 39% y a su vez la mayoría del total. Asimismo, a medida que aumenta la longitud total la frecuencia tiende a disminuir. Esto coincide con las secciones transversales típicas de puentes en carreteras federales, las cuales tienen de dos a cuatro carriles. Los casos que muestran longitudes y anchos mayores corresponderían a puentes ubicados en zonas estratégicas.

El promedio es de 11.35 m, con una desviación estándar de ± 7.95 m. Asimismo, se obtuvo que el 25 % de los puentes tienen un ancho menor o igual a 8 m, 50% tienen anchos de menores a 10 m, y el 75% presentan anchos menores a 13 m.

Altura libre promedio

El análisis de los espacios libres debajo del puente mostró una concentración de aproximadamente el 39% en el rango de 4 a 6 metros (Fig. 4), esto coincide con normativa vigente para la proyección de puentes, la cual menciona que el gálibo vertical mínimo debe ser de 5.50 metros [12].

La altura libre promedio de los puentes presenta un valor medio de 4.83 m, con una desviación estándar de ± 2.74 m, con percentiles $P25 = 3$ m, $P50 = 5$ m y $P75 = 6$ m, lo que muestra una concentración de valores en rangos medios y una dispersión moderada.

Obstáculos cruzados

La Fig. 5 mostró que los ríos y arroyos son el tipo de obstáculo más frecuente, seguido de los pasos peatonales y las carreteras SICT y no SICT. Estos representan aproximadamente el 93% del total de obstáculos.

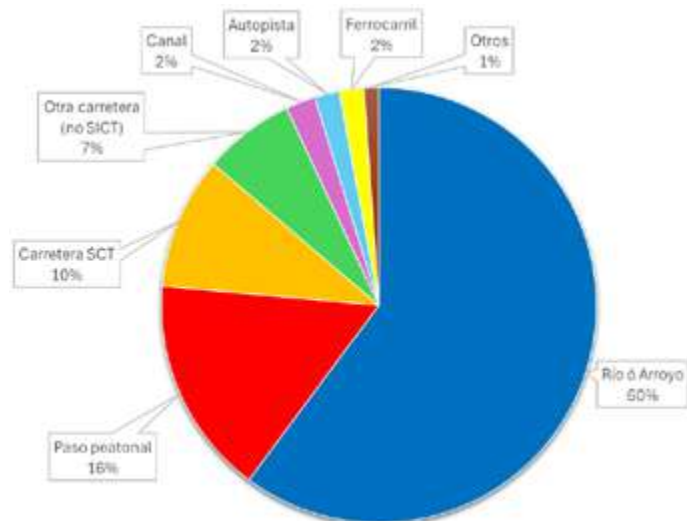


Figura 5. Tipo de obstáculos que cruzan los puentes

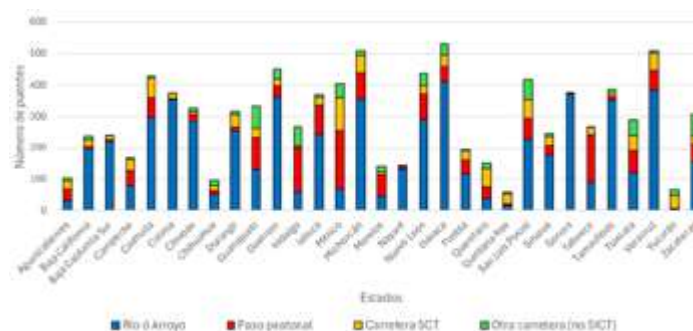


Figura 6. Puentes por estado según tipo de obstáculo

En la Fig. 6 se muestra la distribución de puentes por estado, clasificados por tipos de obstáculos más comunes de acuerdo con la Fig. 5. Se puede observar que en la mayoría de los estados predominan los puentes que cruzan ríos o arroyos. Estados como Michoacán, Oaxaca, Veracruz y Guerrero destacan por tener una mayor cantidad de puentes. Aunque los cruces sobre carreteras y pasos peatonales son menos frecuentes, aparecen de manera constante en la mayoría de los casos. En estados como Guanajuato, Hidalgo, México y Tabasco se observa una mayor presencia de puentes que cruzan pasos peatonales.

Tipo de red de carretera

En la Fig. 7 se observa que el 39% de los puentes pertenecen a la red básica de carreteras, lo que muestra su papel esencial en la conectividad nacional. Por otro lado, los corredores son los más relevantes, representando un 33% del total de puentes y siendo los principales ejes logísticos del país.

Por otro lado, en la Fig. 8, se aprecia como en la mayoría de los estados, la red básica y corredor representan la mayor parte de los puentes. Sin embargo, destacan estados como Baja California, Chihuahua, Durango y Oaxaca, en donde la red secundaria es la que predomina.

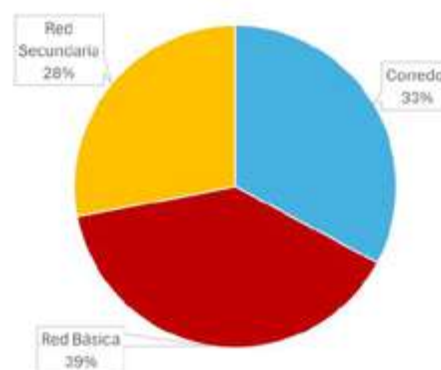


Figura 7. Puentes clasificados por tipo de red de carretera

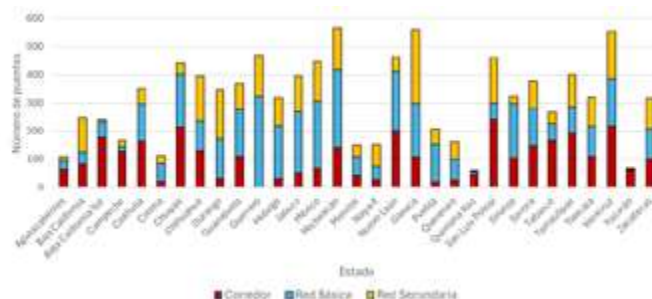


Figura 8. Puentes por estado, según tipo de red

Variabilidad regional

El mapa coroplético (Fig. 9), con la cantidad de puentes por estado mostró una mayor concentración en Michoacán, Oaxaca, Veracruz y Guerrero, en contraste con estados como Colima, Aguascalientes, Yucatán y Quintana Roo.

Este patrón coincide con la distribución hidrográfica y poblacional del país [13, 14], confirmando la relación entre infraestructura, geografía y conectividad territorial.

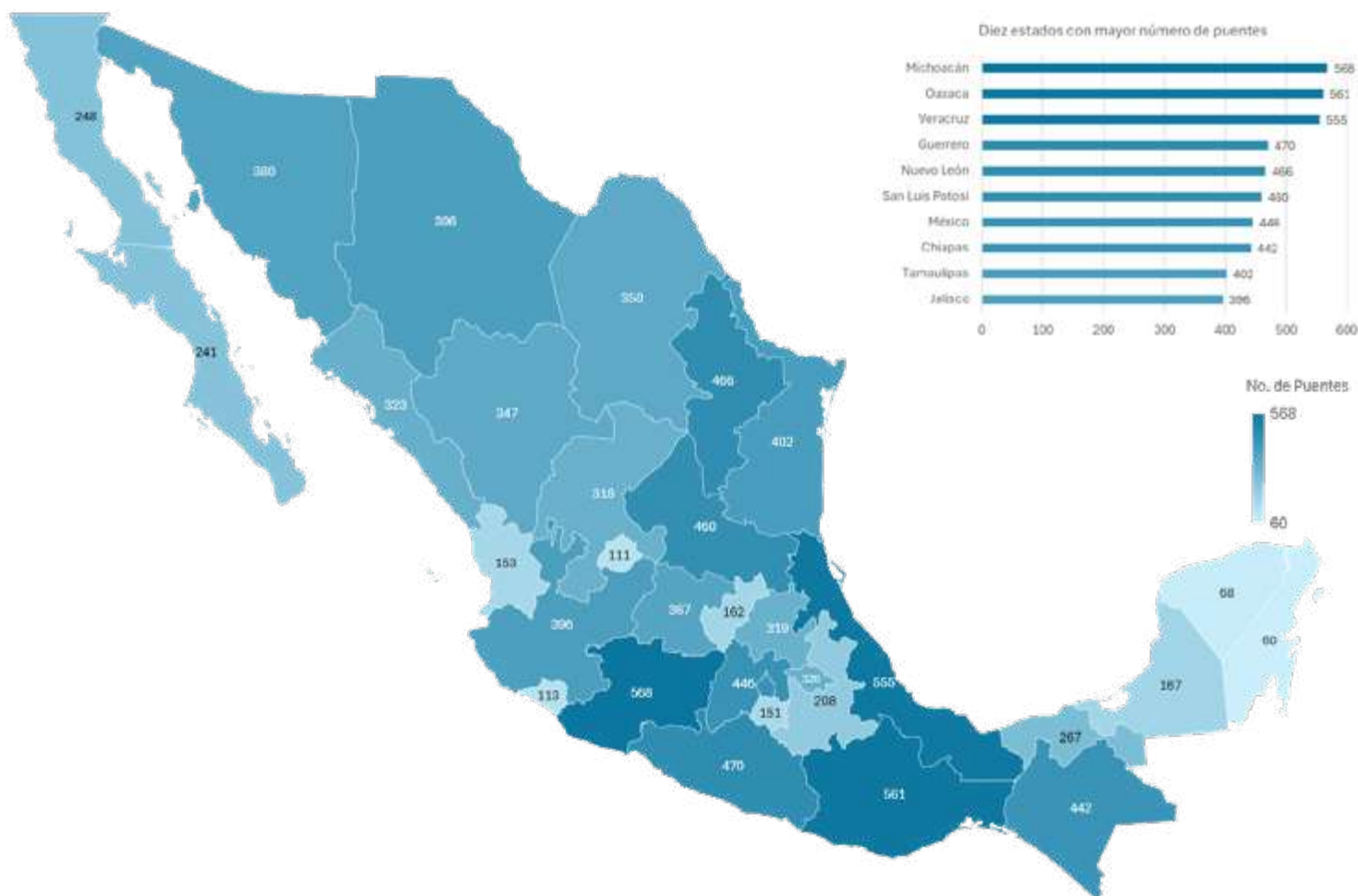


Figura 9. Distribución de puentes por estado

Materiales constructivos

El análisis de materiales (Fig. 10), con los que están construidas las superestructuras de los puentes, arrojó que aproximadamente el 85% están construidas en concreto reforzado o presforzado, mientras que la combinación de acero y concreto, solo acero, mampostería, sistemas de tridilosa, y aluminio, presentan proporciones menores. Esto confirma la estandarización de prácticas constructivas en México, y se alinea con tendencias internacionales de favorecer el concreto como material predominante en redes de carreteras nacionales [15], principalmente por el buen desempeño de los tipos de secciones transversales empleadas, tales como las trabes AASHTO, o tipo cajón.

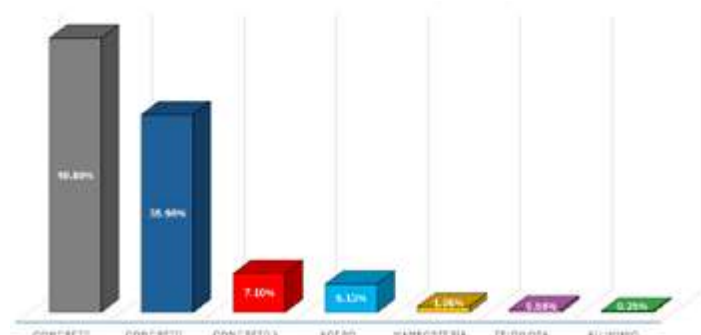


Figura 10. Distribución de puentes por tipo de materiales en la superestructura

Altura libre promedio por entidad federativa

El mapa coroplético de la Fig 11, muestra la altura libre promedio por entidad federativa. Se observa que los valores oscilan en un rango de 4.17 a 5.53 metros, por lo que existe cierta homogeneidad relativa.

Las mayores alturas libres promedio se encuentran en estados como Morelos (5.53 m), Baja California Sur (5.38 m) y Yucatán (5.31 m), lo cual puede estar asociado con topografía accidentada o la necesidad de salvar cauces profundos.

Las alturas intermedias se localizan en estados como Hidalgo, Puebla, Veracruz y Oaxaca, en los cuales se muestran valores cercanos a los 5.0 m, indicando condiciones mixtas de relieve.

Las menores alturas se encuentran en zonas planas como Aguascalientes (4.38 m) y zonas costeras como Tabasco (4.17 m).

Sin embargo, si la información se analiza en conjunto con la Fig. 9, se puede observar que estados con mayor altura libre promedio como Yucatán, con valores de 5.31 metros, se ven influenciados directamente por el número de puentes. En este caso, Yucatán cuenta únicamente con 68 puentes, lo que puede generar un sesgo en el promedio.

Por lo que estados con mayor número de puentes presentan valores más equilibrados y estadísticamente representativos, al integrar tanto cruces de menor como puentes de mayor altura.



Figura 11. Altura libre promedio por entidad federativa, en metros.

Relación entre altura libre promedio y tipo de obstáculo

En la Fig. 12 se observa que los puentes que cruzan ferrocarriles y obstáculos clasificados como “No aplicable” presentan las mayores alturas libres (o espacios libres debajo del puente) promedio, con valores de 7.11 y 6.68 metros respectivamente, esto puede deberse a exigencias normativas [12] y/o a la geometría del cruce.

A estos le siguen los puentes sobre autopistas (6.08 m) y pasos peatonales (5.72 m), los cuales requieren gálibos superiores por seguridad y funcionalidad.

Por otro lado, los puentes que cruzan canales y ríos/arroyos, muestran valores menores, lo cual respondería a la altura necesaria para atravesar este tipo de cruces en gran parte del país. Por lo que la altura libre depende directamente del tipo de obstáculo cruzado y los requerimientos de seguridad asociados.

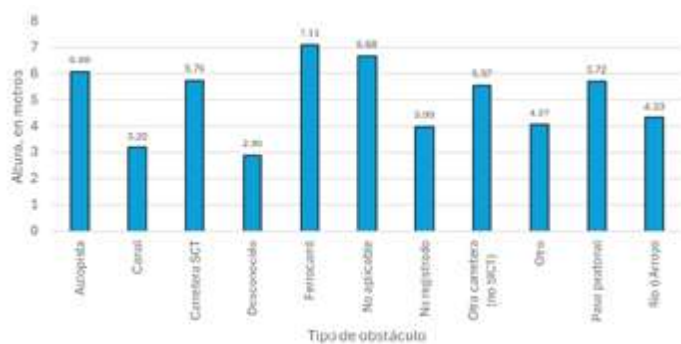


Figura 12. Altura libre promedio por tipo de obstáculo

Longitud y ancho total

En la Fig. 13 muestra que la mayoría de los puentes se concentran en longitudes entre 10 y 100 m, con anchos entre 8 a 20 m. Se observa una dispersión moderada, con algunos casos no tan comunes, que superan los 100 metros de ancho o más de 1,000 metros de longitud.

No se aprecia una correlación fuerte entre longitud y ancho, ya que existen puentes muy largos con anchos reducidos, y viceversa. Reflejando que el ancho no necesariamente depende de la longitud, más bien este está en función de las necesidades del obstáculo a cruzar, así como del volumen del tráfico que deben manejar.

La topología más común son puentes cortos y medianos, con anchos entre 10 y 15 metros, tal como se observó en la Fig.3

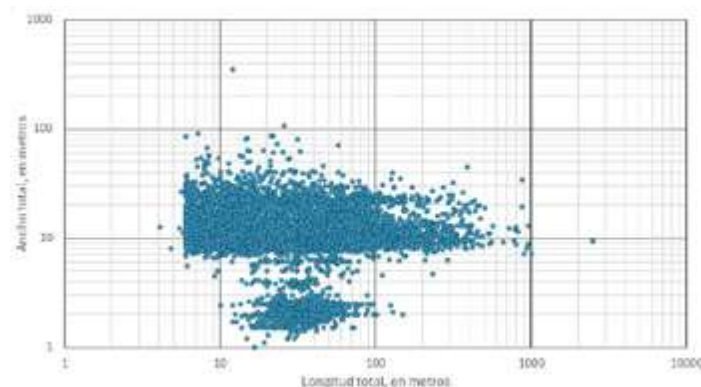


Figura 13. Relación entre longitud y ancho total

Longitud y altura libre promedio

La Fig. 14 muestra una concentración de datos predominante, la cual está en longitudes entre 10 y 100 m, y alturas libres promedio entre 2 y 10 m. Existiendo una tendencia positiva leve: conforme la longitud aumenta, la altura libre promedio tiende a crecer.

Los valores extremos, representando puentes muy largos con gran altura libre, corresponden a cruces sobre ríos o arroyos caudalosos, barrancas o zonas de topografía accidentada.

Por lo que, la altura libre se ve más condicionada por la naturaleza del obstáculo que por la longitud del puente, aunque en general los puentes más largos requieren mayores alturas libres.

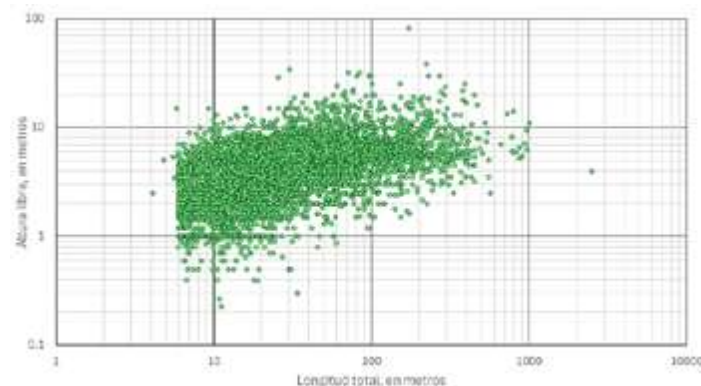


Figura 14. Relación entre longitud total y altura libre promedio

4. Conclusión

El presente trabajo estableció el primer análisis estadístico integral registrado hasta la fecha, de la base de datos de los 9,835 puentes, los cuales pertenecen a la red federal pavimentada libre de peaje en México. Dicha información fue publicada por la Secretaría de Infraestructura, Comunicaciones y Transportes, a través de la Dirección General de Conservación de Carreteras (DCGG), en julio de 2025.

Los resultados mostraron que casi la mitad de los puentes constan de un solo claro, la mayoría tiene longitudes con rangos entre 10 y 20 metros, anchos entre 10 y 15 metros, y espacios libres verticales entre 4 y 6 metros. Del mismo modo, se observó que los ríos y arroyos son los tipos de obstáculos que se cruzan con mayor frecuencia, y que los materiales más comunes en la construcción de las superestructuras de los puentes son el concreto reforzado y presforzado.

Por otro lado, se encontró un patrón en la localización geográfica de los puentes, el cual guarda correspondencia con la distribución poblacional e hidrográfica del país.

Además, no se encontró relación directa entre la relación entre variables geométricas como la longitud y el ancho tota, sin embargo, mostró que una gran cantidad de puentes constan de longitudes entre 10 y 100 metros, con anchos entre 8 y 20 metros. A diferencia de variables como la longitud total y la altura libre promedio, en la cual se encontró una tendencia positiva leve, ya que conforme aumenta la longitud, la altura libre también aumenta. Sin embargo, esta última variable depende más del tipo de obstáculo a cruzar, siendo los ferrocarriles y autopistas los que requieren de mayor altura, debiéndose generalmente a exigencias normativas.

Este análisis adquiere relevancia al reunir, por primera vez, datos consolidados y organizados a escala nacional, facilitando la toma de decisiones en torno a la gestión de recursos, una planificación más eficiente de nuevas infraestructuras y la priorización de tareas de monitoreo y mantenimiento. Adicionalmente, los resultados obtenidos aportan valor como insumo para futuras investigaciones orientadas a la vulnerabilidad, monitoreo estructural, y desarrollo de modelos predictivos dentro del sistema de gestión de activos viales.

Entre las principales limitaciones del estudio se encuentran: (i) la dependencia de la calidad de los registros originales de la SICT, que pueden contener errores de captura o actualización; (ii) la falta de inspecciones visuales que complementen los datos geométricos; y (iii) la ausencia de variables estructurales como año de construcción, tipo de apoyo o estado de conservación, que limitaron el alcance analítico. Sin embargo, estos factores no afectan las tendencias generales identificadas.

Finalmente, este estudio se alinea con los Objetivos de Desarrollo Sostenible de la ONU, particularmente con el ODS 9, orientado a construir infraestructuras resilientes, impulsar la industrialización inclusiva y sostenible, y fomentar la innovación. La disponibilidad y análisis de esta

base de datos contribuye de manera directa a dichos objetivos, al fortalecer la planificación estratégica de la conservación y modernización de la infraestructura carretera en México.

Conflictos de interés

Los autores declaran que no existen conflictos de interés.

Agradecimientos

Los autores agradecen a la Secretaría de Ciencias, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI) por los recursos otorgados mediante la beca de estudios de posgrado a nivel nacional. Asimismo, expresamos nuestro profundo agradecimiento a la Universidad Autónoma de Querétaro, así como a la Facultad de Ingeniería División Posgrado, por la formación que estamos recibiendo y por considerarnos en nuestra participación en actividades de carácter científico.

Abreviaturas

Las siguientes abreviaturas se utilizan en este manuscrito:

AASHTO: American Association of State Highway and Transportation Officials

DGCC: Dirección General de Conservación de Carreteras

ODS: Objetivos de Desarrollo Sostenible

ONU: Organización de las Naciones Unidas

SICT: Secretaría de Infraestructura, Comunicaciones y Transportes

5. Referencias bibliográficas

- [1] M. Shokri and K. Tavakoli, "A review on the artificial neural network approach to analysis and prediction of seismic damage in infrastructure," *EasyChair Preprint*, vol. 2754, Feb. 2020.
- [2] S.-P. Chang and J. F. Choo, "Values of bridge in the formation of cities," *IABSE Symposium Report*, pp. 25–46, 2009.
- [3] D. Bühler, "La construcción de puentes en ciudades virreinales y su impacto en la estructura social y urbana," *Boletín de Monumentos Históricos*, 3rd Epoch, no. 16, pp. 142–154, 2009.
- [4] C. Caprani and J. De Maria, "Long-span bridges: Analysis of trends using a global database," *Structure and Infrastructure Engineering*, vol. 16, no. 1, pp.

- 219–231, 2019.
- [5] D. N. Farhey, “Performance of bridge materials by structural deficiency analysis,” *Journal of Performance of Constructed Facilities*, vol. 24, no. 4, 2010.
- [6] M. Radovic, O. Ghonima, and T. Schumacher, “Data mining of bridge concrete deck parameters in the National Bridge Inventory by two-step cluster analysis,” *ASCE-ASME Journal of Risk and Uncertainty in Engineering Systems, Part A: Civil Engineering*, vol. 3, no. 2, 2016.
- [7] S. B. Chase, C. Nutakor, and E. P. Small, “An in-depth analysis of the national bridge inventory database utilizing data mining, gis and advanced statistical methods,” Jan. 1999, [Online]. Available: <https://trid.trb.org/view/500549>.
- [8] L. Bonthron, C. Beck, A. Lund, X. Zhang, Y. Cao, S. J. Dyke, J. Ramirez, G. P. Mavroeidis, P. Baah, and J. Hunter, “Database-enabled rapid seismic vulnerability assessment of bridges,” *Transportation Research Record*, vol. 2675, no. 12, pp. 1106–1120, 2021.
- [9] L. Pallante, P. Meriggi, F. D’Amico, V. Gagliardi, A. Napolitano, F. Paolacci, G. Quinci, M. Lorello, D. Felice, and G. Gianmarco, “An integrated data-driven system for digital bridge management,” *Buildings*, vol. 14, no. 253, 2024.
- [10] K. Campbell, M. Lydon, N.-A. Stevens, and S. Taylor, “Analysis of arch bridge condition data to identify network-wide controls and trends,” *Infrastructures*, vol. 9, no. 70, 2024.
- [11] Secretaría de Infraestructura, Comunicaciones y Transportes (SICT), “Puentes de la red federal de carreteras,” Dirección General de Conservación de Carreteras, Jul. 24, 2025. [Online]. Available: <https://micrs.sct.gob.mx/infraestructura/direccion-general-de-conservacion-de-carreteras>
- [12] Secretaría de Comunicaciones y Transportes, “N-PRY-CAR-6-01-002/21-Proyectos de nuevos puentes y estructuras similares,” *Subsecretaría de Infraestructura, PRY Proyecto*, Ciudad de México, 2021, p. 10.
- [13] L. E. Maderey-R. and C. Torres-Ruata, *Hidrografía*. Mexico City, Mexico: Instituto de Geografía, UNAM, 1990.
- [14] Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), *Estadísticas del Agua en México 2023*. Mexico City, Mexico: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2024.
- [15] Precast Concrete Institute of Illinois & Wisconsin, “PCI of Illinois and Wisconsin,” 2025. [Online]. Available: <https://www.pci.org/PCIIW>

Esponja mesoporosa de sílice funcionalizada con grupos mercapto para adsorción de iones de mercurio (II)

Mesoporous silica sponge functionalized with mercapto groups for the adsorption of mercury (II) ions.

Laura A. Ruelas¹, Nava Mendoza Rufino^{1*}, Cuán Hernández María de los Ángeles¹, Peza Ledesma Carmen Leticia²

1 Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Querétaro, Santiago de Querétaro, México

2 Centro de Física Aplicada y Tecnología Avanzada, Universidad Nacional Autónoma de México, Querétaro, México

lruelas07@alumnos.uaq.mx, rufino@uaq.mx ; ORCID: [<https://orcid.org/0000-0001-7230-073X>][<https://orcid.org/0009-0000-4976-793X>]

Resumen: Se determinaron las capacidades de adsorción de iones de mercurio (II) en soluciones acuosas de una matriz inorgánica constituida por una esponja mesoporosa de sílice (EMS-15) funcionalizada con grupos mercapto (SH-EMS-15). La EMS-15 se preparó mediante el proceso sol-gel, utilizando tetraetil ortosilicato (TEOS) como fuente de la sílice (SiO₂), el surfactante Pluronic P123 como agente director de la mesoestructura y 1,2,3-trimetilbenceno (mesitileno) como agente de expansión de los poros. Para analizar el desempeño del material, se realizaron experimentos de adsorción a diferentes concentraciones iniciales de Hg (II): 10, 50 y 100 ppm. La caracterización estructural y química del material adsorbente se efectuó mediante diversas técnicas. Los análisis de las espectroscopías micro-Raman y FT-IR evidenciaron la presencia de los grupos mercapto en la superficie de la EMS-15. Por su parte, los análisis de la espectroscopía por reflectancia difusa UV-vis de los adsorbentes después de la adsorción, permitieron identificar el ambiente electrónico y el estado de oxidación de los iones de Hg (II) adsorbidos. Los análisis por fluorescencia de rayos X (FRX) facilitaron la cuantificación de las capacidades de adsorción de los iones de Hg (II) en la superficie de la sílice funcionalizada. La modificación del material mesoporoso con grupos mercapto mejoró significativamente la retención de los iones de mercurio en comparación con la EMS-15 pura (sin funcionalizar). El adsorbente SH-EMS-15 presentó la más alta capacidad de adsorción, del 98 % para Hg (II), en las condiciones estudiadas, utilizando una solución inicial con 50 ppm de iones de Hg (II).

Palabras clave: Remediación de agua; Silices mesoporosas; adsorción de mercurio

Abstract: The adsorption capacities of mercury (II) ions in aqueous solutions were determined using an inorganic matrix composed of a mesoporous silica sponge (EMS-15) functionalized with mercapto groups (SH-EMS-15). The EMS-15 was prepared through a sol-gel process, using tetraethyl orthosilicate (TEOS) as the silica (SiO₂) source, Pluronic P123 as the mesostructure-directing agent, and 1,2,3-trimethylbenzene (mesitylene) as the pore-expanding agent. To evaluate the material's performance, adsorption experiments were conducted at different initial Hg(II) concentrations: 10, 50, and 100 ppm. The structural and chemical characterization of the adsorbent material was carried

out using various techniques. Micro-Raman and FT-IR spectroscopic analyses confirmed the presence of mercapto groups on the surface of EMS-15. In turn, UV–Vis diffuse reflectance spectroscopy analyses of the adsorbents after adsorption allowed the identification of the electronic environment and oxidation state of the adsorbed Hg(II) ions. X-ray fluorescence (XRF) analyses facilitated the quantification of the adsorption capacities of Hg(II) ions on the surface of the functionalized silica. The modification of the mesoporous material with mercapto groups significantly improved the retention of mercury ions compared to pure (non-functionalized) EMS-15. The SH-EMS-15 adsorbent exhibited the highest adsorption capacity 98% for Hg(II) under the studied conditions, using an initial solution containing 50 ppm of Hg(II) ions.

Keywords: Water remediation; Mesoporous silicas; Mercury adsorption

1. Introducción

La contaminación hídrica constituye un desafío ambiental continuo que se aborda desde múltiples perspectivas. Este problema se relaciona con la presencia de contaminantes de diversa naturaleza (biológicos, orgánicos e inorgánicos) a nivel macro y microscópico, los cuales se distribuyen en la atmósfera, los suelos, los alimentos y las fuentes hídricas. En particular, la contaminación generada por compuestos inorgánicos, como los metales en estado de oxidación (2+), representa un riesgo significativo debido a su alta solubilidad en agua y su afinidad por los grupos tiol presentes en el glutatión reducido (GSH). Estas características facilitan su dispersión y confieren toxicidad al recurso hídrico [1], [2], [3].

El mercurio es altamente persistente y peligroso debido a su capacidad de transformarse en diferentes especies químicas. La exposición al mercurio puede generar lesiones en el sistema nervioso central, disfunción renal, inhibición de enzimas, úlceras gastrointestinales, hepatotoxicidad, problemas reproductivos y la

producción de especies reactivas de oxígeno (ROS) [3], [4], [5], [6].

La Norma Oficial Mexicana (NOM) número NOM-127-SSA1-2021 regula la calidad del agua para consumo humano establece que el límite máximo permisible de mercurio es de 0.001 mg/L o lo que es equivalente a 0.001 ppm. Mientras que la NOM-001-SEMARNAT-2021 que establece los límites permisibles que dependen del cuerpo receptor para los ríos son 0.010 ppm, lagos 0.015 ppm, zonas marinas 0.020 ppm y suelos 0.005 ppm

La Norma Oficial Mexicana (NOM) número NOM-127-SSA1-2021, que regula la calidad del agua para consumo humano, establece que el límite máximo permisible de mercurio es de 0.001 mg/L (equivalente a 0.010 ppm). Por su parte, la NOM-001-SEMARNAT-2021 establece límites permisibles para descargas que varían según el cuerpo receptor: para 0.010 ppm ríos, 0.015 ppm para lagos, 0.020 ppm para zonas marinas y 0.005 ppm para suelos [7], [8].

La esponja mesoporosa de sílice EMS-15 representa una plataforma nanoestructurada con propiedades texturales sobresalientes, como alta área superficial, gran volumen de poro y estabilidad

térmica, lo que la hace idónea para aplicaciones en procesos de adsorción [9], [10], [11], [12], [13], [14]. En el caso específico del mercurio, metal altamente tóxico y persistente en medios acuosos [2], [3], [4], resultados previos reportados han demostrado que la EMS-15 funcionalizada con grupos mercapto (-SH) presenta una alta capacidad de adsorción de iones de Hg (II). Esta elevada capacidad se atribuye a la interacción ácido-base suave de Lewis entre los grupos sulfhidrilo y los iones de Hg (II) [15]. Este desempeño se relaciona con la capacidad del material para dispersar de manera uniforme los grupos funcionales dentro de su red porosa tridimensional, lo que favorece la formación de enlaces coordinados estables con el mercurio, incluso en condiciones de pH ácido [15], [16]. Además, el mecanismo de adsorción se ve potenciado por la afinidad específica de los grupos -SH hacia iones metálicos blandos, lo que refuerza la selectividad del material frente a otras especies presentes en solución [17], [18], [19], [20].

Estos hallazgos, en conjunto, evidencian que la EMS-15 funcionalizada con -SH constituye un material con un potencial notable para la remediación de aguas contaminadas con Hg (II), ofreciendo ventajas en eficiencia, estabilidad y viabilidad operativa frente a otros adsorbentes reportados.

2. Materiales y métodos

a) Síntesis de la Esponja Mesoporosa de Sílice (EMS-15)

La obtención de la esponja mesoporosa de sílice (EMS-15) se efectuó mediante el método sol-gel, siguiendo las condiciones sintéticas previamente establecidas en la literatura [15].

Se empleó el copolímero de bloque Pluronic P123 como agente director de la mesoestructura, mesitileno como agente expansor de poros y tetraetil ortosilicato (TEOS) como precursor y fuente de sílice.

Inicialmente, se disolvieron 4.8 g de P123 en una mezcla de 112.5 mL de agua desionizada y 75 mL de ácido clorhídrico (HCl) 4 M bajo agitación magnética constante. Una vez obtenida una solución homogénea y transparente, se incorporaron 5.8 mL de mesitileno. La mezcla se mantuvo en agitación durante 1 hora para asegurar la adecuada dispersión del expansor.

Posteriormente, se añadieron 8 mL de TEOS, continuando la agitación a una temperatura de 35 ° C por un periodo de 24 horas. Esta etapa es crucial, ya que permite la hidrólisis y condensación del TEOS, favoreciendo la formación de la red mesoporosa de sílice.

Transcurrido el tiempo de envejecimiento inicial, la suspensión se transfirió a un recipiente de polipropileno y se sometió a un tratamiento hidrotermal a 80 ° C durante 24 horas. Dicho tratamiento térmico buscó favorecer la organización estructural y la estabilidad de las paredes del material mesoporoso. El sólido obtenido se separó por filtración al vacío y se lavó repetidamente con agua destilada para eliminar trazas de reactivos y subproductos solubles. El material se dejó secar primero a temperatura ambiente y, posteriormente, en una estufa a 110 ° C durante 18 horas. Finalmente, la matriz se calcinó en una mufla a 500 ° C por 4 horas, con el objetivo de eliminar por completo el surfactante y el agente expansor orgánico, obteniéndose la EMS-15 con una estructura mesoporosa definida y térmicamente estable.

b) Síntesis del Material Funcionalizado (SH-EMS-15)

La funcionalización superficial de la matriz con grupos mercapto (SH-EMS-15) se realizó mediante un proceso

de injerto superficial (grafting) en solución, siguiendo el protocolo reportado por Nava *et al.* [15]. Se empleó 3-mercaptopropiltrimetoxisilano (MPTS) como agente funcionalizante, manteniendo una relación molar de 0.3 respecto a la EMS-15.

Se preparó inicialmente una solución con 31 mL de etanol (96 %), a la cual se añadió por goteo lento 2.5 mL de MPTS. La mezcla se mantuvo bajo agitación a 25 ° C durante 35 minutos para lograr su homogeneización. Posteriormente, se incorporaron 2.3 g del material EMS-15, y la mezcla se agitó por 60 minutos adicionales.

Para promover la condensación y estabilización de los grupos funcionales en la superficie de la sílice, se añadieron 44 mL de agua desionizada, continuando la agitación por otros 60 minutos. El material resultante se separó por filtración y se lavó abundantemente con agua desionizada para remover el MPTS sin reaccionar y otros subproductos. Finalmente, el material sólido se secó a temperatura ambiente por 24 horas y se sometió a un tratamiento térmico en mufla a 110 ° C durante 18 horas, lo que garantizó la eliminación de compuestos volátiles y la estabilización estructural de la SH-EMS-15, confirmando la incorporación efectiva de los grupos mercapto en su superficie.

c) Experimentos de Adsorción

Para la evaluación de la capacidad de adsorción de iones de Hg (II), se prepararon soluciones acuosas estándar en tres concentraciones nominales: 10, 50 y 100 ppm. De cada solución, se tomaron alícuotas de 55 mL para cada ensayo de adsorción. Durante el procedimiento experimental, se registraron los valores de pH de las soluciones, los cuales se mantuvieron en las condiciones naturales de la disolución para evaluar el desempeño bajo un escenario realista.

A cada sistema de solución de 55 mL de solución inicial de iones de Hg (II), se adicionaron 0.275 g del adsorbente seleccionado (tanto EMS-15 pura como SH-EMS-15). Las mezclas se mantuvieron bajo agitación constante durante 60 minutos, tiempo establecido para favorecer el contacto y la cinética de adsorción entre los iones de Hg (II) y los grupos funcionales mercapto presentes en la superficie del material.

Concluido el periodo de contacto, las suspensiones se filtraron utilizando papel filtro y un embudo de vidrio. Los líquidos filtrados (soluciones tratadas) se recuperaron en frascos ámbar para prevenir cualquier alteración o foto-degradación. Estas soluciones se analizaron posteriormente mediante Fluorescencia de Rayos X (XRF), con el fin de cuantificar la concentración residual de iones de Hg (II) y determinar la capacidad de adsorción del material.

Adicionalmente, el material sólido (adsorbente después de la adsorción) recuperado por filtración se conservó y se secó a temperatura ambiente. Este sólido se destinó a análisis complementarios mediante espectroscopía UV-Vis en modo de reflectancia difusa, permitiendo evaluar de manera cualitativa los cambios estructurales y la naturaleza de la interacción del adsorbente tras el proceso de captura de los iones mercurio.

d) Caracterización de Materiales y Evaluación de Adsorción

La evaluación cuantitativa de Hg (II) en las soluciones antes y después de la adsorción se realizó mediante la técnica de Fluorescencia de Rayos X (FRX). Este método facilitó la cuantificación precisa de las concentraciones residuales de Hg (II) en ppm, lo que permitió el cálculo directo de la capacidad de adsorción alcanzada por los adsorbentes (EMS-15 pura y SH-EMS-15).

Por otra parte, los análisis espectroscópicos cualitativos de Micro-Raman y FT-IR se emplearon para confirmar la

correcta funcionalización de la matriz de sílice. Estos análisis evidenciaron la presencia de las señales características del grupo mercapto (S-H), junto con las vibraciones atribuibles a los enlaces esqueléticos Si-O-Si de la estructura de la sílice.

De forma complementaria, el análisis de Espectroscopía por Reflectancia Difusa UV-Vis se aplicó para aportar información cualitativa sobre el ambiente electrónico y el estado de oxidación del Hg (II) presente en la superficie de los adsorbentes. Este análisis permitió inferir los cambios en su interacción específica con los grupos funcionales -SH de la superficie del material.

Esta combinación de técnicas de caracterización proporcionó una evaluación integral que abarca tanto la confirmación estructural y química de la matriz funcionalizada (FT-IR y Micro-Raman) como la cuantificación directa de la capacidad de adsorción del contaminante metálico (FRX) y el entendimiento cualitativo del mecanismo de interacción (UV-Vis).

3. Resultados

a) Análisis Micro-Raman

El análisis micro-Raman se empleó como técnica de caracterización cualitativa para confirmar la modificación superficial de la matriz de sílice. En la Figura 1 se presentan los espectros micro-Raman correspondientes a la esponja mesoporosa de sílice pura (EMS-15) y al material funcionalizado con grupos mercapto (SH-EMS-15).

En ambos espectros se identifican las bandas vibracionales características de la sílice amorfa. Específicamente, en la región de bajas energías (alrededor de 450-500 cm^{-1}), se observa una banda ancha que se atribuye al modo de vibración de flexión de los enlaces siloxano (Si-O-Si). Asimismo, aproximadamente a 800 cm^{-1} , se detecta una señal que se asocia a las vibraciones simétricas de los

anillos pequeños de SiO_2 que conforman la estructura de la sílice [21].

La incorporación exitosa de los grupos tiol orgánicos en la superficie de la EMS-15 se evidencia por dos fenómenos espectrales principales. En primer lugar, se aprecia un ligero corrimiento y una disminución en la intensidad de las bandas intrínsecas de la sílice mencionadas anteriormente, lo que sugiere una interacción química de los grupos funcionales con la matriz de soporte.

En segundo lugar, y de manera crucial, en la región alta del espectro (SH-EMS-15), específicamente entre 2800 y 3000 cm^{-1} , se observa un pico bien definido y característico. Esta señal corresponde a los modos de estiramiento C-H de los grupos alquilo que provienen del precursor organosilano (MPTS). La presencia inequívoca de estas vibraciones confirma la unión covalente de las especies funcionales mercapto en la superficie de la esponja mesoporosa, de acuerdo con reportes previos en la literatura [21]. Este resultado es consistente con el objetivo de la síntesis de materiales funcionalizados para aplicaciones de adsorción.

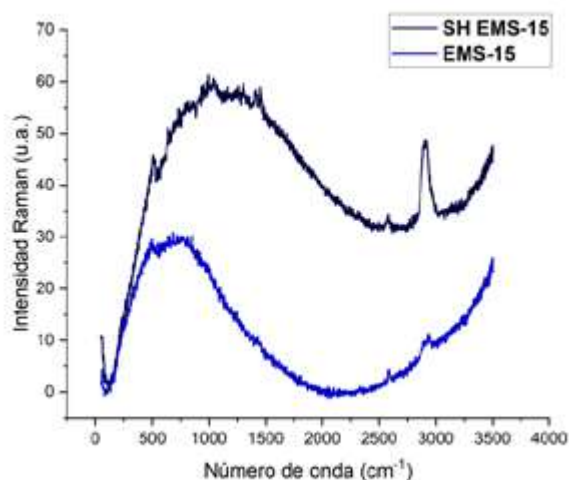


Figura 1: Espectros micro-Raman de la esponja mesoporosa de sílice (EMS-15) y su versión funcionalizada con grupos mercapto (SH-EMS-15).

b) Análisis FT-IR

La espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FT-IR) se utilizó como una técnica cualitativa complementaria al análisis para confirmar la composición química de la matriz de sílice y la eficacia de la funcionalización superficial.

La Figura 2 presenta el espectro infrarrojo correspondiente a la sílice mesoporosa EMS-15, en el cual se identifica el perfil vibracional característico del dióxido de silicio (SiO_2). Las bandas principales se asignan de la siguiente manera: las señales situadas en 811 y 1087 cm^{-1} se asocian con las vibraciones simétrica y asimétrica (Si-O-Si) del enlace siloxano, respectivamente [22], [23]. Además, la banda registrada a 463 cm^{-1} se atribuye al modo de torsión del mismo enlace (Si-O-Si). La banda localizada aproximadamente en 967 cm^{-1} corresponde a la vibración de elongación del grupo silanol (Si-OH), indicando la presencia de grupos hidroxilo en la superficie de la sílice [23]. Las señales en la región de alta energía, específicamente la banda registrada a 1635 cm^{-1} y la amplia e intensa banda centrada alrededor de 3442 cm^{-1} resultan de la superposición de las vibraciones de flexión y estiramiento de las moléculas de agua (H_2O) físicamente adsorbidas, así como de los grupos silanoles superficiales. Estas asignaciones son consistentes con el perfil espectral reportado para materiales de sílice mesoporosa [22], [23].

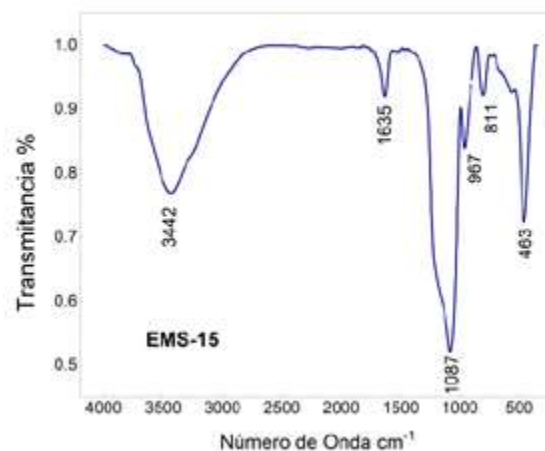


Figura 2: Espectro FT-IR de la sílice mesoporosa EMS-15.

En la Figura 3 se muestra el espectro FT-IR del material modificado superficialmente con grupos mercaptanos (SH-EMS-15). Este espectro confirma la unión covalente del organosilano a la matriz inorgánica mediante la aparición de nuevas bandas vibracionales características, además de las señales típicas de la sílice. La presencia de los grupos funcionales mercapto (-SH) se verifica mediante la aparición de una banda de baja intensidad y bien definida aproximadamente en 2574 cm^{-1} , la cual corresponde al modo de estiramiento del enlace S-H. Adicionalmente, las bandas de estiramiento en 2937 cm^{-1} y 2860 cm^{-1} se atribuyen a las vibraciones simétricas y asimétricas de los enlaces (C-H) de los grupos metileno (-CH₂-) provenientes de la cadena alquílica del MTPS [22], [23]. Por último, la presencia de vibraciones características del enlace C-S se evidencia mediante las bandas localizadas en 1255 cm^{-1} y, de forma superpuesta, en 811 cm^{-1} [22]. La detección simultánea de las bandas S-H, C-H y C-S constituye una prueba contundente de la incorporación de los grupos mercapto en la superficie de la EMS-15. Estos resultados, en conjunto con el análisis Micro-Raman, respaldan la síntesis exitosa del adsorbente funcionalizado (SH-EMS-15).

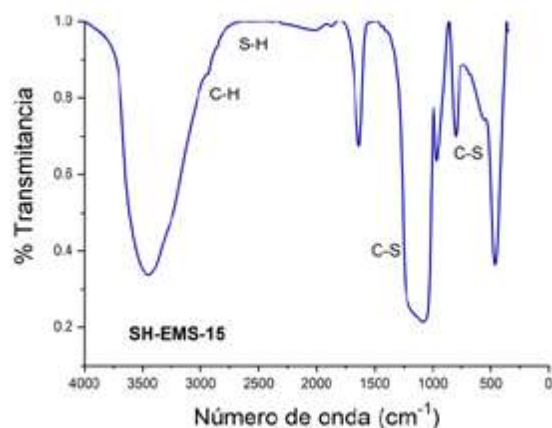


Figura 3: Espectro FT-IR, funcionalización de la esponja mesoporosa de sílice con grupos mercapto (SH-EMS-15).

c) Análisis FRX

El análisis por Fluorescencia de Rayos X (FRX) se empleó como la técnica cuantitativa principal para determinar la capacidad de adsorción del material funcionalizado hacia los iones de Hg (II) en solución acuosa. Los resultados evidenciaron una alta capacidad de adsorción del contaminante metálico en las condiciones de estudio.

La Figura 4 muestra la capacidad de adsorción alcanzada por el material SH-EMS-15 en función de la concentración inicial de iones de Hg (II). Las concentraciones iniciales reales de los iones de Hg (II) en los ensayos fueron de 11.08, 47.11 y 97.89 ppm. Tras el proceso de contacto, las concentraciones finales residuales en la fase acuosa se cuantificaron mediante FRX y fueron de 1.87, 0.98 y 8.23 ppm, respectivamente. Estos valores corresponden a una capacidad de adsorción del 83.12 % para la concentración baja de 10 ppm, un máximo de 97.92 % para la concentración intermedia de 50 ppm, y 91.59 % para la concentración más alta de 100 ppm. La Figura 4 ilustra visualmente esta tendencia, indicando que la capacidad máxima de adsorción en las condiciones de ensayo se alcanzó con la concentración inicial de 50 ppm de iones de Hg (II).

Estos resultados confirman que la modificación de la sílice mesoporosa con grupos mercapto incrementa notablemente la capacidad del material para retener iones de Hg (II). Lo que significa que los grupos funcionales mercapto son los sitios activos para la adsorción. Cabe destacar, que también se evaluó la capacidad de adsorción de la matriz EMS-15 sin funcionalizar, pero no se obtuvieron resultados significativos de retención de iones de Hg (II) en las condiciones experimentales empleadas. Este desempeño diferencial evidencia el efecto positivo y la especificidad de la funcionalización con -SH en el desempeño del adsorbente, lo que respalda la aplicación del material SH-EMS-15 como un candidato prometedor para la remediación de aguas contaminadas con mercurio.

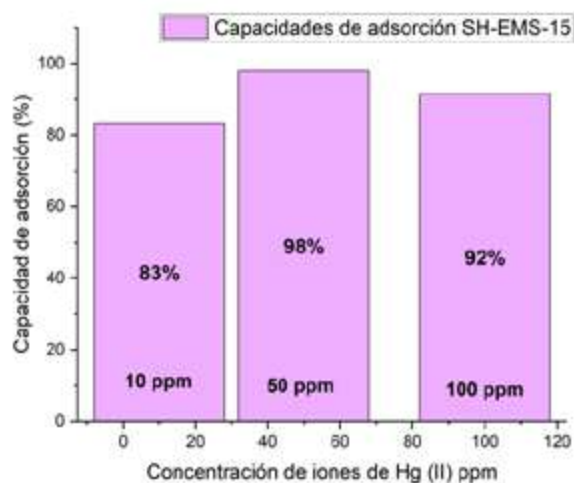


Figura 4: Capacidades de adsorción (expresadas en porcentaje) del material funcionalizado SH-EMS-15 a diferentes concentraciones iniciales de iones de Hg (II).

La matriz EMS-15 pura no manifestó adsorción de iones de Hg (II).

d) Análisis Uv-vis

La espectroscopía de reflectancia difusa UV-Vis se empleó con el objetivo de investigar de manera cualitativa el ambiente electrónico de los iones Hg (II) y el mecanismo de interacción tras el proceso de

adsorción. La Figura 5 presenta los espectros obtenidos de los materiales EMS-15 y SH-EMS-15 después de la exposición a soluciones de iones de Hg (II) a distintas concentraciones.

En el espectro correspondiente a la sílice sin funcionalizar (EMS-15), se observa que las señales son de muy baja intensidad, independientemente de la concentración inicial de Hg (II) a la que fue expuesta. Esta característica refleja una escasa interacción entre la superficie de la sílice y los iones metálicos, lo que confirma la limitada capacidad de adsorción de la matriz pura. Este bajo rendimiento es la razón fundamental por la cual los datos cuantitativos de la EMS-15 no se incluyeron en el análisis de FRX, ya que su capacidad de adsorción es insignificante en comparación con el material funcionalizado.

En contraste, los espectros de la EMS-15 funcionalizada con grupos mercapto (SH-EMS-15) muestran un incremento progresivo en la absorbancia a medida que aumenta la concentración inicial de Hg (10, 50 y 100 ppm). Este aumento es especialmente destacado en la región de 200-250 nm, la cual es característica de las transiciones electrónicas asociadas a las especies iónicas de Hg (II). Adicionalmente, la aparición de un hombro en el espectro, en 300 nm, evidenció una mayor carga metálica (Hg 50 SH-EMS-15 y Hg 100 SH-EMS-15), sugiere la formación de complejos estables Hg-S en la superficie del adsorbente. Esta evidencia respalda la hipótesis de la interacción de ácido-base suave de Lewis entre los iones Hg (II) y los grupos sulfhidrilo. Finalmente, la ausencia de nuevas bandas indica que el mercurio no experimenta procesos de reducción a especies metálicas (Hg^0). Por lo tanto, el Hg (II) se mantiene en su estado de oxidación +2 y se estabiliza en la superficie del material mediante coordinación con los grupos sulfhidrilo funcionales [24]. Este hecho se verifica al comparar el espectro de la EMS-15 con el de SH-EMS-15, confirmándose que el proceso de adsorción no induce un cambio en el

estado electrónico del ión de mercurio, sino su estabilización por complejación superficial.

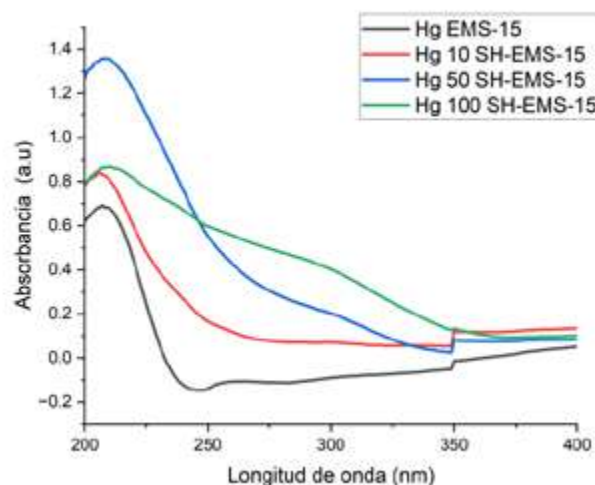


Figura 5: Espectros UV-Vis de los materiales EMS-15 y SH-EMS-15 tras la adsorción de Hg(II) a distintas concentraciones.

d) Análisis de la Capacidad de Adsorción y su Dependencia con la Concentración

El comportamiento de la (SH-EMS-15) frente a las diferentes concentraciones iniciales de Hg (II) muestra una clara dependencia con la densidad de grupos activos en la superficie del material. En el caso de la EMS-15, la capacidad de adsorción fue mínima, lo que evidencia que los grupos silanol presentes en la superficie poseen una baja afinidad por el ion mercurio y limitan su capacidad de retención. En contraste, la incorporación de los grupos mercapto incrementó notablemente la capacidad de adsorción, un fenómeno atribuido a la alta afinidad química entre el azufre (donador blando) y el ion Hg (II) (aceptor blando).

A bajas concentraciones (10 ppm), el número de iones Hg (II) disponibles en solución es inferior a la cantidad de sitios activos, por lo que la capacidad de adsorción se ve limitada por la menor frecuencia de colisiones entre las especies. Sin embargo, se obtiene una alta capacidad de adsorción (83%) de iones de Hg (II). En cambio, a concentraciones intermedias (50 ppm), el sistema alcanza un equilibrio óptimo entre la disponibilidad de iones y la capacidad del adsorbente, logrando una capacidad máxima de adsorción del 97.9%. A concentraciones más altas (100 ppm), se observa una ligera disminución en la capacidad (alrededor del

91.6%), lo cual se atribuye a la saturación progresiva de los sitios activos y a posibles limitaciones en la transferencia de masa o la competencia difusional dentro de la mesoestructura porosa. Es importante señalar que, en todos los experimentos, las soluciones tuvieron un pH de 2 tanto antes como después de la adsorción, lo que confirma la estabilidad del proceso en medio ácido.

Estos resultados confirman que el material SH-EMS-15 conserva su estructura mesoporosa y mantiene una distribución homogénea de los grupos funcionales, lo que garantiza una alta accesibilidad de los iones metálicos a la red interna. El desempeño obtenido respalda el potencial del material como un adsorbente selectivo, estable y eficiente para la captura de Hg (II) en medios acuosos.

4. Discusión

Los resultados de caracterización confirman la síntesis exitosa de la SH-EMS-15, evidenciando un material estructuralmente estable y químicamente activo, lo cual es consistente con los antecedentes reportados en la literatura [15]. La modificación superficial se evidenció mediante la concordancia espectroscópica entre Micro-Raman y FT-IR: el corrimiento de las vibraciones esqueléticas Si-O-Si y la aparición de las bandas C-H y S-H confirman la unión covalente del precursor mercaptosilano a la matriz de sílice.

La evaluación cuantitativa de la capacidad de adsorción mediante FRX demostró la efectividad superior de la SH-EMS-15 en comparación con la EMS-15 pura, cuya capacidad resultó baja. La dependencia de la capacidad de adsorción con la concentración inicial se interpreta como el equilibrio entre la disponibilidad de sitios activos y la probabilidad de colisión iónica. El máximo rendimiento obtenido a la concentración intermedia sugiere la saturación eficiente de los grupos funcionales sin incurrir en las limitaciones de difusión o en la subutilización de sitios.

El mecanismo de captura se correlaciona

directamente con el análisis UV-Vis. El aumento de la absorbancia tras la adsorción y la aparición del hombro en 300 nm indican la formación de complejos estables Hg-S. La ausencia de bandas que evidencien la reducción del Hg (II) a Hg⁰ confirma que el mercurio se mantiene en su estado de oxidación +2. Por consiguiente, el mecanismo predominante se establece como una interacción ácido-base suave de Lewis entre los iones Hg²⁺ (un ion metálico "blando") y los átomos de azufre del grupo tiol (un donador "blando"). Este mecanismo de alta afinidad se ve potenciado por la estructura mesoporosa del material, que garantiza una distribución homogénea de los sitios activos y facilita la accesibilidad de los iones metálicos a la red interna.

En síntesis, la capacidad de adsorción sobresaliente de la SH-EMS-15 deriva de la combinación sinérgica de una selectividad química específica (Hg-S) y las propiedades texturales superiores del soporte mesoporoso, lo que respalda su viabilidad como adsorbente avanzado en el tratamiento de aguas contaminadas con mercurio, y establece una ventaja sobre materiales cuya retención se basa solo en fuerzas electrostáticas o físicas.

5. Conclusión

El presente estudio demostró el cumplimiento de los objetivos planteados, al lograr la síntesis exitosa de la matriz mesoporosa de sílice funcionalizada con grupos mercapto (SH-EMS-15) y cuantificar su capacidad de adsorción de iones Hg (II) en soluciones acuosas.

La funcionalización de la EMS-15 se verificó de forma integral mediante las técnicas espectroscópicas (FT-IR y Micro-Raman), confirmando la unión covalente de los grupos activos. Los análisis cuantitativos por FRX establecieron la elevada capacidad de adsorción del material, que alcanzó hasta un 98% de retención de los iones de Hg (II) en las condiciones óptimas evaluadas.

La alta eficacia del SH-EMS-15 se correlaciona con un mecanismo de adsorción selectivo de tipo ácido-base suave de Lewis, según se infirió del análisis UV-Vis. Este mecanismo permite la complejación estable de los iones

Hg^{2+} , sin inducir cambios en su estado de oxidación. En resumen, el material SH-EMS-15 constituye un adsorbente avanzado que combina una alta estabilidad estructural con selectividad química, cumpliendo con los requisitos de eficiencia para la remediación de aguas contaminadas con mercurio. Se recomienda para futuras investigaciones la evaluación de la selectividad de la EMS-15 con diferentes funcionalizaciones frente a otros metales pesados como Cd (II) y Pb (II).

6. Agradecimientos

Agradezco a la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (Secihti) por su apoyo y aportación en esta investigación. Proyecto interno FONDEC-UAQ-2022, por el financiamiento.

7. Conflicto de intereses

Los autores declaran que no existen conflictos de intereses relacionados con la realización y publicación de este trabajo.

8. Referencias

- [1] P. Hultman, "Immunotoxicology of Metals," *Handbook on the Toxicology of Metals*, pp. 197–211, Jan. 2007, doi: 10.1016/B978-012369413-3/50066-5.
- [2] K. Jomova, S. Y. Alomar, E. Nepovimova, K. Kuca, and M. Valko, "Heavy metals: toxicity and human health effects," *Archives of Toxicology* 2024 99:1, vol. 99, no. 1, pp. 153–209, Nov. 2024, doi: 10.1007/S00204-024-03903-2.
- [3] R. A. Hauser-Davis, N. S. Quinete, and L. S. Lemos, "Lead, Mercury and Cadmium in the Aquatic Environment: Worldwide Occurrence, Fate and Toxicity," *Lead, Mercury and Cadmium in the Aquatic*

Environment: Worldwide Occurrence, Fate and Toxicity, pp. 1–244, Jan. 2023, doi: 10.1201/9781003186441/LEAD-MERCURY-CADMIUM-AQUATIC-ENVIRONMENT-RACHEL-ANN-HAUSER-DAVIS-NATALIA-SOARES-QUINETE-LEILA-SOLEDAD-LEMO/RIGHTS-AND-PERMISSIONS.

- [4] M. Jaishankar, T. Tseten, N. Anbalagan, B. B. Mathew, and K. N. Beeregowda, "Toxicity, mechanism and health effects of some heavy metals," *Interdiscip Toxicol*, vol. 7, no. 2, pp. 60–72, Jun. 2014, doi: 10.2478/INTOX-2014-0009.
- [5] P. Massányi, M. Massányi, R. Madeddu, R. Stawarz, and N. Lukáč, "Effects of Cadmium, Lead, and Mercury on the Structure and Function of Reproductive Organs," *Toxics* 2020, Vol. 8, Page 94, vol. 8, no. 4, p. 94, Oct. 2020, doi: 10.3390/TOXICS8040094.
- [6] M. Shahid, M. Nadeem, and H. F. Bakhat, "Environmental toxicology and associated human health risks," *Environmental Science and Pollution Research*, vol. 27, no. 32, pp. 39671–39675, Nov. 2020, doi: 10.1007/S11356-020-10516-6/METRICS.
- [7] S. De Agua, Y. Drenaje, and D. E. Monterrey, "DIARIO OFICIAL Lunes 2 de mayo de 2022".
- [8] "SECRETARIA DE MEDIO AMBIENTE Y RECURSOS NATURALES", Accessed: Oct. 27, 2025. [Online]. Available: <https://www.gob.mx/semarnat/acciones-y-programas/convencion-sobre-los-humedales-de-importancia->
- [9] J. Ma, Q. Liu, D. Chen, S. Wen, and T. Wang, "Synthesis and characterisation of pore-expanded mesoporous silica materials," *Micro Nano Lett*, vol. 10, no. 2, pp. 140–144, Feb. 2015, doi: 10.1049/MNL.2014.0413/ASSET/3369484F-DA93-4B69-B58C-857F7C181BFC/ASSETS/IMAGES/LARGE/MNL.2014.0413.09.JPG.
- [10] R. Huirache-Acuña *et al.*, "SBA-15 Mesoporous Silica as Catalytic Support for Hydrodesulfurization Catalysts—Review," *Materials* 2013, Vol. 6, Pages 4139–4167, vol. 6, no. 9, pp. 4139–4167, Sep. 2013, doi: 10.3390/MA6094139.
- [11] F. M. Mtunzi, P. N. Diagboya, R. A. Düring, and B. I. Olu-Owolabi, "Mesoporous SBA-15 Functionalized with G-5 Poly(amidoamine):

- A Sustainable Adsorbent for Effective Sequestration of an Emerging Aqueous Contaminant," *ACS Appl Nano Mater*, vol. 4, no. 3, pp. 3052–3061, Mar. 2021, doi: 10.1021/ACSANM.1C00190/SUPPL_FILE/AN1C00190_SI_001.PDF.
- [12] P. Schmidt-Winkel *et al.*, "Microemulsion Templating of Siliceous Mesostructured Cellular Foams with Well-Defined Ultralarge Mesopores," *Chemistry of Materials*, vol. 12, no. 3, pp. 686–696, 2000, doi: 10.1021/CM991097V.
- [13] P. Schmidt-Winkel, W. W. Lukens, D. Zhao, P. Yang, B. F. Chmelka, and G. D. Stucky, "Mesocellular siliceous foams with uniformly sized cells and windows [5]," *J Am Chem Soc*, vol. 121, no. 1, pp. 254–255, Jan. 1999, doi: 10.1021/JA983218I/SUPPL_FILE/JA983218I_S.PDF.
- [14] P. Schmidt-Winkel, C. J. Glinka, and G. D. Stucky, "Microemulsion Templates for Mesoporous Silica," *Langmuir*, vol. 16, no. 2, pp. 356–361, Jan. 1999, doi: 10.1021/LA9906774.
- [15] M. G. G. Ramos, C. C. CONACyT, and GARM960725MSPRMG07, "Adsorción de mercurio (II) en agua utilizando esponjas mesoporosas de sílice EMS-15 funcionalizadas con grupos mercapto," Nov. 2021, Accessed: Mar. 17, 2025. [Online]. Available: <https://ri-ng.uaq.mx/handle/123456789/3322>
- [16] J. A. C. Chávez, C. C. CONACyT, and 925656, "Síntesis y caracterización de esponjas mesoporosas de sílice (EMS-15) funcionalizadas con grupos amino como adsorbentes para remoción de cromo (VI) en agua," Apr. 2021, Accessed: Mar. 17, 2025. [Online]. Available: <https://ri-ng.uaq.mx/handle/123456789/2815>
- [17] J. R. Myers, C. S. Brown, and E. Roa, "Hybrid Mesoporous Materials With Functionalized Monolayers," *Advanced ...*, vol. 2, no. 2, Jan. 1998, doi: 10.20935/MHEALTHWELLB7665.
- [18] T. M. Albayati, A. A. Sabri, and D. B. Abed, "Functionalized SBA-15 by amine group for removal of Ni(II) heavy metal ion in the batch adsorption system," *Desalination Water Treat*, vol. 174, pp. 301–310, Jan. 2020, doi: 10.5004/DWT.2020.24845.
- [19] E. Da'na, "Adsorption of heavy metals on functionalized-mesoporous silica: A review," *Microporous and Mesoporous Materials*, vol. 247, pp. 145–157, Jul. 2017, doi: 10.1016/J.MICROMESO.2017.03.050.
- [20] S. Wadhawan, A. Jain, J. Nayyar, and S. K. Mehta, "Role of nanomaterials as adsorbents in heavy metal ion removal from waste water: A review," *Journal of Water Process Engineering*, vol. 33, p. 101038, Feb. 2020, doi: 10.1016/J.JWPE.2019.101038.
- [21] C. S. S. R. Kumar, "Raman spectroscopy for nanomaterials characterization," *Raman Spectroscopy for Nanomaterials Characterization*, vol. 9783642206207, pp. 1–645, Mar. 2012, doi: 10.1007/978-3-642-20620-7/COVER.
- [22] D. C. M. Dutoit, U. Göbel, M. Schneider, and A. Baiker, "Titania–Silica Mixed Oxides: V. Effect of Sol-Gel and Drying Conditions on Surface Properties," *J Catal*, vol. 164, no. 2, pp. 433–439, Dec. 1996, doi: 10.1006/JCAT.1996.0399.
- [23] N. B. Colthup, L. H. Daly, S. E. Wiberley, N. B. Colthup, L. H. Daly, and S. E. Wiberley, *Chapter 7 – Olefin Groups*, vol. 1. 1990. Accessed: Oct. 06, 2025. [Online]. Available: <http://www.sciencedirect.com:5070/book/9780121825546/introduction-to-infrared-and-raman-spectroscopy>
- [24] H.-H. Perkampus, "UV-VIS Spectroscopy and Its Applications," *UV-VIS Spectroscopy and Its Applications*, 1992, doi: 10.1007/978-3-642-77477-5.

Detección De Concentraciones de Agua en Caminos Usando YOLO

Water-puddle Detection on Roads Using YOLO

Trujillo Lopez, Miguel; Ramos Arreguin, Juan Manuel; Pedraza Ortega, Jesús Carlos; Tovar Arriaga, Saul; Aceves Fernández, Marco Antonio; Ramírez Arriaga, Karen Andrea.

Facultad de Ingeniería

Universidad Autónoma De Querétaro

Querétaro, México

miguetrulo@gmail.com; ORCID ([https://orcid.org/0009-0003-3807-4136])

juan.ramos@uaq.edu.mx; ORCID ([https://orcid.org/0000-0002-2604-9692])

caryoko@yahoo.com; ORCID ([https://orcid.org/0000-0001-5125-8907])

saul.tovar@uaq.mx; ORCID ([https://orcid.org/0000-0002-2695-1934])

marco.aceves@uaq.edu.mx; ORCID ([https://orcid.org/0000-0002-5455-0329])

andrea.r.arriaga@gmail.com ORCID ([https://orcid.org/0000-0003-4910-6298])

Resumen: La presencia de cúmulos de agua en caminos o carreteras puede ser una situación peligrosa para los automóviles, estos pueden ocultar de la vista del conductor ciertos obstáculos los cuales pueden causar un accidente. Tan solo en México el número de accidentes de tráfico aumenta considerablemente en temporada de lluvias. El desarrollo de tecnologías que permitan la detección de este tipo de fenómeno puede ayudar a la asistencia en la conducción. En este trabajo se presenta la implementación de un modelo de inteligencia artificial basado en el método YOLO el cual es capaz de detectar las concentraciones de agua con una alta precisión (78%) bajo diversas condiciones climatológicas, de luz, en distintos tipos de condiciones de camino, estructurado (carreteras o caminos pavimentado) y no estructurado (caminos sin pavimento) y en una topología de México (Querétaro-Guanajuato).

Palabras clave: Detección de cúmulos de agua; Visión por computadora; YOLO; Aprendizaje profundo; Detección de objetos.

Abstract: The presence of water-puddle on roads or highways can be a dangerous situation for cars. These can obscure certain obstacles from the driver's view, potentially causing an accident. In Mexico alone, the number of traffic accidents increases considerably during the rainy season. The development of technologies that allow the detection of this type of phenomenon can aid in driver assistance. This paper presents the implementation of an artificial intelligence model based on the YOLO method, which is capable of detecting water concentrations with high precision (78%) under various weather and light conditions, in different types of road conditions, structured (roads or paved roads) and unstructured (unpaved roads) and in a topology of Mexico (Querétaro-Guanajuato).

Keywords: Water-puddle detection; Computer Vision; YOLO; Deep Learning; Object detection.

1. Introducción

La conducción se ha convertido en una de las actividades principales y más frecuentes dentro de nuestra sociedad. Millones de personas viajan o conducen un vehículo automotor, por lo que el desarrollo de tecnologías que mejoren o den asistencia al conductor son de beneficio para sus usuarios. A través de los años los vehículos han sido construidos con un mayor número de herramientas que ayuden a la conducción y seguridad del mismo.

La lluvia es un evento climatológico el cual afecta muchas veces a varios sectores de la ciudad, de entre los cuales se encuentra la conducción y el tráfico. Las afectaciones causadas por la lluvia son diversas, estas

afectan la infraestructura de las calles cuando se llenan de agua, llegando así a provocar diversos percances a los conductores. Debido a que el pavimento mojado puede causar un mal funcionamiento del vehículo o provocar concentraciones de agua (charcos) las cuales ocultan a la vista del piloto posibles obstáculos como hoyos u objetos (ramas, topes,) que afecten al vehículo y sus tripulantes.

Solamente en México entre el año 2021 y 2022 los accidentes vehiculares en temporada de lluvias llegaron a aumentar hasta un 13%, mientras que en los últimos 5 años alrededor del 25% de los accidentes registrados se dan en condiciones de lluvia [1]. En Estados Unidos se reporta que alrededor de 3 billones de dólares se gasta de forma anual debido a daños causados por baches [2]. Manejar en medio de cúmulos de agua o zonas inundadas puede causar

daños al vehículo y sus tripulantes, esto debido a que puede ocurrir el fenómeno llamado hidropneumático, en el cual como resultado a la acumulación de agua en los caminos el neumático pierde contacto con la superficie (carretera) y rebote sobre el agua llegando a provocar la pérdida de control del automóvil, mientras más profunda sea el cumulo de agua, con mayor facilidad se puede perder el control. En la figura 1 se puede observar una representación de este fenómeno. Se reportó que el 21% de 5,891,000 accidentes de vehículos en Estados Unidos son relacionados con la climatología, el 75% de estos ocurren en pavimento mojado y 47% durante la lluvia [3].



Figura 1. Hidropneumático [4].

Lo que se busca es desarrollar un algoritmo el cual sea capaz de detectar concentraciones de agua en caminos con una topografía de México en imágenes, para una futura asistencia en la conducción autónoma de vehículos.

Una de las principales problemáticas que se tiene al momento de detectar cúmulos de agua es la naturaleza del charco, esto se debe a que no es sencillo definirlo. El comportamiento de éste según el caso puede ser como un espejo, reflejando los objetos que tiene alrededor (figura 2) o la luz que le incide generando la apariencia de que se ilumina el segmento de agua. Esto depende mucho del tamaño del charco, el tipo de luz que le incide y el ángulo en que se percibe el charco. Los cúmulos de agua tienden a ser áreas con un alto brillo y una baja saturación.



Figura 2. Reflexión del cúmulo de agua.

También es complejo determinar los límites de un charco, ya que tiende a tener zonas con una clara

presencia de agua mientras que en los bordes tiende a difuminarse, y no tener una apariencia tan clara, esto dependerá del tipo de suelo en el que se encuentre. En la figura 3 se muestra el mismo charco, pero se muestra que pueden abarcar diferentes áreas, aunque es el mismo objeto de análisis.

Para tratar el problema de la detección de cúmulos de agua se han desarrollado diversas metodologías, algunas tienen su desarrollo centrado en el uso de sensores y periféricos [5], [6], [7], mientras que otros tienen una metodología en la cual usan cámaras y algoritmos de inteligencia artificial [8], [9], [10], [11], [12], [13].

El desarrollo de sensores especializados para detectar acumulaciones de agua requiere del funcionamiento de diversos periféricos y hardware, lo que eleva el costo de desarrollo y producción. En cambio, las metodologías que constan de cámaras y algoritmos tienden a ser más económicas y fáciles de probar e implementar, debido a que en la actualidad los automóviles ya cuentan con diversos sensores y cámaras distribuidos en el automóvil.



Figura 3. Variabilidad del área de un charco.

Se han desarrollado diversas técnicas de detección de objetos en el área de visión por computadora, los más destacados son basados en técnicas de Aprendizaje Profundo[14], YOLO (You Only Look Once)[15], SSD (Single Shot Detector) [16], Faster R-CNN (Faster Region-Based Convolutional Neural Network) [17]entre otros.

YOLO es un modelo enfocado en una respuesta rápida. Debido a esto, es ampliamente utilizado en

proyectos relacionados con la conducción autónoma. Su adaptabilidad y gran precisión en diversas condiciones climatológicas como días despejados, lluvia, atardecer entre otros, lo hacen adecuado para este tipo de problemáticas.[8], [18]

YOLO unificó los pasos de detección de objetos al detectar todos los cuadros delimitadores de forma simultánea. Para lograr esto YOLO divide la imagen de entrada en una cuadrícula $S \times S$ y predice B número de cajas delimitadoras de la misma clase, junto con la probabilidad de que cada recuadro pertenezca a una de las C clases posibles para cada celda de la cuadrícula, figura 4. [15]

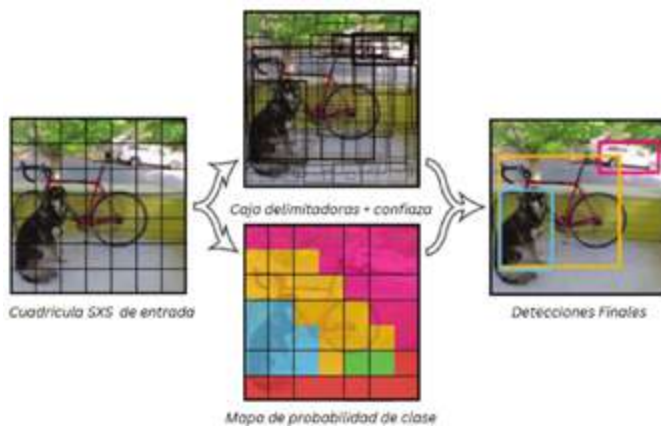


Figura 4. Funcionamiento de YOLO[15].

La arquitectura del modelo de YOLO se muestra en la figura 5, las primeras capas convolucionales extraen las características de la imagen mientras que las capas completamente conectadas predicen las probabilidades y las coordenadas. La red tiene 24 capas convolucionales seguidas de dos capas completamente conectadas, se usa una capa de reducción de 1×1 seguido de una capa convolucional de 3×3 . [15]

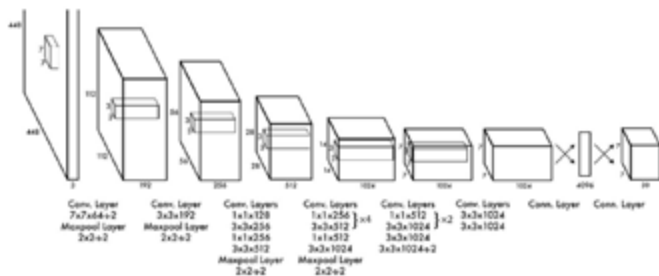


Figura 5. Arquitectura de YOLO [15].

Para poder cuantificar que tan bien un modelo realiza la tarea de detección, se utiliza métricas para

poder medir su desempeño, como la métrica mAP (Mean Average Precision). Para poder entender la métrica mAP es necesario conocer los siguientes conceptos.

La precisión es la habilidad del modelo de identificar objetos relevantes, y se da como la relación entre las detecciones correctas (Verdaderos positivos) y el total de predicciones positivas (Verdaderos Positivos, Falsos Positivos), figura 6.[19]

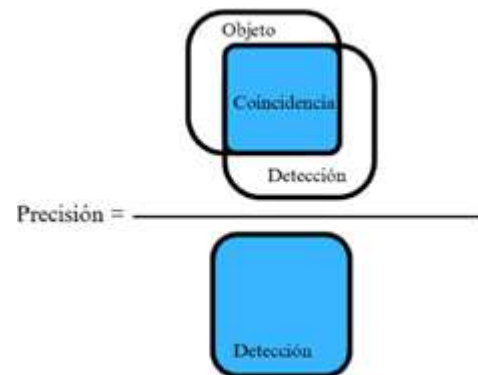


Figura 6. Precisión.

La recuperación es la capacidad del modelo de recuperar todos los casos relevantes, la relación entre las predicciones correctas (Verdaderos Positivos) y el total de las instancias (Verdaderos positivo, Falsos negativos), figura 7. [19]

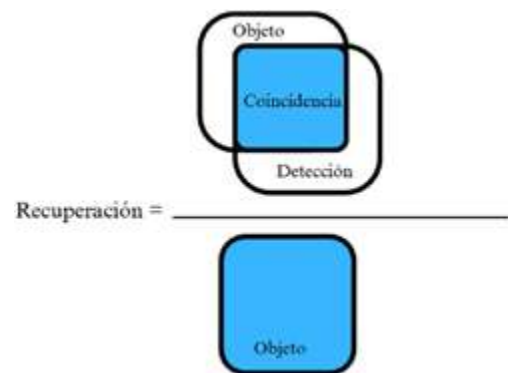


Figura 7. Recuperación

La Intersección sobre la unión (IoU), figura 8, es una métrica basada en el índice de Jaccard, que es un coeficiente de similitud entre dos conjuntos de datos (etiquetas/anotaciones). El IoU corresponde al área de superposición (intersección) entre el área predicha B_p y la anotación verdadera B_{pt} y dividido entre el área de su unión. Cuando el valor de $\text{IoU} = 1$, se dice considera que es una detección perfecta, mientras que es cuando $\text{IoU} = 0$ es una detección nula. Por lo cual cuanto más cercano se IoU a 1 la detección es mejor.[19]

La precisión media (mAP) junta tanto la precisión como la recuperación, para las diversas clases, dependiendo del tipo de evaluación mAP puede reportarse con varios tipos de umbrales los más comunes es mAP.50, el cual se calcula con un umbral de IoU de 0.5, en el cual se busca que el modelo detecte al menos el 50% del área del objeto, mientras que mAP50-90 es más estricto y únicamente muestra aquellas detecciones la cuales tienen una localización muy exacta [19].

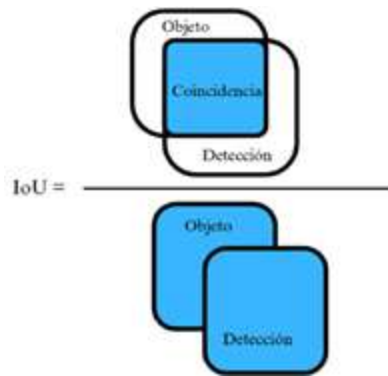


Figura 8. Intersección Sobre la Unión

2. Materiales y métodos

La metodología propuesta para dar solución a la problemática será la siguiente mostrada en la figura 9, posteriormente se describirá cada uno de los pasos.



Figura 9. Metodología.

2.1 Colección de los datos

Para la construcción del conjunto de datos se buscó obtener muestras lo más cercanas a condiciones reales. Para esto, se montó una cámara en el tablero de un automóvil (figura 10) en movimiento y se capturó diversos segmentos de ruta, considerando diversas condiciones del clima y de luz. Las zonas en donde se realizó la captura de estas muestras fueron en la ciudad de Querétaro y Guanajuato. En la tabla 1 se muestran las características técnicas de la cámara usada para la adquisición de los datos.



Figura 10. Dispositivo de captura.

Características	Especificación
Sensor de imagen	1/2.9" CMOS, ~2MP pixeles efectivos
Resolución	(1280x720) px (Full HD, 16:9)
Apertura	f/2.0
Campo de visión	130 diagonal (110° horizontal)
Lentes	6 elementos de lente de vidrio
Rango de frames	30fps
Formato de video	AVI

Tabla 1. Especificaciones técnicas de la cámara.

2.2 Pre-procesamiento

Una vez que se capturaron los segmentos de ruta se extrajeron imágenes en el que aparecen cúmulos de agua (muestras positivas) y aquellas en las que hubiera ausencia de los cúmulos (muestras negativas). Se cuenta con imágenes en caminos estructurados (calles con pavimento) y en caminos no estructurados (calles sin pavimentar o en malas condiciones), de la misma forma hay imágenes que contienen cúmulos de agua y otras que

no contienen. En la figura 11 se muestran ejemplos de las diversas condiciones climatológicas en las cuales se capturaron las imágenes que servirán para entrenar el modelo.

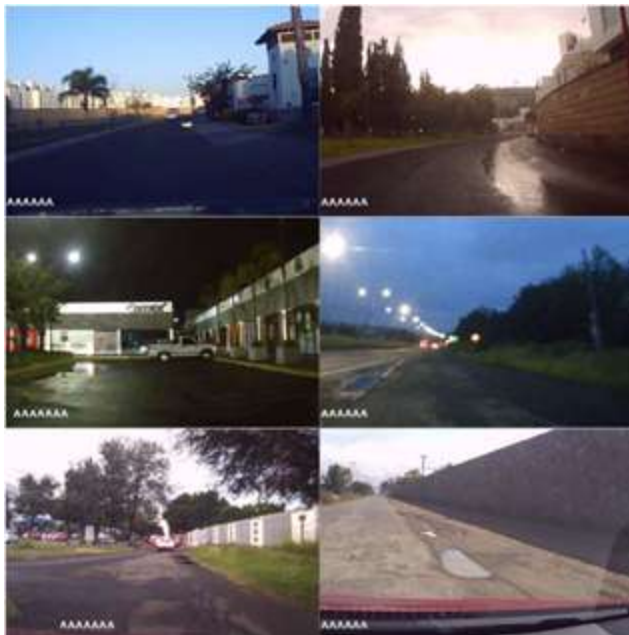


Figura 11. Condiciones de luz en el conjunto de datos.

2.2 Etiquetado

Para el etiquetado de las imágenes se utilizó la herramienta CVAT la cual permite hacer anotaciones y exportar las etiquetas en el formato requerido por el modelo. En la figura 12 se muestra cómo se realiza el etiquetado de las imágenes, se genera un cuadro delimitador en el cual se encierra el charco para obtener las coordenadas del lugar del charco.



Figura 12. Etiquetado de las imágenes.

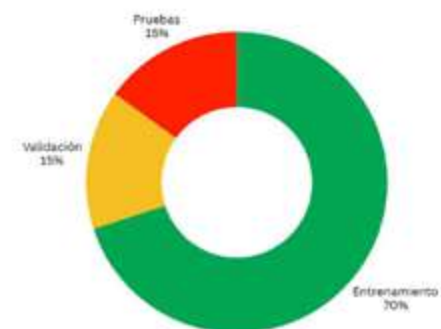


Figura 13. División de los Datos

2.3 Conjunto de datos

El conjunto de datos será dividido en los siguientes conjuntos: Entrenamiento, validación y prueba (figura 13). La división para estos será un 70:15:15 donde el 70% de las imágenes se utilizarán para entrenamiento, 15% para validación y el 15% restante para pruebas. El total de imágenes usadas es de 1112 para entrenamiento del modelo, 238 imágenes para la validación y 239 para realizar pruebas.

2.4 Aumento de datos

Para lograr que el modelo sea lo suficientemente robusto y pueda tener un buen desempeño en los diversos escenarios en los que se pueda encontrar, se usará la técnica de aumento de datos, la cual busca mitigar el sobreajuste. Se aumenta de forma artificial los datos

logrando que el modelo pueda aprender y generalizar de mejor forma debido a la diversidad de datos y así obtener una mejor precisión en las detecciones.

En la tabla 2 se resume el conjunto de técnicas usadas para el aumento de datos y en la figura 14 se muestra un ejemplo de cómo se ve el aumento de datos en una muestra, estas corresponden a la variabilidad de espacio de color (cambios de tono, saturación y brillo) y variabilidad geométrica (rotación, traslación, escalado).

Parámetro	Valor
hsv_h	0.1
hsv_s	0.7
hsv_v	0.4
Degrees	30
Translate	0.2
Scale	0.5
Shear	5.0
Fliplr	0.5

Tabla 2. Aumento de datos



Figura 14. Aumento de datos.

2.5 Entrenamiento

Para comenzar el entrenamiento del modelo es necesario ajustar ciertos valores de hiperparámetros los cuales ayudan a que el modelo minimice el error y tenga una mayor precisión en las detecciones. La tabla 3 muestra el conjunto de hiperparámetros usados para el entrenamiento.

Parámetro	Valor
Épocas	250
Optimizador	AdamW
Tasa de aprendizaje	0.0001
Momento	0.9
Lote	32
Tamaño de imagen	640

Tabla 3. Hiperparámetros usados para el entrenamiento.

3. Resultados

Los resultados obtenidos en las métricas se presentarán a continuación en la tabla 4. En la figura 15, 16 y 17 se muestra imágenes que forman parte del conjunto de pruebas donde el modelo realiza la detección de cúmulos de agua y se compara con diferentes versiones del modelo de YOLO. Se muestra como el modelo tiene un buen desempeño y es capaz de detectar la presencia de cúmulos de agua en diversas condiciones de luz y diversos tipos de caminos.

Modelo	Precisión	Recall	mAP@.50
YOLOV5	70.0	41.7	56.8
YOLOV8	78.9	45.1	64.0
YOLOV11	76.9	48.5	64.0

Tabla 4. Resultados de los modelos entrenados



Figura 15. Detección de YOLOV5



Figura 16. Detección de YOLOV8.



Figura 17. Detección de YOLOV11.

4. Discusión

La detección de cúmulos de agua es una tarea la cual es compleja debido a que el charco cambia dependiendo la luz que le incide y el ángulo en que se observa por lo cual es necesario tener un mayor número de muestras para poder abarcar la mayor cantidad de situaciones posibles, para así tener un modelo el cual pueda generalizar en el mayor número de escenario posibles. Si bien el modelo presentado tiene un buen rendimiento en diversas condiciones de luz, tiene ciertas fallas en las cuales no logra detectar ciertas acumulaciones de agua, en la figura 18 se muestra como el modelo falla al no detectar algunas de estas acumulaciones.



Figura 18. No detecciones.

De las tres versiones de YOLO la que obtuvo una mayor precisión fue la versión 8. Sin embargo, la que

tuvo menos detecciones fallidas, es decir, mayor recuperación, fue la versión 11, mientras que mAP tanto la versión 8 y 11 obtuvieron el mismo resultado. La versión 3 fue la que peor rendimiento obtuvo de los tres modelos. Esto se puede observar en la figura 19 donde tanto la versión 8 y 11 es capaz de detectar los dos cúmulos con una alta confianza figura 19 (a) y (b). Por el contrario, la versión 3 únicamente logra detectar uno con poca confianza figura 19 (c), en rojo la detección no lograda. También la versión 3 suele dividir los cúmulos en segmentos más pequeños figura 19 (f) mientras que las versiones superiores logran detectar los cúmulos grandes en una sola caja figura 19 (d) y (e).



Figura 19. Comparación entre versiones

En la página oficial de YOLO[20], se menciona que la versión 8 tiene, a lo largo del tiempo, un mayor soporte debido a la colaboración de terceros, en su implementación en entornos de producción. Por otro lado, El modelo Yolo V11 es más nuevo, pero tiene una menor integración de terceros en comparación a YOLO V8.

YOLOv8 supera a YOLOv5 debido a que la V8 introduce mejoras arquitectónicas, funcionales y de entrenamiento que incrementan la precisión (mAP) y la velocidad de inferencia, sin aumentar significativamente el tamaño del modelo.

5. Conclusión

La tarea de detectar cúmulos de agua en imágenes es compleja debido a la naturaleza del problema, la variabilidad de la luz y las diversas condiciones climáticas hacen que la detección en este tipo de tareas sea complicada. En este trabajo, el modelo implementado fue YOLO, en sus versiones 5, 8 y 11, para esta tarea. El mejor desempeño se tuvo con la

versión 8, considerando las diferentes condiciones de luz, de clima y de ambiente.

Se entrenó el modelo con una base de datos propia, para poder realizar el reconocimiento de las acumulaciones de agua usando la base de datos mencionada en el trabajo y con una topología característica de México.

Para el entrenamiento y pruebas realizadas, se usaron las tres versiones de YOLO, bajo las mismas condiciones. En general, todas tuvieron buen desempeño, pero con la versión 8 se obtuvo la mejor precisión del 78%, como se presenta en la tabla 3. Esta precisión es comparable con las reportadas por otros autores en el estado del arte. La diferencia principal es que las bases de datos usadas por ellos no son accesibles, por lo que no se pudo hacer pruebas con esas bases de datos, para tener una comparación confiable.

Finalmente, es posible la detección de cúmulos de agua en caminos con el uso de algoritmos de inteligencia artificial con un gran nivel de precisión. Si bien, aún el modelo presenta predicciones faltantes, es posible mejorar el desempeño del modelo, si se expande el tamaño y diversidad del conjunto de datos, añadiendo más muestras. Estas muestras deben ser obtenidas en diversos lapsos del día y bajo diversas condiciones climáticas.

Este trabajo abre la posibilidad de que en un futuro se realice la implementación de YOLO en vehículos autónomos terrestres con la ayuda de sistemas embebidos como NVIDIA Jetson o Raspberry Pi para poder evaluar la eficacia del modelo entrenado en tiempo real. Esto es gracias a que YOLO cuenta con versiones ligeras (lite) que permiten su implementación en este tipo de sistemas embebidos.

Referencias bibliográficas

- [1] EXPANSION, “Los siniestros de autos repuntan en México por las lluvias,” *EXPANSION*, México, Jul. 2023.
- [2] American Automobile Association; “Pothole Damage Costs U.S. Drivers \$3 Billion Annually,” <https://info.oregon.aaa.com/pothole-damage-costs-u-s-drivers-3-billion-annually/>.
- [3] Department of Transportation Federal Highway Administration, “How do Weather Events Impact Roads.”
- [4] Den, “Aquaplaning: qué es el hidropneumático, cuándo se produce el aquaplaning y qué hacer en ese caso,” [https://club.autodoc.es/magazin/aquaplaning-que-es-como-ocurre-y-como-evitarlo](https://club.autodoc.es/magazin/aquaplaning-que-es-como-ocurre-y-como-evitarlohttps://club.autodoc.es/magazin/aquaplaning-que-es-como-ocurre-y-como-evitarlo).
- [5] M. Lee, J. C. Kim, M. H. Cha, H. Lee, and S. Lee, “Identifying Puddles based on Intensity Measurement using LiDAR,” *Journal of Sensor Science and Technology*, vol. 32, no. 5, pp. 267–274, Sep. 2023, doi: 10.46670/JSST.2023.32.5.267.
- [6] N. Long, H. Yan, L. Wang, H. Li, and Q. Yang, “Unifying Obstacle Detection, Recognition, and Fusion Based on the Polarization Color Stereo Camera and LiDAR for the ADAS,” *Sensors*, vol. 22, no. 7, Apr. 2022, doi: 10.3390/s22072453.
- [7] H. Tahara, I. Ikegami, K. Takakura, T. Kato, and M. Nagata, “Puddle Detection for Avoidance Path Planning of Wheeled Mobile Robot Using Laser Reflection Intensity,” *IECON 2019 - 45th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, vol. 1, pp. 699–704, Dec. 2019.
- [8] M. Jakubec, E. Lieskovská, B. Bučko, and K. Záborská, “Comparison of CNN-Based Models for Pothole Detection in Real-World Adverse Conditions: Overview and Evaluation,” *Applied Sciences (Switzerland)*, vol. 13, no. 9, May 2023, doi: 10.3390/app13095810.
- [9] J. J. Qiao, X. Wu, J. Y. He, W. Li, and Q. Peng, “SWNet: A Deep Learning Based Approach for Splashed Water Detection on Road,” *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, vol. 23, no. 4, pp. 3012–3025, Apr. 2022, doi: 10.1109/TITS.2020.3029006.
- [10] A. Kumar and A. Choudhary, “Water-Puddle Segmentation Using Deep Learning in Unstructured Environments,” in *Proceedings of the 17th IEEE International Conference on Service Operations and Logistics, and Informatics, SOLI 2023*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2023. doi: 10.1109/SOLI60636.2023.10425657.
- [11] L. Juntao, N. Chuong, and Y. Shaodi, “Temporal 3D fully connected network for water-hazard detection,” *Digital Image Computing: Techniques and Applications (DICTA)*, pp. 1–5, 2019, doi: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/8945849>.
- [12] R. Zhang *et al.*, “ABCDWaveNet: Advancing Robust Road Ponding Detection in Fog through Dynamic Frequency-Spatial Synergy.”
- [13] M. S. C. Cruz, L. A. Ong, and A. N. Yumang, “Road Wetness Estimation Using Deep Learning Model,” *Engineering Proceedings*, vol. 92, no. 1, 2025, doi: 10.3390/engproc2025092051.
- [14] M. Maity, S. Banerjee, and S. Sinha Chaudhuri, “Faster R-CNN and YOLO based Vehicle detection: A Survey,” in *Proceedings - 5th International Conference on Computing Methodologies and Communication, ICCMC 2021*, Institute of Electrical

- and Electronics Engineers Inc., Apr. 2021, pp. 1442–1447. doi: 10.1109/ICCMC51019.2021.9418274.
- [15] J. Redmon, S. Divvala, R. Girshick, and A. Farhadi, “You only look once: Unified, real-time object detection,” in *Proceedings of the IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, IEEE Computer Society, Dec. 2016, pp. 779–788. doi: 10.1109/CVPR.2016.91.
- [16] W. Liu *et al.*, “SSD: Single Shot MultiBox Detector,” Dec. 2016, doi: 10.1007/978-3-319-46448-0_2.
- [17] R. Girshick, “Fast R-CNN.” [Online]. Available: <https://github.com/rbgirshick/>
- [18] Y. Zhao, B. Shi, X. Duan, W. Zhu, L. Ren, and C. Liao, “Research on road surface damage detection based on SEA-YOLO v8,” *PLoS One*, vol. 20, no. 6 JUNE, Jun. 2025, doi: 10.1371/journal.pone.0324439.
- [19] R. Padilla, S. L. Netto, and E. A. B. da Silva, “A Survey on Performance Metrics for Object-Detection Algorithms,” *International Conference on Systems, Signals and Image Processing (IWSSIP)*, pp. 237–242, 2020.
- [20] ultralytics, “YOLOv8 vs YOLO11: Una comparación técnica detallada,” <https://docs.ultralytics.com/es/compare/yolov8-vs-yolo11/#conclusion-and-recommendation>.

Detección e identificación de personas de imágenes obtenidas con drones utilizando aprendizaje profundo

Detection and identification of people from images obtained with drones using deep learning

Reyes Cerón, Mitzi Jocelyn, Ramos Arreguin, Juan Manuel, Galván Guerra, Rosalba, Pedraza Ortega, Jesús Carlos, Takács, András y Rivas Araiza, Edgar Alejandro

Afiliación: Facultad de Ingeniería

Universidad Autónoma de Querétaro y Unidad Profesional Interdisciplinaria de Ingeniería Campus Hidalgo (IPN) Santiago de Querétaro, México.

mjreyesc01@gmail.com; ORCID: [https://orcid.org/0009-0001-2179-3316]

juan.ramos@uaq.edu.mx; ORCID: [https://orcid.org/0000-0002-2604-9692]

rgalvang@ipn.mx; ORCID: [https://orcid.org/0000-0002-1945-2125]

caryoko@yahoo.com.mx; ORCID: [https://orcid.org/0000-0001-5125-8907]

andras.takacs@uaq.mx; ORCID: [https://orcid.org/0000-0003-2200-307X]

erivas@uaq.mx; ORCID: [https://orcid.org/0000-0002-0300-6462]

Resumen: Los vehículos aéreos no tripulados (UAV), comúnmente conocidos como drones, han ganado relevancia en la vigilancia, el monitoreo y la respuesta a emergencias debido a su capacidad para capturar vistas aéreas de amplias áreas. Sin embargo, la detección de personas a partir de imágenes aéreas sigue siendo un reto debido a las oclusiones, las variaciones de escala y los fondos complejos. Este artículo presenta la implementación y evaluación de un sistema de detección de personas utilizando la arquitectura YOLO y el conjunto de datos *VisDrone2019-DET*. El conjunto de datos se adaptó filtrando solo la clase de personas y convirtiendo las anotaciones a un formato de etiquetas compatible con YOLO. Los resultados experimentales muestran una intersección sobre unión (IoU) media de 0,70 y una precisión media (mAP@0.5) que oscila entre 0,50 y 0,80. Aunque el modelo mostró limitaciones en condiciones de oclusión y a pequeña escala, logró un rendimiento fiable para la detección aérea de personas con requisitos computacionales ligeros. Estos hallazgos destacan a YOLOv5s como una base prometedora para los sistemas de vigilancia basados en UAV, mientras que las mejoras futuras incluyen el uso de versiones avanzadas de YOLO y algoritmos de seguimiento de múltiples objetos.

Palabras clave: Drones; Inteligencia artificial; Procesamiento de imágenes; Detección de personas; Procesamiento de imágenes.

Abstract: Unmanned aerial vehicles (UAVs), more commonly known as drones, have become an integral part of surveillance, monitoring, and emergency response operations due to their ability to capture aerial views of large areas. However, detecting people from aerial imagery remains challenging due to occlusions, scale variations, and complex backgrounds. This paper presents the implementation and evaluation of a person detection system using the YOLO architecture and the *VisDrone2019-DET* dataset. The dataset was adapted by filtering only the person class and converting the annotations to a label format compatible with YOLO. The experimental results show an average Intersection over Union (IoU) of 0.70 and a mean Average Precision (mAP@0.5) ranging from 0.50 to 0.80. Despite the model's limitations in occlusion and small-scale conditions, it demonstrated reliable performance in aerial person detection with minimal computational requirements. These findings underline the potential of YOLOv5s as a reliable foundation for UAV-based surveillance systems, with plans for future enhancements including the integration of advanced YOLO versions and multi-object tracking algorithms.

Keywords: Drones; Artificial intelligence; Image processing; Person detection; Image processing.

1. Introducción

A lo largo de los últimos años, el desarrollo de los vehículos aéreos no tripulados (UAVs), comúnmente conocidos como drones, ha experimentado un notable crecimiento. Inicialmente han sido utilizados para aplicaciones militares, pero actualmente se han consolidado como herramientas versátiles en sectores civiles, industriales y de seguridad. Su integración con sistemas de visión por computadora e inteligencia artificial ha abierto nuevas posibilidades para la vigilancia, el monitoreo y la asistencia en operaciones críticas.

Además, se ha observado que, los modelos de detección de la arquitectura YOLO (*You Only Look Once*) han sido ampliamente utilizados en la identificación de peatones y objetos en contextos desafiantes. En 2019, Depei Zhang integro YOLO en UAVs, en su trabajo demostró la viabilidad de implementar detección de peatones en tiempo real a bordo de drones, resaltando tanto la efectividad del enfoque como los desafíos asociados al ángulo de visión aéreo, la oclusión y la latencia computacional [1]. En 2021, Luis G. realizo una revisión donde comparó técnicas de visión por computadora para sistemas de percepción de vehículos autónomos (AVs), centrándose en la detección de peatones y vehículos [2].

La detección de peatones y vehículos es crucial para la seguridad y navegación de los AVs. Sin embargo, la generalización de los algoritmos puede ser limitada si se utilizan solo conjuntos de datos tradicionales como *Caltech* y *KITTI*, que son base de datos útiles para tareas de detección de objetos y reconocimiento de peatones.

Otro trabajo que se publicó en 2022 identifica problemas críticos en la detección de peatones, como la oclusión, la deformación y la baja calidad de las imágenes, y destacó el potencial de las imágenes multispectrales para mejorar la detección [3]. En este trabajo Sundas Iftikhar evaluó YOLOv4 y otros métodos en escenarios de vehículos autónomos, logrando tasas de precisión superiores al 72% en condiciones nocturnas para mejorar la detección en condiciones de iluminación variables [3]. Los resultados muestran el potencial de YOLO en la detección de personas, aunque también evidencia limitaciones ya que no puede lidiar efectivamente con la oclusión, la deformación de objetos, la baja calidad

de las imágenes, además que las condiciones de iluminación pueden afectar su rendimiento[3].

En 2023, Chanyoung Oh aplicó el modelo YOLOv5s en imágenes aéreas 4K para detección de peatones, alcanzando una precisión del 71.48% en la base de datos MOT15 mediante técnicas de refuerzo de confianza basadas en trayectorias [4]. En 2024, Feilong W. propuso YOLO-ESL, que es una red basada en YOLOv7 que incorpora los módulos ELAN-SA (para la extracción eficiente de características en objetos pequeños) y LGA (atención local-global para fusión multiescala), además de un esquema CIOU-NMS para manejar solapamientos elevados, esto con el objetivo de mejorar la precisión en la detección de peatones, en sus experimentos reportaron un aumento significativo en la precisión, alcanzando un 93.7% en VOC2012-pedestrian, lo cual demuestra su eficacia frente a oclusiones y blancos de baja resolución [5]. En esta misma línea, Jianjun Ni propuso una versión mejorada de YOLOv8s enfocada en la detección de objetos pequeños en imágenes aéreas, incorporando módulos como PMSE (extracción paralela multiescala), SCFPN (pirámide con compensación de escala) y una cabeza adicional para objetos diminutos, además de la función de pérdida WIoU. Estos cambios permitieron mejorar la precisión y *recall* en escenarios UAV caracterizados por alta densidad y ruido visual [6].

Mustapha O. en 2025 desarrollo DSR-YOLO, un modelo ligero y eficiente que aborda la detección de peatones en escenarios con variaciones de escala y fondos complejos. Este trabajo responde a la necesidad de arquitecturas con bajo consumo de recursos computacionales, capaces de ejecutarse en UAVs sin sacrificar desempeño [7]. En otra línea de investigación se ha centrado en el dominio infrarrojo (IR), donde Chao W. presento YOLO-UIR, una arquitectura ligera y precisa diseñada específicamente para imágenes IR capturadas desde UAV. El modelo integra módulos como *Efficient* C2f, LSP y BFIF, que permiten mejorar la percepción espacial de largo alcance y la fusión semántica cruzada, alcanzando resultados sobresalientes en los conjuntos de datos *DroneVehicle* (71.1%) y HIT-UAV (90.7%), este avance resulta útil para escenarios nocturnos o de baja visibilidad, donde las imágenes RGB no son suficientes [8].

Estos trabajos proponen un enfoque experimental riguroso y el uso de grandes bases de datos recolectadas mediante UAVs en entornos reales. Esto ha permitido el desarrollo de sistemas con una precisión superior, además que son capaces de operar en condiciones ambientales variables y escenarios complejos.

Una de las aplicaciones con mayor potencial en el área de drones es la identificación de personas desde vistas aéreas, ya que puede resultar útil en aplicaciones de búsqueda y rescate, en la supervisión de multitudes durante eventos públicos y el apoyo en situaciones de emergencia. Sin embargo, la detección e identificación de personas en imágenes capturadas por drones presenta algunos desafíos por ejemplo en la variabilidad de condiciones de iluminación, la oclusión parcial de los sujetos, el tamaño reducido de las personas debido a la altitud de vuelo, la velocidad de captura debido al movimiento del dron, y los cambios en el ángulo de visión. Estos factores influyen directamente en la precisión de los algoritmos y limitan su implementación en escenarios reales.

En este trabajo se evalúa el desempeño de modelos de detección basados en YOLO, específicamente YOLOv5s preentrenado con la base de datos COCO [9], para la tarea de identificación de personas en la base de datos *VisDrone*, para analizar su desempeño en aplicaciones de vigilancia y monitoreo aéreo basados en el uso de las métricas *precision*, *recall* y *F1 score*. Para esto, se propone implementar los siguientes procesos: preparar y preprocesar la base de datos *VisDrone*, filtrando la clase persona y adecuando sus anotaciones a un formato de etiquetas compatible con YOLO; así mismo, implementar un flujo de trabajo de detección de personas en imágenes aéreas mediante el modelo YOLOv5s.

2. Materiales y métodos

Se propone el uso de la metodología de la Figura 1, que consta de cuatro etapas principales del proceso para la detección de personas en imágenes aéreas con YOLO.



Figura 1. Metodología para la detección de personas en imágenes aéreas con YOLO.

2.1. Base de datos

Para la identificación de personas se empleó el conjunto de datos público *VisDrone*, el cual es una base de datos de referencia en tareas de detección de objetos desde drones [10]. Este conjunto fue recopilado sistemáticamente en

catorce ciudades de China, utilizando diferentes plataformas aéreas como *DJI Mavic* y *Phantom*, bajo condiciones variadas de clima, iluminación y escenarios urbanos y suburbanos, lo que le otorga una alta diversidad y representatividad para aplicaciones de monitoreo aéreo. La base de datos está organizada en cuatro subcarpetas principales, las cuales se diseñaron para diferentes propósitos:

- *VisDrone2019-DET (Object Detection in Images)*: Esta carpeta está diseñada para la detección de objetos en imágenes estáticas.
- *VisDrone2019-VID (Object Detection in Videos)*: Su propósito es para la detección de objetos en secuencias de video.
- *VisDrone2019-MOT (Multi-Object Tracking)*: Diseñada para el seguimiento de múltiples objetos a lo largo del tiempo.
- *VisDrone2019-SOT (Single Object Tracking)*: Diseñada para el seguimiento de un solo objeto objetivo en cada secuencia.

Para este artículo se utilizó la subcarpeta *VisDrone2019-DET* con las siguientes características:

- Contiene 10,209 imágenes con anotaciones cuadro a cuadro.
- Las imágenes presentan una resolución máxima de 2000×1500 píxeles, lo que permite analizar tanto objetos grandes como muy pequeños en el campo visual.
- Se divide en:
 - 6,471 imágenes de entrenamiento (*train*).
 - 548 imágenes de validación (*val*).
 - 1,580 imágenes de *test-challenge*.
 - 1,610 imágenes de *test-dev*.
- Cada imagen tiene un archivo de anotación con la posición, tamaño, clase, oclusión y truncamiento de cada objeto.

En cuanto a las anotaciones, *VisDrone* define 10 clases de objetos, entre las cuales se encuentran persona, coche, bicicleta, moto, autobús, camión, triciclo, carretilla y toldo-triciclo. En la Figura 2 se muestra un ejemplo de las imágenes que contiene la base de datos *VisDrone2019-DET*, donde se pueden observar varias clases de objetos, como personas, moto, coche, etc.



Figura 2. Ejemplo de imágenes anotadas en la base de datos *VisDrone2019-DET*, mostrando la clase persona y otros objetos.

Adicionalmente, las anotaciones que se encuentran en esta base de datos incluyen atributos relacionados con el nivel de oclusión y truncamiento de los objetos [11]:

$$\delta = \frac{|B_{obj} \cap B_{occl}|}{|B_{obj}|} \quad (1)$$

donde δ indica el grado de oclusión: 0% (sin oclusión), 0–50% (parcial) y 50–100% (severa). Asimismo, se incorpora el atributo de truncamiento, que señala si un objeto se encuentra cortado por los límites de la imagen, lo que incrementa la dificultad de detección en escenarios reales.

2.2. Preprocesamiento de Imágenes

Antes del entrenamiento, se aplicaron transformaciones con el fin de adecuar los datos a los requerimientos del modelo YOLO. Las transformaciones aplicadas se listan a continuación:

- Conversión de las anotaciones a las coordenadas normalizadas entre 0 y 1 [12] :

$$x = \frac{x_{min} + x_{max}}{2W} \quad (2)$$

$$y = \frac{y_{min} + y_{max}}{2H} \quad (3)$$

$$w = \frac{x_{max} - x_{min}}{W} \quad (4)$$

$$h = \frac{y_{max} - y_{min}}{H} \quad (5)$$

donde W y H son el ancho y alto de la imagen.

- Filtrado de clases, conservando únicamente la categoría persona.
- Redimensionamiento de todas las imágenes a 640×640 píxeles para mantener consistencia en la entrada del modelo.

- Aumento de datos (rotaciones, escalado, cambios de brillo y contraste) para incrementar la variabilidad de la base de datos y mejorar la capacidad de generalización del modelo.

2.3. Arquitectura Yolo

YOLO permite la detección y clasificación de objetos en tiempo real mediante un único procesamiento de la imagen [13]. La arquitectura consta de tres bloques principales :

- *Backbone*: encargado de extraer características relevantes de la imagen. En YOLOv5 se utiliza CSPDarknet53 y en YOLOv8 variantes ligeras de convoluciones profundas.
- *Neck*: fusiona características multiescala mediante módulos como PANet o FPN, optimizando la detección de objetos pequeños.
- *Head*: genera las predicciones finales de las cajas delimitadoras, las clases y la puntuación de confianza.

En cada celda de la cuadrícula, el modelo predice:

$$(x, y, w, h, C, p_{cls}) \quad (6)$$

Donde (x, y) son las coordenadas normalizadas del centro de la caja, w y h su ancho y alto, C la confianza de detección y p_{cls} la probabilidad asociada a la clase (persona).

2.4. Función de pérdida

El entrenamiento del modelo optimiza una función de pérdida compuesta por tres términos [14]:

$$L = L_{loc} + L_{conf} + L_{cls} \quad (7)$$

Donde L_{loc} es la pérdida de localización (error en las coordenadas de las cajas), L_{loc} pérdida de confianza de objeto y L_{cls} pérdida de clasificación de la clase.

Pérdida de localización

Para medir la precisión espacial entre las cajas predichas y las reales, YOLO utiliza la *Complete Intersection over Union* (CIoU), la cual penaliza no solo la superposición, sino también la distancia y la relación de aspecto entre las cajas.

$$L_{loc} = 1 - \text{CIoU}(B_p, B_{gt}) \quad (8)$$

donde la CIoU se define como:

$$\text{CIoU} = \text{IoU} - \frac{\rho^2(b_p, b_{gt})}{c^2} - \alpha v \quad (9)$$

Aquí, $\rho^2(b_p, b_{gt})$ representa la distancia euclidiana entre los centros de las cajas predicha y real, c es la diagonal del cuadro

mínimo que las contiene, v evalúa la consistencia del aspecto (relación ancho–alto), y α es un factor de ajuste.

Pérdida de confianza

La pérdida de confianza mide la probabilidad de que una celda contenga un objeto y se calcula mediante *Binary Cross-Entropy* (BCE):

$$L_{conf} = -\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [y_i \log(\hat{y}_i) + (1 - y_i) \log(1 - \hat{y}_i)] \quad (10)$$

donde $y_i \in \{0,1\}$ indica si existe un objeto en la celda, $\hat{y}_i$ es la probabilidad predicha y N el número total de predicciones.

Pérdida de clasificación

Finalmente, la pérdida de clasificación evalúa la correspondencia entre la clase real y la predicha, también mediante *Binary Cross-Entropy*:

$$L_{cls} = -\frac{1}{C} \sum_{c=1}^C [p_c \log(\hat{p}_c) + (1 - p_c) \log(1 - \hat{p}_c)] \quad (11)$$

donde C es el número de clases (en este caso $C = 1$, correspondiente a “persona”), p_c es la etiqueta real y $\hat{p}_c$ la probabilidad predicha.

Función de pérdida total ponderada

La función de pérdida total utilizada durante el entrenamiento combina los tres términos anteriores con pesos de ajuste:

$$L = \lambda_{loc} L_{loc} + \lambda_{conf} L_{conf} + \lambda_{cls} L_{cls} \quad (12)$$

donde los coeficientes λ_{loc} , λ_{conf} y λ_{cls} regulan la contribución de cada componente (comúnmente 1.0, 1.0 y 0.5, respectivamente).

Esta formulación permite optimizar de manera conjunta la precisión espacial, la confianza de detección y la clasificación del objeto, logrando un balance entre localización y exactitud en las predicciones.

2.5. Métricas de evaluación

La calidad de las predicciones se evaluó mediante *Intersection over Union* (IoU) [15]:

$$IoU = \frac{|B_{pred} \cap B_{gt}|}{|B_{pred} \cup B_{gt}|} \quad (13)$$

Donde B_{pred} es la caja predicha y B_{gt} la caja real.

A partir del IoU se calcularon las métricas estándar:

$$Precision = \frac{TP}{TP + FP} \quad (14)$$

$$Recall = \frac{TP}{TP + FN} \quad (15)$$

La medida F1 combina precisión y recall:

$$F1 = 2 \cdot \frac{Precision \cdot Recall}{Precision + Recall} \quad (16)$$

La métrica global se reporta como mAP (*mean Average Precision*):

$$mAP = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N AP_i \quad (17)$$

Donde N es el número de clases ($N=1$).

2.6. Configuración de entrenamiento.

El modelo YOLOv5s se entrenó utilizando imágenes redimensionadas a 640×640 píxeles, con un tamaño de lote (*batch size*) de 16 y una tasa de aprendizaje inicial (*learning rate*) de 0.01. Se realizaron experimentos con 50 y 150 épocas con el objetivo de analizar el efecto del número de iteraciones sobre la precisión y estabilidad del modelo.

Durante el entrenamiento, se aplicaron funciones de pérdida basadas en CIOU (*Complete Intersection over Union*) para optimizar la localización de las cajas delimitadoras, junto con los términos de confianza y clasificación. Estas configuraciones se seleccionaron considerando el balance entre precisión y velocidad requerido para la detección en tiempo real en sistemas aéreos no tripulados.

2.7. Entorno y software

El proceso de entrenamiento se llevó a cabo en el entorno Google Colab [16]. Se emplearon el framework PyTorch y las librerías de Ultralytics correspondientes a las arquitecturas YOLOv5 y YOLOv8 [17], [18].

La ejecución se realizó con aceleración por GPU (NVIDIA Tesla T4), lo que permitió optimizar los tiempos de cómputo y facilitar el ajuste de los hiperparámetros.

Adicionalmente, se utilizaron herramientas auxiliares como OpenCV para el preprocesamiento de imágenes y Matplotlib para la visualización de resultados, asegurando la reproducibilidad del flujo de trabajo experimental.

3. Resultados

El modelo YOLOv5s fue seleccionado por su ligereza (7.2 millones de parámetros, 224 capas), lo cual lo hace adecuado para pruebas en drones y hardware con recursos limitados. Durante la fase de experimentación con la base de datos VisDrone2019-DET, se utilizó la clase persona como único objetivo de detección. Donde se obtuvieron los siguientes resultados:

Tabla 1. Resultados del modelo YOLOv5s y YOLOv8

Metricas	YOLOv5s	YOLOv8
<i>Accuracy</i>	0.845	0.919
<i>Precision</i>	0.985	0.937
<i>Recall</i>	0.846	0.974
<i>F1-score</i>	0.91	0.955

Podemos interpretar según los resultados mostrados en la

Tabla 1 donde se comparan los modelos YOLOv5s y YOLOv8s, que existe un desempeño superior del modelo más reciente (YOLOv8s) en la tarea de detección de personas sobre el conjunto de validación de la base de datos *VisDrone*. En términos de exactitud global (*Accuracy*), YOLOv8s alcanzó un valor de 0.919, superando a YOLOv5s (0.845), lo que indica una mejor capacidad para clasificar correctamente las detecciones verdaderas frente a las falsas.

Aunque YOLOv5s presentó una mayor precisión individual (*Precision* = 0.985), reflejando una menor proporción de falsos positivos, su capacidad para detectar todos los objetos presentes fue menor (*Recall* = 0.846). En contraste, YOLOv8s logró un *recall* de 0.974, lo que implica una detección más completa de los individuos presentes en las imágenes, incluso en condiciones de oclusión o variación de escala.

El equilibrio entre ambas métricas se refleja en el *F1-score*, donde YOLOv8s alcanzó 0.955, frente a 0.910 obtenido por YOLOv5s. Este incremento del 5% en el *F1-score* demuestra que YOLOv8s logra un balance más estable entre precisión y exhaustividad.

En la Figura 3 se muestra de forma gráfica el rendimiento comparativo entre YOLOv5s (línea azul) y YOLOv8s (línea naranja) en la tarea de detección de personas sobre el conjunto de validación de la base de datos *VisDrone*. De forma general, se observa que YOLOv8s mantiene una tendencia más uniforme y

elevada en la mayoría de las métricas evaluadas, lo que refleja un rendimiento más consistente y una mayor capacidad de generalización frente a diferentes condiciones de iluminación, escala y oclusión típicas de entornos aéreos.

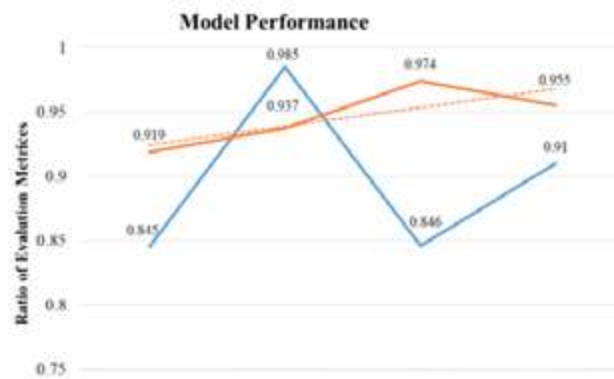


Figura 3. Comparación del rendimiento entre los modelos YOLOv5s y YOLOv8s sobre la base de datos *VisDrone* considerando las métricas *Accuracy*, *Precision*, *Recall* y *F1-Score*.

Finalmente, en la Tabla 2 se observa que las métricas de localización espacial (*IoU* = 0.76) y desempeño global (*mAP@0.5* = 0.63) también respaldan la superioridad del modelo YOLOv8s respecto a YOLOv5s (*IoU* = 0.70, *mAP@0.5* = 0.57), confirmando una mejor alineación entre las cajas predichas y las reales, así como una mayor capacidad general de detección.

Estos resultados pueden atribuirse a las mejoras estructurales introducidas en la arquitectura YOLOv8, que adopta un esquema *anchor-free*, bloques C2f, y un *neck* optimizado, permitiendo un aprendizaje eficiente frente a variaciones de tamaño y perspectiva. En consecuencia, YOLOv8s demuestra ser una alternativa más eficiente para la detección de personas en escenarios aéreos y dinámicos, típicos de aplicaciones con drones.

Tabla 2. Resultados de las métricas de localización espacial del modelo YOLOv5s y YOLOv8.

Metricas	YOLOv5s	YOLOv8
<i>IoU</i>	0.70	0.75
<i>mAP@0.5</i>	0.57	0.63

En la Figura 3 se muestra una escena natural en un entorno abierto, donde el modelo logra identificar correctamente múltiples personas y bicicletas a diferentes distancias y tamaños aparentes. Los valores de confianza asignados oscilan entre 0.25 y 0.77, lo que evidencia una correcta generalización del modelo, aunque algunas detecciones de baja confianza pueden deberse a oclusiones parciales o pequeña escala de los

objetos. También se observan pocos falsos positivos, por ejemplo, “cow” o “horse” con confianzas menores a 0.3, típicos de las condiciones aéreas de la base de datos.



Figura 3. Detección de múltiples personas y objetos en campo abierto.

En la Figura 4 se observa un entorno urbano, el modelo detecta con alta precisión a los peatones presentes en diferentes posiciones y distancias, con valores de confianza comprendidos entre 0.29 y 0.87. Asimismo, se observa una detección secundaria correcta de una motocicleta con confianza moderada (0.32), lo cual demuestra que el modelo conserva la capacidad multiclase adquirida durante el preentrenamiento con COCO.



Figura 4. Detección de múltiples personas y objetos en un entorno urbano.

En conjunto, estas imágenes ilustran el comportamiento cualitativo del modelo YOLO en escenarios reales, mostrando una detección eficiente y coherente con las métricas cuantitativas reportadas en la Tabla 1 y la Figura 4. Las detecciones evidencian una buena delimitación de las cajas ($IoU > 0.5$) y una correcta asignación de clases en la mayoría de los casos. Las leves confusiones observadas en objetos distantes o parcialmente visibles se atribuyen a las condiciones de captura aérea, donde el tamaño de los objetos en píxeles se reduce considerablemente.

Estos resultados cualitativos confirman que el modelo propuesto es capaz de detectar personas de forma eficiente en distintos contextos y alturas de vuelo, consolidando su

potencial para aplicaciones de vigilancia aérea, monitoreo de multitudes y sistemas autónomos basados en drones.

En la Tabla 3 se presentan resultados reportados por otros autores y su comparación con el presente trabajo:

Tabla 3. Comparación de resultados reportados con otros autores.

Autor	Método	Base de datos	Resultados
Chanyoung Oh	YOLOv5s + SORT	MOT15	LocA=71.48% OTA=18.38%
Sundas Iftikhar	YOLOv4, Faster R-CNN, etc	Caltech, KITTI	Accuracy = 72.10% (dia), 64.20% (noche), IoU=0.75, mAP=0.5–0.85
Propios	YOLOv5s (COCO + VisDrone)	VisDrone	IoU = 0.70; Accuracy = 0.60; Recall = 0.55; mAP@0.5 = 0.58
Propios	YOLOv8s (COCO + VisDrone)	VisDrone	IoU = 0.76; Accuracy = 0.91; Recall = 0.97; mAP@0.5 = 0.63

A diferencia de los trabajos en MOT15 y KITTI, la base de datos *VisDrone* representa un escenario más desafiante debido a la altitud, tamaño reducido de las personas y alta variabilidad ambiental.

Aunque los valores de precisión y recall obtenidos son inferiores a los reportados en condiciones más controladas (por ejemplo, Caltech o KITTI), la mAP alcanzada es competitiva, lo que muestra que YOLOv5s puede generalizar en entornos aéreos.

Estos resultados sugieren que, para aplicaciones en drones, versiones más complejas de YOLO (YOLOv5m, YOLOv8) o el uso de técnicas de mejora (*data augmentation* avanzado, *fine-tuning* con más épocas) podrían mejorar significativamente la identificación.

Estos resultados demuestran que, si bien el modelo es capaz de detectar personas en escenarios complejos, su desempeño está limitado por factores como:

Oclusiones parciales o totales.

Personas cubiertas por árboles o mobiliario urbano reducen la tasa de detección.

Variaciones de escala. La altura de vuelo hace que muchas personas aparezcan como objetos muy pequeños (<20 píxeles de alto).

Entornos dinámicos. Elementos móviles como bicicletas o motocicletas son confundidos con peatones.

En general, el modelo logra una detección en tiempo real adecuada, lo cual es clave para aplicaciones en drones de vigilancia o monitoreo. No obstante, los resultados sugieren que para alcanzar una mayor precisión sería necesario incrementar el número de épocas y técnicas de aumento de datos.

5. Discusión

Los resultados obtenidos permiten analizar la evolución del rendimiento entre las versiones YOLOv5s y YOLOv8s, así como su capacidad de generalización en entornos aéreos complejos.

En comparación con los modelos descritos en la literatura (Tabla 3), que se entrenaron en bases de datos controladas como Caltech o KITTI, los modelos implementados en *VisDrone* se enfrentan a condiciones más desafiantes debido a la altitud de vuelo, la presencia de oclusiones y la reducción del tamaño de los objetos.

En este contexto, YOLOv8s alcanzó un $mAP@0.5$ de 0.63, superando el rendimiento de YOLOv5s (0.57) y mostrando mejoras consistentes en métricas como IoU, *recall* y *F1-score*. Estas diferencias se atribuyen a los cambios arquitectónicos del modelo, como el esquema anchor-free y la incorporación del bloque C2f, que permite una extracción de características más profunda y eficiente.

Como se observa en las figuras 4 y 5, YOLOv8s presenta una mayor estabilidad en escenarios reales, con detecciones más precisas de peatones, incluso cuando estos se encuentran parcialmente ocultos o en movimiento. A diferencia de YOLOv5s, que mostró mayor precisión, pero menor sensibilidad, YOLOv8s logra un mejor equilibrio entre precisión y cobertura de detección, reduciendo los falsos negativos.

No obstante, se identificaron limitaciones propias de la base de datos *VisDrone*, como la pérdida de detecciones en objetos de muy baja resolución y las confusiones con objetos móviles (por ejemplo, bicicletas o motocicletas). Estos desafíos son inherentes a la captura aérea y sugieren la necesidad de estrategias complementarias, como el aumento de datos, el entrenamiento con imágenes térmicas o la integración de módulos de atención que refuercen la detección de detalles finos.

De esta manera, el modelo demuestra su potencial para tareas de vigilancia inteligente, monitoreo urbano y sistemas de seguridad automatizados, donde se requiere equilibrio entre eficiencia computacional y precisión en la detección.

6. Conclusión

En este trabajo se desarrolló un modelo de detección de personas basado en las arquitecturas YOLOv5s y YOLOv8s, utilizando la base de datos *VisDrone* como base experimental.

Los resultados obtenidos evidencian que YOLOv8s supera a YOLOv5s en las principales métricas de evaluación, alcanzando un IoU de 0.76, un F1-score de 0.955 y un $mAP@0.5$ de 0.63, lo que representa una mejora significativa en la detección de personas en imágenes aéreas.

El modelo mostró una detección robusta y en tiempo real, con capacidad para adaptarse a distintas alturas y entornos, validando su aplicabilidad en sistemas de vigilancia aérea, rescate y monitoreo urbano.

No obstante, se identificaron áreas de mejora relacionadas con la detección de personas parcialmente ocluidas y la confusión con objetos dinámicos.

Como trabajo futuro, se propone incrementar la cantidad de datos de entrenamiento mediante técnicas de aumento (data augmentation) y explorar la integración de información multispectral o térmica para mejorar la detección en condiciones de baja visibilidad.

Asimismo, se considera relevante la incorporación de técnicas de seguimiento de múltiples objetos (MOT) y de aprendizaje multimodal, que permitirían ampliar el alcance del modelo hacia sistemas de análisis de comportamiento o conteo de personas en tiempo real.

Se puede concluir que el modelo YOLOv8s constituye una solución eficiente, ligera y precisa para la detección de personas desde drones, mostrando un equilibrio óptimo entre velocidad, precisión y adaptabilidad, lo que lo posiciona como una herramienta viable para futuras implementaciones en entornos de vigilancia y control inteligente.

7. Patentes

Los autores declaran que no existen patentes derivadas del trabajo presentado en este manuscrito.

Fuentes de financiamiento

Este trabajo contó con el apoyo de la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (Secihti) en forma de beca de apoyo académico concedida a la autora durante la realización de la investigación.

Conflictos de interés

Los autores declaran que no existen conflictos de interés.

Los financiadores no tuvieron participación en el diseño del

estudio; en la recolección, análisis o interpretación de los datos; en la redacción del manuscrito; ni en la decisión de publicar los resultados.

Abreviaturas

Las siguientes abreviaturas se utilizan en este manuscrito:

UAVs: Vehículos aéreos no tripulados

YOLO: You Only Look Once

AVs: vehículos autónomos

PMSE: Extracción paralela multiescala

SCFPN: pirámide con compensación de escala

LSP: Long-range Spatial Perception

BFIF: Bi-directional Feature Interaction Fusion

IR: Infrarrojo

HIT-UAV: Harbin Institute of Technology– Unmanned Aerial Vehicle dataset

RGB: Red, Green, Blue

DJI: Dà-Jiāng Innovations

BCE: Binary Cross-Entropy

CIOU: Complete Intersection over Union

IoU: Intersection over Union

GPU: Graphics Processing Unit

mAP: mean Average Precision

8. Referencias bibliográficas

- [1] Depei Zhang Sr. *et al.*, “Using YOLO-based pedestrian detection for monitoring UAV”, presentado en Proc.SPIE, may 2019, p. 110693Y. doi: 10.1117/12.2524219.
- [2] L. G. Galvao, M. Abbod, T. Kalganova, V. Palade, y M. N. Huda, “Pedestrian and Vehicle Detection in Autonomous Vehicle Perception Systems—A Review”, *Sensors*, vol. 21, núm. 21, p. 7267, ene. 2021, doi: 10.3390/s21217267.
- [3] S. Iftikhar, Z. Zhang, M. Asim, A. Muthanna, A. Koucheryavy, y A. A. Abd El-Latif, “Deep Learning-Based Pedestrian Detection in Autonomous Vehicles: Substantial Issues and Challenges”, *Electronics*, vol. 11, núm. 21, Art. núm. 21, ene. 2022, doi: 10.3390/electronics11213551.
- [4] C. Oh, M. Lee, y C. Lim, “Towards Real-Time On-Drone Pedestrian Tracking in 4K Inputs”, *Drones*, vol. 7, p. 623, oct. 2023, doi: 10.3390/drones7100623.
- [5] F. Wang, X. Yang, y J. Wei, “YOLO-ESL: An Enhanced Pedestrian Recognition Network Based on YOLO”, *Appl. Sci.*, vol. 14, núm. 20, p. 9588, ene. 2024, doi: 10.3390/app14209588.
- [6] J. Ni, S. Zhu, G. Tang, C. Ke, y T. Wang, “A Small-Object Detection Model Based on Improved YOLOv8s for UAV Image Scenarios”, *Remote Sens.*, vol. 16, núm. 13, p. 2465, ene. 2024, doi: 10.3390/rs16132465.
- [7] M. Oussouaddi, O. Bouazizi, A. E. mourabit, Z. el A. Alaoui Ismaili, Y. Attaoui, y M. Chentouf, “DSR-YOLO: A lightweight and efficient YOLOv8 model for enhanced pedestrian detection”, *Cogn. Robot.*, vol. 5, pp. 152–165, ene. 2025, doi: 10.1016/j.cogr.2025.04.001.
- [8] C. Wang, R. Wang, Z. Wu, Z. Bian, y T. Huang, “YOLO-UIR: A Lightweight and Accurate Infrared Object Detection Network Using UAV Platforms”, *Drones*, vol. 9, núm. 7, p. 479, jul. 2025, doi: 10.3390/drones9070479.
- [9] Ultralytics, “COCO”. Consultado: el 9 de octubre de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://docs.ultralytics.com/es/datasets/detect/coco>
- [10] Redmon, Joseph; Farhadi, Ali., “VisDrone-Dataset”. GitHub, https://github.com/VisDrone/VisDrone-Dataset?utm_source=chatgpt.com, 2019. [Imágenes (.jpg), videos (.avi), anotaciones (.txt)]. Disponible en: <https://github.com/VisDrone/VisDrone-Dataset>
- [11] P. F. Zhu, L. Wen, X. Bian, H. Ling, y Q. Hu, “Vision Meets Drones: A Challenge”, *ArXiv*, abr. 2018, Consultado: el 9 de octubre de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.semanticscholar.org/paper/Vision-Meets-Drones%3A-A-Challenge-Zhu-Wen/98bf42055160845e6f8f3c022298e3b8e4e55f80>
- [12] J. Redmon, S. Divvala, R. Girshick, y A. Farhadi, “You Only Look Once: Unified, Real-Time Object Detection”, en *2016 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, Las Vegas, NV, USA: IEEE, jun. 2016, pp. 779–788. doi: 10.1109/CVPR.2016.91.
- [13] K. Zoumana, “Explicación de la detección de objetos YOLO: Guía para principiantes”. Consultado: el 9 de octubre de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.datacamp.com/blog/yolo-object-detection-explained>
- [14] Z. Zheng, P. Wang, W. Liu, J. Li, R. Ye, y D. Ren, *Distance-IoU Loss: Faster and Better Learning for Bounding Box Regression*, vol. 34. 2020, p. 13000. doi: 10.1609/aaai.v34i07.6999.
- [15] Ultralytics, “Métricas de Rendimiento de YOLO”. Consultado: el 9 de octubre de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://docs.ultralytics.com/es/guides/yolo-performance-metrics>
- [16] Google LLC, *Google Colab*. Consultado: el 9 de octubre

de 2025. [En línea]. Disponible en:

<https://colab.research.google.com/>

[17] Ultralytics, “YOLOv5”. Consultado: el 9 de octubre de 2025. [En línea]. Disponible en:

<https://docs.ultralytics.com/es/models/yolov5>

[18] Ultralytics, “YOLOv8”. Consultado: el 9 de octubre de 2025. [En línea]. Disponible en:

<https://docs.ultralytics.com/es/models/yolov8>

Hacia una valuación integral de startups: propuesta de un modelo híbrido que incorpora factores cualitativos

Toward a Comprehensive Valuation of Startups: A Hybrid Model Incorporating Qualitative Factors

Arroyo Navarro, Rosa Hilda

Afiliación: División de Estudios de Posgrado e Investigación, Facultad de Ingeniería

Universidad Autónoma de Querétaro

Santiago de Querétaro, Querétaro, México.

hildaarroyon@gmail.com; ORCID (ORCID: [https://orcid.org/0009-0005-2515-0835])

Resumen

Debido a la falta de historial financiero y la consolidación de las empresas en etapa inicial, la valoración de estas presenta limitantes, en especial debido a la falta de métodos adecuados para condiciones tan particulares, por tanto, el presente artículo expresa la propuesta de un modelo híbrido que integra variables cualitativas y cuantitativas a través de herramientas ya usadas en el campo de la valuación como la proyección de ingresos, múltiplos financieros por sector y la integración de un factor integral ponderado con el Proceso Jerárquico Analítico (AHP). Este modelo fue aplicado a tres casos prácticos en los que se observaron resultados conservadores y tras hacer ajustes en el múltiplo del sector siguiendo la línea por etapas se obtienen valores más apegados a la realidad. El modelo facilita decisiones más objetivas combinando datos financieros y cualitativos de la empresa sujeto.

Palabras clave: VAL; Valuación de Empresas; Startups; Modelos Híbridos; Factores Cualitativos.

Abstract

Due to the lack of financial history and the consolidation challenges faced by early-stage companies, their valuation presents significant limitations, particularly because of the absence of methods suited to such specific conditions. This article proposes a hybrid model that integrates qualitative and quantitative variables through tools already used in the field of valuation, such a revenue projection, sector financial multiples, and the incorporation of a comprehensive factor weighted using the Analytic Hierarchy Process (AHP). The model was applied to three case studies, where conservative results were initially observed. However, after adjusting the sector multiple according to the companies' stage of development, the valuations obtained were closer to reality. The model facilitates more objective decision-making by combining financial data and qualitative aspects of the subject company.

Keywords: VAL; Business Valuation; Startups; Hybrid Models; Qualitative Factors.

1. Introducción

Desde finales del siglo XX, la valoración de empresas en México ha sido una disciplina financiera de gran importancia, con métodos de valuación tradicionales que se engloban en los tres principales enfoques de la valuación: ingresos, mercado y costos [1, 2].

Sin embargo, los métodos derivados de estos enfoques no siempre han sido precisos, generando una brecha en la valuación de empresas en etapa inicial, las startups, pues en su mayoría no se considera la sinergia de sus componentes tangibles e intangibles, siendo estos últimos los principalmente excluidos, y los destacados en proporcionar un valor agregado a las empresas sobre todo en etapas iniciales [3, 4].

Debido a las características únicas y modelos de negocio disruptivos de las nuevas empresas son los causantes de que haya limitaciones al momento de aplicar los métodos tradicionales que consideran como ingresos o historial operativo, cuyas características no reflejan en beneficio de las empresas en etapa inicial, siendo bajas, de alto riesgo, dependientes del capital privado y no estandarizadas.

Otro factor importante es el contexto en el que se desarrolla y opera la empresa, como la infraestructura, el contexto cultural, educativo, económico y de mercado. Estos factores se consideran cualitativos porque representan condiciones intangibles que influyen en el desempeño de la empresa, pero que no pueden expresarse directamente en valores numéricos. Esto evidencia la falta de mecanismos efectivos para estimar el valor económico de una startup.

Diversos autores coinciden considerando importante desarrollar modelos de valuación que integren factores cualitativos solucionando así la dependencia excesiva de información histórica que no representa la realidad de este tipo de empresas [5].

El objetivo de esta investigación es desarrollar un modelo híbrido de valoración para empresas tradicionales en etapa inicial que integre bienes tangibles e intangibles en su valoración, con el fin de obtener estimaciones más acertadas y realistas que sirvan como herramienta para los emprendedores e inversionistas en procesos de planeación, inversión o compraventa de empresas [6] considerando como punto clave el financiamiento privado en el desarrollo de las empresas en etapa inicial [7].

2. Materiales y métodos

Tras la revisión de los métodos existentes tanto tradicionales como los alternativos para la valuación de startups, y el análisis de cada uno de ellos, así como las características típicas de un emprendimiento, se establece un modelo basado en herramientas ya utilizadas por otros métodos como una fusión complementaria que permite la valuación integración de variables cualitativas.

2.1 Métodos existentes

Entre los métodos más usados en la valuación de empresas, tenemos, los métodos tradicionales y métodos alternativos, como se muestra a continuación (Tabla 1):

Tabla 1. Métodos de valuación de empresas.

TRADICIONALES	ALTERNATIVOS
- Ingresos: Flujo de Caja Descontado - Mercado: Múltiplos Comparables - Costos: Basados en el estado patrimonial de la empresa	- Berkus - Scorecard - Opciones reales y riesgos - Venture Capital

Fuente: Elaboración propia

Dentro de los métodos tradicionales se encuentran aquellos basados principalmente en los estados financieros, como el estado de situación financiera, el estado de resultados y la información histórica confiable, cuya inclusión permite ofrecer una perspectiva cuantitativa y estructurada del valor de la empresa.

Por su parte, los métodos alternativos, como el enfoque de valor basado en opciones, el método Berkus o el Scorecard, buscan capturar el potencial de innovación y crecimiento característico de las empresas emergentes.

El análisis conjunto de ambos enfoques permite comprender mejor su aplicabilidad y limitaciones dentro del contexto particular de las startups.

Esta distinción resulta relevante para establecer las bases del modelo híbrido propuesto, el cual busca integrar las fortalezas de ambas perspectivas.

2.2 Estructura del modelo

Una vez estudiados estos métodos, se propone un modelo cuya estructura (Fig. 1), usando como base principios de los métodos tradicionales: la proyección de ingresos y el uso de múltiplos, combinado con una estructura de ponderación tal como en los métodos Berkus y Scorecard, los cuales son los métodos

alternativos que destacan por la simplicidad de su uso al tratarse de startups pero que aún podrían considerarse poco objetivos.

El modelo híbrido propuesto surge de la necesidad de integrar los enfoques tradicionales centrados en información financiera, con los alternativos que consideran factores intangibles, buscando así una valoración más representativa de las startups.



Figura 1. Estructura del modelo.

Se identificaron variables cualitativas en los diferentes métodos [8, 9], con características en común en el contexto emprendedor de las empresas e indicadores considerados con mayor coincidencia en los métodos, los cuales fueron clasificadas en cuatro grupos según el tipo de características cualitativas correspondiente: Capital Financiero; Capital Humano; Capital

Intelectual; y Condiciones del Entorno (Tabla 2).

La Tabla 2 presenta los factores considerados para la valoración, mientras que la Tabla 3 (pág.5) desarrolla la rúbrica correspondiente con la escala porcentual de evaluación para cada uno. En conjunto, ambas permiten vincular los aspectos cualitativos del modelo con un criterio de ponderación cuantificable.

Estas variables engloban diversos criterios para la evaluación de los activos intangibles, además de la estimación monetaria de la empresa sujeto.

Para obtener un valor base que permita la aplicación de múltiplos se utilizará el promedio de la proyección de ingresos a cinco años. Una herramienta usada en el ámbito de la valuación, aunque por lo general usar datos financieros es una desventaja para las startups, en este caso se busca utilizar datos internos de la empresa sujeto, como base más estable que refleje la capacidad comercial y el potencial de crecimiento del modelo de negocio incluso si hay ausencia de rentabilidad [10].

Los múltiplos surgen a partir de las variables cualitativas, de las cuales una de ellas es un reflejo del contexto sociocultural, gubernamental, sector de

Tabla 2. Operacionalización de factores cualitativos para la valoración de startups.

VARIABLE	INDICADORES	CRITERIOS DE EVALUACIÓN
CAPITAL FINANCIERO	Sostenibilidad financiera	Capacidad de la empresa para mantenerse operativa sin depender constantemente de nueva financiación.
	Potencial de crecimiento	Escalabilidad de ingresos y posibilidad de expansión del negocio.
	Rendimiento esperado	Tasa de retorno potencial para inversionistas o fundadores.
CAPITAL HUMANO	Capacidad y cohesión del equipo	Formación, experiencia y alineación estratégica entre los miembros clave del equipo fundador.
	Autonomía organizacional	Nivel de independencia y proactividad para ejecutar decisiones y adaptarse al entorno.
	Liderazgo y resiliencia	Habilidades para conducir el proyecto, adaptarse a retos y mantener el rumbo estratégico.
CAPITAL INTELECTUAL	Innovación y diferenciación (IP + crecimiento)	Capacidad del producto o servicio para destacar en el mercado mediante protección intelectual o características únicas basadas en conocimiento especializado
	Fortaleza y posicionamiento de marca	Reconocimiento, confianza y lugar que ocupa la empresa en la mente de los clientes o en el sector.
	Modelo de negocio	Claridad, viabilidad y escalabilidad de la forma en que la empresa genera ingresos.
CONDICIONES DEL ENTORNO	Reemplazado por Multiplicador Sectorial	Contexto sociocultural, gubernamental, sector de actividad, condiciones del mercado, proveedores y clientes, e infraestructura.

Fuente: Elaboración propia.

actividad, las condiciones del mercado, infraestructura. Esta variable se traduce como un múltiplo o indicador financiero como el EV/Ingresos, denominado Multiplicador Sectorial, datos que ya existen y son publicados en bases de datos públicas o por suscripción [11].

El modelo mantiene una estructura adaptable, de modo que la aplicación de múltiplos sectoriales considera las particularidades del mercado y la naturaleza de la empresa evaluada, buscando equilibrar el rigor metodológico con el reconocimiento de los juicios inherentes al proceso de valuación. De esta manera, su uso se adecua a cada caso, procurando la mayor representatividad posible conforme a las condiciones de la empresa sujeto.

Por otro lado, un Factor Integral Emprendedor del que se deriva en tres variables principales mencionadas anteriormente: Capital Financiero, Capital Humano y Capital Intelectual [12, 13].

2.3 Proceso de aplicación

La aplicación del modelo se inicia obteniendo la proyección de ingresos de la empresa a cinco años, cuyos datos usualmente se proporcionan por la empresa a valorar, y una vez proyectados con una tasa de crecimiento adecuada al sector y particularidades de la empresa, indagando en datos reales y lo más apegados a las condicionantes de la empresa con base a datos propios que permitan estimar de manera asertiva.

Continuando con el modelo, los multiplicadores tienen la tarea de ajustar el valor base premiándolo o demeritándolo según sea el caso, reflejando condiciones de riesgo o éxito en el mismo, destacando que las empresas no son comparables de manera transversal [11].

Para obtener el múltiplo sectorial, se usan múltiplos promedio por industria los cuales permiten ajustar las estimaciones de valor a las condiciones propias de cada industria [14].

Otra forma de obtener este múltiplo es a través de plataformas como la Bolsa Mexicana de Valores (BMV), en la que se encuentran los datos financieros necesarios de empresas enlistadas y

representativas del contexto macroeconómico y del mercado mexicano, a través de la suma de la capitalización bursátil y la deuda neta entre los ingresos acumulados del periodo actual de los últimos 12 meses de cada empresa. Posteriormente se promedia con el de otras de empresas comparables del sector con el fin de tener un referente más representativo.

La parte cualitativa y quizá lo más complejo de valorar con objetividad viene a continuación con el Factor Integral Emprendedor (FIE), en el que como ya se mencionó, se consideran tres variables principales que, a su vez, se dividen en tres indicadores que permiten evaluar de manera más concisa la empresa.

La complejidad radica precisamente en reducir la subjetividad y traducir los valores cualitativos a cuantitativos, para ello, se utiliza el uso del Proceso Analítico Jerárquico (AHP), desarrollado por Thomas Saaty en los años 60's, siendo una útil metodología para evaluar a través de comparaciones entre pares con las que generan matrices gracias a una escala general ya definida, conocida como "Escala de Saaty".

Con este modelo de comparación pareada, se generan matrices de las tres principales variables y de cada triada de indicadores de cada variable [15]. Si bien el método AHP no elimina por completo la subjetividad, pues depende del juicio experto, su aplicación en este modelo busca estructurar dicho juicio de manera más transparente y coherente, permitiendo minimizar sesgos individuales y otorgar mayor consistencia a la ponderación de variables cualitativas.

Una vez generadas las variables, se obtienen los pesos en porcentajes de cada indicador, que a su vez suman el 100% de cada variable y la suma de estas tres es de 100% a su vez, es decir, uno.

Esos porcentajes facilitan identificar que variables impactan más en el valor de la empresa y permite su valuación más subjetiva, pues esta ponderación surge de la opinión experta en el área de valuación de empresas y otros involucrados como empresarios que conocen el contexto y peso de los diversos indicadores en su impacto a las empresas gracias a una encuesta aplicada.

Para determinar cómo evaluar y que puntuación dar a cada apartado, con el fin de simplificar la objetividad en los criterios evaluados, teniendo varios filtros para lograr un factor lo más objetivo

Tabla 3. Rúbrica de evaluación.

	ENUNCIADO EVALUATIVO	Nivel 1 (25%) Insuficiente	Nivel 2 (50%) Limitado	Nivel 3 (75%) Adecuado	Nivel 4 (100%) Excelente
CAPITAL FINANCIERO (CF)	La empresa opera sin depender constantemente de financiamiento externo.	Depende de rondas frecuentes de inversión.	Genera ingresos, pero depende de financiamiento.	Cubren parcialmente gastos operativos sin financiamiento.	Tiene flujo constante y autonomía financiera operativa.
	La empresa tiene ingresos escalables y posibilidad de expansión.	Sin posibilidades claras de crecimiento.	Potencial limitado y dependiente de factores externos.	Escalabilidad posible en ciertas áreas o segmentos.	Modelo probado con alto potencial de expansión.
	Retorno atractivo para inversionistas o fundadores.	No proyecta retornos o son muy bajos.	Retornos inciertos o poco atractivos.	Proyecta retornos aceptables.	Altos retornos esperados y con respaldo.
CAPITAL HUMANO (CH)	El equipo fundador tiene experiencia y objetivos estratégicos comunes.	Equipo sin experiencia o desalineado.	Experiencia moderada o escasa alineación.	Equipo competente y parcialmente alineado.	Equipo consolidado, experimentado y alineado.
	Muestra independencia y proactividad para adaptarse.	Dependen completamente de terceros para decisiones clave.	Autonomía parcial, con dificultad adaptativa.	Capacidad operativa básica e independiente.	Alta proactividad, toma de decisiones ágil y adaptabilidad.
	Hay liderazgo efectivo ante retos y capacidad de mantener el rumbo.	Falta liderazgo, el rumbo es inestable.	Liderazgo débil o inconsistente.	Liderazgo presente, pero con áreas de mejora.	Liderazgo sólido, resiliente y estratégico.
CAPITAL INTELECTUAL (CI)	Producto innovador o especializado difícil de replicar.	Producto genérico o fácilmente replicable.	Diferenciación débil o sin protección.	Producto diferenciado sin protección legal.	Alta innovación con protección o barreras claras.
	Tiene una marca reconocida y confiable.	Desconocida, sin identidad clara.	Tiene identidad, pero sin posicionamiento fuerte.	Posicionamiento incipiente o en desarrollo.	Marca sólida, confiable y con presencia clara.
	El modelo de ingresos es claro, viable y escalable.	Modelo poco claro o inviable.	Modelo viable, pero con baja escalabilidad.	Modelo funcional con cierta escalabilidad.	Modelo claro, probado y altamente escalable.

Fuente: Elaboración propia

posible, se genera una rúbrica de evaluación a través de un enunciado evaluativo que podrá tener cuatro criterios que acorde a cada variable se consideran diversos puntos mencionados en la tabla 3 (pág. 5):

Pues, además, este valor final, se reescala entre 0.50 y 1.50 considerando que, si la suma de las puntuaciones cualitativas es de 1, reescalado se traduce como 1.50 sugiriendo que la empresa debe ser premiada por sus cualidades cualitativas, reflejando así la premiación o penalización proporcional, sin comprometer la objetividad del valor estimado capturando la dispersión observada en el desempeño de las startups [16] quedando así la siguiente formula:

$$FIE = 0.50 + x \quad (1)$$

Donde x es la suma de la rúbrica evaluada de variables cualitativas.

Por último, el Valor Proyectado, el Múltiplo Sectorial y el Factor Integral Emprendedor se

multiplican entre sí, y como producto se obtiene el valor de la empresa.

3. Resultados

A partir del modelo de valuación propuesto, se presentan los resultados obtenidos al aplicar la metodología en la que se integran factores cualitativos y cuantitativos, la obtención del múltiplo sectorial y la asignación de ponderaciones a las variables que integran el Factor Integral Emprendedor.

3.1 Aplicación del modelo

La empresa Jüsto, una empresa mexicana fundada en 2019 con un modelo de supermercado 100% en línea [17], que ofrece más de 5,000 productos en diversas categorías con entregas en el mismo día y permite la programación hasta con 30 días de anticipación. El tamaño de la empresa oscila entre los 1000 y 5000 empleados y cuenta con +1007 miembros asociados [18].

3.1.1 Proyección de ingresos

Como datos para aplicación del modelo, se usó información de ingresos estimados con base a diversas plataformas esto debido a que Jüsto aún es una empresa en serie B/C de inversión con crecimiento sostenido [19, 20, 21, 22], concluyendo en que se aproximan 16.18 Millones de Dólares (MDD) de ingresos actualmente.

Existen diversas fuentes que tras analizar datos de startups que salieron a bolsas brindan datos estadísticos sobre las tasas de crecimiento acorde a la vida de la empresa y los ingresos generados [22] indicando que más del 70% de las empresas tuvo un crecimiento mayor al 30% llegando a tasas de hasta 133%, así como el crecimiento por sector del mercado mexicano de grocery e-commerce con una proyección anual compuesta de 27.6% compuesta para los próximos cuatro años [23].

En el caso de Jüsto, se consideró un rango de crecimiento anual compuesto de 27% a 35% mediante regresión lineal simple dentro del rango reflejando la desaceleración progresiva propia del alcance de su estabilidad.

En consecuencia, el promedio de la proyección de ingresos es de 40.58 MDD (Tabla 4), es decir, valor proyectado (VP).

Tabla 4. Proyección de Ingresos Caso Jüsto.

PROYECCIÓN: JÜSTO			
	AÑO	CAGR (%)	INGRESOS
6	2025 (ACTUAL)		16.18
7	2026	35.00%	21.84
8	2027	33.40%	29.14
9	2028	31.80%	38.40
10	2029	30.20%	50.00
11	2030	27.00%	63.50
	PROMEDIO		40.58

Fuente: Elaboración propia

3.1.2 Múltiplo Sectorial

Posteriormente, se utilizaron empresas listadas en la Bolsa Mexicana de Valores que pertenecen al sector de

autoservicios: Walmex [24], Chdraui [25] y Soriana [26], que representan el contexto macroeconómico, normativo y financiero del mercado mexicano, a través de datos financieros de estas empresas como ingresos, número de acciones, precio por acción, deuda neta, se obtiene el múltiplo sectorial de cada una de ellas, con los siguientes resultados:

- Walmex = 1.23
- Chdraui = 0.68
- Soriana = 0.13

Además, NIMBO [27], publica indicadores por sector, país y número de empleados, aunque el límite de estos es de 99 empleados en la versión gratuita del acceso a datos, cuyo dato en este caso es de 0.80 este último valor se descarta debido a que el número de empleados de Jüsto excede considerablemente el rango de empresas consideradas por dicha fuente. Por tanto, dada la diferencia en escala, el dato de NIMBO podría no ser representativo para el caso analizado.

En resumen, el Múltiplo Sectorial promedio (MS), calculado a partir de tres empresas relevantes del sector, con **0.68 como resultado**.

3.1.3 Factor Integral Emprendedor

Procedemos con el Factor Integral Emprendedor, cuyo valor sale de los criterios mencionados en la sección anterior y normalizado una vez obtenidas las ponderaciones por el modelo AHP con la opinión experta como se muestra a continuación en la tabla 5 (pág. 7):

Este dato se sustituye en la fórmula para reescalar el Factor Integral Emprendedor de la siguiente manera:

$$\begin{aligned}
 FIE &= 0.50 + x, \\
 FIE &= 0.50 + (0.90) \\
 FIE &= 1.40
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

Una vez obtenidos los datos anteriores, se procedió a aplicar la estructura general del modelo propuesto:

$$\text{Valor de la Empresa} = VP \times MS \times FIE
 \tag{2}$$

Donde:

VP = Valor Proyectado

MS = Múltiplo Sectorial

FIE = Factor Integral Emprendedor

Tabla 5. Evaluación ponderada de Jüsto.

	ENUNCIADO EVALUATIVO	Nivel 1 (25%) Insuficiente	Nivel 2 (50%) Limitado	Nivel 3 (75%) Adecuado	Nivel 4 (100%) Excelente
CAPITAL FINANCIERO (CF)	La empresa opera sin depender constantemente de financiamiento externo.	Depende de rondas frecuentes de inversión.	Genera ingresos, pero depende de financiamiento.	Cubren parcialmente gastos operativos sin financiamiento.	Tiene flujo constante y autonomía financiera operativa.
	La empresa tiene ingresos escalables y posibilidad de expansión.	Sin posibilidades claras de crecimiento.	Potencial limitado y dependiente de factores externos.	Escalabilidad posible en ciertas áreas o segmentos.	Modelo probado con alto potencial de expansión.
	Retorno atractivo para inversionistas o fundadores.	No proyecta retornos o son muy bajos.	Retornos inciertos o poco atractivos.	Proyecta retornos aceptables.	Altos retornos esperados y con respaldo.
CAPITAL HUMANO (CH)	El equipo fundador tiene experiencia y objetivos estratégicos comunes.	Equipo sin experiencia o desalineado.	Experiencia moderada o escasa alineación.	Equipo competente y parcialmente alineado.	Equipo consolidado, experimentado y alineado.
	Muestra independencia y proactividad para adaptarse.	Dependen completamente de terceros para decisiones clave.	Autonomía parcial, con dificultad adaptativa.	Capacidad operativa básica e independiente.	Alta proactividad, toma de decisiones ágil y adaptabilidad.
	Hay liderazgo efectivo ante retos y capacidad de mantener el rumbo.	Falta liderazgo, el rumbo es inestable.	Liderazgo débil o inconsistente.	Liderazgo presente, pero con áreas de mejora.	Liderazgo sólido, resiliente y estratégico.
CAPITAL INTELLECTUAL (CI)	Producto innovador o especializado difícil de replicar.	Producto genérico o fácilmente replicable.	Diferenciación débil o sin protección.	Producto diferenciado sin protección legal.	Alta innovación con protección o barreras claras.
	Tiene una marca reconocida y confiable.	Desconocida, sin identidad clara.	Tiene identidad, pero sin posicionamiento fuerte.	Posicionamiento incipiente o en desarrollo.	Marca sólida, confiable y con presencia clara.
	El modelo de ingresos es claro, viable y escalable.	Modelo poco claro o inviable.	Modelo viable, pero con baja escalabilidad.	Modelo funcional con cierta escalabilidad.	Modelo claro, probado y altamente escalable.

Fuente: Elaboración propia.

Sustituyendo:

$$\text{Valor de la empresa} = 40.58 \times 0.68 \times 1.40$$

$$\text{Valor de la empresa} = 38.63 \text{ MDD}$$

Por tanto, el Valor de la Empresa acorde a este modelo es de 38.063 MDD, sin embargo, aunque no se cuenta con valores oficiales publicados, LeadIQ [28], una plataforma de prospección B2B basada en la nube, señala que su valuación estimada ronda cerca de los 700 millones de dólares, lo que evidencia una diferencia significativa entre el valor obtenido mediante el modelo y el valor mencionado en dichas fuentes considerando que el dato fuese confiable.

Este modelo se aplicó en dos casos prácticos más, para Cornershop y Rappi México, con los siguientes resultados:

- **Cornershop:** Valor proyectado de 146.46 MDD, mismo múltiplo sectorial (0.68) y FIE de 1.23, con un valor ajustado final de alrededor de 122.50 MDD, contra 1,500 MDD esperados [29, 30, 31].

- **Rappi México:** Valor proyectado de 1,305.20 MDD, múltiplo sectorial de 0.68 y FIE de 1.26, dando un valor ajustado de aproximadamente 1,319.20 MDD en comparación con la valuación encontrada de 5,250 MDD [32].

Estos valores reflejan estimaciones conservadoras basadas en ingresos proyectados, ajustadas por factores sectoriales y cualitativos, no obstante, dejó ver la falta de ajuste en el modelo, especialmente en el Múltiplo Sectorial pues las empresas utilizadas podrían no ser completamente representativo para startups en etapas tempranas o mercados emergentes, ya que no refleja plenamente su potencial de crecimiento ni los riesgos propios de estos negocios dinámicos, lo que limita la precisión en su valoración.

Basado en la necesidad de ajustarse, tras investigar datos del sector e-commerce más allá del mercado nacional, y las empresas enlistadas, se encontró que acorde a las etapas de las startups, se tienen tres rangos de múltiplos según la ronda de series de inversión en que se encuentran [33]:

- Fases tempranas (seed y serie A) con múltiplos entre $20\times$ y $30\times$
- Etapas intermedias (serie B y C) un rango de $10\times$ a $16\times$
- Etapas tardías o empresas consolidadas se estabilizan entre $1.5\times$ y $6\times$

Este rango de múltiplos ofrece una referencia útil para valorar startups en diferentes momentos de su desarrollo y con diversos modelos de negocio dentro del e-commerce.

Comprendiendo el planteamiento anterior, los MS de cada caso se ajustó acorde a la fase en que se encuentra cada una de estas empresas, siendo $13\times$ para Jüsto; $9\times$ en el caso de Cornershop; y $3.75\times$ para Rappi México.

Con estos ajustes se sustituyó y ajustó el modelo brindando con los resultados que se muestran a continuación.

- **Jüsto:**
Valor proyectado de $40.58 \text{ MDD} \times 13 \times 1.40 =$
738.56 MDD
Vs. 700 MDD (Valuación estimada)
- **Cornershop:**
Valor proyectado de $146.46 \text{ MDD} \times 9 \times$
 $1.23 =$ **1621.36 MDD**
Vs. 1,500 MDD (Valuación estimada)
- **Rappi México:**
Valor proyectado de $1,305.20 \text{ MDD} \times 3.75$
 $\times 1.26 =$ **7,274.97 MDD**
En comparación con la valuación encontrada de 5,250 MDD.

Los resultados obtenidos muestran que el modelo propuesto, tiende a generar valuaciones conservadoras cuando se basa en múltiplos sectoriales derivados de empresas consolidadas. Al ajustar estos múltiplos considerando la etapa de desarrollo de cada startup, los valores estimados se alinean mejor con sus valuaciones reales de mercado. Esto refuerza la importancia de adaptar las referencias sectoriales y mantener flexibilidad en el modelo según el contexto y madurez de la empresa evaluada.

4. Discusión

Si bien, los intangibles son una parte importante para esta investigación y el modelo propuesto, estos por sí solos no pueden emitir un valor de nómina por sí solo, más bien complementa la estimación de los bienes tangibles, y como ya se mencionó anteriormente que el uso de los métodos tradicionales es insuficiente por la falta de historial y datos financieros y la obvia falta de desarrollo en activos físicos de este tipo de empresas.

Como limitaciones se encontraron la falta de datos públicos sobre startups, que debido a su fase inicial la posibilidad de obtener referencias confiables de empresas comparables se muestra complejo, sin embargo, tratándose de un ejercicio académico se comprende esta limitante, pues en la práctica profesional, sería la empresa misma de primera mano la que brinde la información necesaria para obtención de datos financieros, y en contraste, la información sobre múltiplos de sector el acceso a bases de datos especializadas que usualmente son por suscripción podrían mejorar significativamente los resultados, facilitando su obtención y el uso bases más adecuadas.

En consecuente, ajustar los múltiplos sectoriales según la etapa de desarrollo y madurez de cada empresa es óptimo, ya que una muestra basada en empresas consolidadas no captura adecuadamente el potencial de crecimiento ni los riesgos de empresas emergentes. Adaptar los múltiplos permite obtener valuaciones más precisas y representativas del desempeño esperado, respetando las particularidades de cada modelo de negocio y la etapa de la empresa dentro del sector e-commerce.

Entre las principales fortalezas del modelo, se encuentra su practicidad, ofreciendo una estimación estructurada y razonable, además se destaca la incorporación del Factor Integral Emprendedor, que integra de manera más objetiva posible variables cualitativas que tradicionalmente no son consideradas en la valoración de empresa.

Reconociendo así el impacto en el éxito de una startup por parte de la sinergia de los componentes tangibles e intangibles de la misma, reiterando que la valoración conjunta resulta esencial para reflejar un valor más real de la empresa.

Finalmente, el modelo abre la posibilidad como base para el desarrollo de nuevos modelos y metodologías que integren de manera más sólida ambas partes de una empresa, pues, aunque se ha buscado reducir la subjetividad a través de herramientas como el Proceso Analítico Jerárquico, el modelo es susceptible a mejoras, complementos o adaptaciones a otros enfoques de valuación, confirmando su flexibilidad.

Además, puede servir no solo para empresas en etapa inicial, sino en empresas consolidadas cuya principal fortaleza no es proviene únicamente de sus activos físicos, siempre y cuando se adecuen los parámetros para el contexto específico y reajustando el peso de cada variable con apoyo del Proceso Analítico Jerárquico.

5. Conclusión

Este trabajo propuso un modelo híbrido de valuación para empresas en etapa inicial, que integra elementos cuantitativos con factores cualitativos mediante la incorporación del Factor Integral Emprendedor.

Este modelo busca ofrecer una estimación más realista e integral del valor de una startup, respondiendo a la necesidad de superar las limitaciones de los métodos tradicionales, los cuales se centran en variables financieras y tienden a omitir aspectos clave del funcionamiento interno y del potencial de crecimiento de las empresas emergentes.

En el desarrollo, se expresa en más de una ocasión la complejidad de llegar a valuaciones integrales a causa de la falta de historial financiero y como los modelos convencionales no reflejan el valor real de las startups, en contrate, se presentó una vía con el objetivo de reducir esta brecha.

En la aplicación, se evidencia como la incorporación de las variables cualitativas como en Factor Integral Emprendedor modifica la valoración base, generando una estimación más coherente con el contexto operativo y estratégico de una empresa real.

Aun con las limitaciones que se presentaron, el modelo ofrece una herramienta adaptable, transparente y replicable, abriendo una vía estructurada para los procesos de valuación con bienes intangibles, representando un avance metodológico y conceptual.

Se asevera que la aplicación de este modelo no se

limita al uso de startups sino también su potencial uso en la valoración de empresas tradicionales por su flexibilidad y adaptabilidad, sin excluir al sujeto de valuación por el tipo o madurez de la empresa.

En conclusión, esta tesis constituye una contribución al desarrollo de modelos híbridos de valuación, buscando la objetividad y reconociendo que el valor de una empresa no se limita a sus cifras financieras, sino en la sinergia de sus activos tangibles e intangibles.

Agradecimientos

A la Universidad Autónoma de Querétaro, por brindar espacios y herramientas para desarrollar mi formación profesional, así como a todos los docentes que contribuyeron con sus enseñanzas a lo largo de estos años, quienes han dejado huella en mi formación. A quienes me han brindado las herramientas académicas para el desarrollo de este trabajo y la formación que proporcionan.

No se presentan conflictos de interés en la elaboración y publicación de este artículo.

Abreviaturas

Las siguientes abreviaturas se utilizan en este trabajo:

AHP: Proceso Analítico Jerárquico

BVM: Bolsa de Valores Mexicana

CARGR: Tasa de Crecimiento Anual Compuesta (por sus siglas en inglés)

CF: Capital Financiero

CH: Capital Humano

CI: Capital Intelectual

EV: Suma de capitalización bursátil y deuda neta (Enterprise Value)

FIE: Factor Integral Emprendedor

MS: Múltiplo Sectorial

VP: Valor Proyectado

6. Referencias bibliográficas

- [1] R. Álvarez, «Valuación de empresas en México de 2006 a 2017 mediante el valor de capitalización y el valor económico agregado,» *Entreciencias Diálogos en la Sociedad del Conocimiento*, vol. 10, nº 24, 2022.
- [2] M. L. Saavedra, «La valuación de empresas cotizadas en México, mediante la metodología del

- modelo de Flujo de Efectivo Disponible. Relaciones con la valuación del mercado,» *Contaduría y Administración*, n° 223, 2007.
- [3] A. Golshani, H. Adab y M. Shafaghi, «Designing a Technology Valuation Model in Iranian Startups,» *Bussines Excellence and Management*, vol. 13, March 2023.
- [4] E. Higuera, «Estudio Empírico de los Factores Relevantes en la Metodología de Valuación de Startups,» *Innovaciones de Negocios*, pp. 56-88, 2022.
- [5] J. Moscoso y S. Botero, «Métodos de Valoración de Nuevos Emprendimientos,» *Universidad de Medellín*, vol. 16, n° 33, 2013.
- [6] J. D. Figueroa, «Valuación de negocios en marcha marco conceptual,» *Cominté Técnico Nacional de Finanzas Corporativas*, 2005.
- [7] A. Damodaran, «Valuing Young, Start-up and Growth Companies: Estimation Issues and Valuation Challenges,» *Stern School of Bussiness, New York University*, May 2009.
- [8] C. Coronel-Carvajal, «Las Variables y su Operalización,» *Revista Archivo Médico de Camagüey*, 2023.
- [9] J. L. Arias Gonzalez, «Guía para Elaborar la Operalización de Variables,» *Universidad Católica de Santa María, Arequipa, Perú*, vol. X, n° 28, 2021.
- [10] KPMG, «Start-ups and Early Stage Companies,» 2021.
- [11] A. Damodaran, «Damodaran on Valuation: Security Analysis for Investment and Corporate Finance,» Wiley, 2006, p. 704.
- [12] CEUPE Centro Europeo de Posgrado, «CEUPE European Business School,» [En línea]. Available: <https://www.ceupe.com/blog/modelos-de-medicion-del-capital-intelectual-navigator-de-skandia.html?>. [Último acceso: 20 febrero 2025].
- [13] O. Everling, «Rating Evidence,» 28 febrero 2021. [En línea]. Available: <https://rating-evidence.com/2021/02/28/the-ic-rating-model-by-intellectual-capital-sweden/>. [Último acceso: 20 febrero 2025].
- [14] P. Fernández, «Company Valuation Methods,» Enero 2002. [En línea]. Available: <https://www.iese.edu/media/research/pdfs/DI-0449-E.pdf>. [Último acceso: 26 mayo 2025].
- [15] J. Osorio y J. Orejuela, «El Proceso de Análisis Jerárquico (AHP) y la Toma de Decisiones Multicriterio. Ejemplo de Aplicación,» *Scientia et Technica A*, pp. 249-257, 2008.
- [16] S. Kortum y J. Lerner, «Assessing the contribution of venture capital to innovation,» *RAND Journal of Economics*, vol. 31, n° 4, pp. 674-692, 2000.
- [17] J. Serta, «Sobre Jüsto,» Enero 2025. [En línea]. Available: <https://faq.justo.mx/hc/es-419/articles/32577565612564-Sobre-J%C3%BCsto>. [Último acceso: 27 mayo 2025].
- [18] Jüsto, «LinkedIn,» 2025. [En línea]. Available: <https://www.linkedin.com/company/justoinc/about/>. [Último acceso: 17 junio 2025].
- [19] Owler, «Jüsto company overview,» 2024. [En línea]. Available: <https://www.owler.com/company/justo2>. [Último acceso: 18 junio 2025].
- [20] Similarweb, «Poder Justo, S.A.P.I. de C.V.,» mayo 2025. [En línea]. Available: <https://www.similarweb.com/company/justo.mx>. [Último acceso: 18 junio 2025].
- [21] Impact & Innovation by Dealroom, «Jüsto An online delivery-only supermarket chain,» 2025. [En línea]. Available: https://impact.dealroom.co/companies/j_sto?.
- [22] SignalHire, «Jüsto Overview,» 2025. [En línea]. Available: <https://www.signalhire.com/companies/justo>. [Último acceso: 18 junio 2025].
- [23] eCommerceDB, «Grocery eCommerce market in Mexico,» mayo 2025. [En línea]. Available: <https://ecommercedb.com/markets/mx/grocery>. [Último acceso: 19 junio 2025].
- [24] WAL-MART DE MEXICO, S.A.B. DE C.V., «Bolsa Mexicana de Valores,» 31 marzo 2025. [En línea]. Available: https://www.bmv.com.mx/docs-public/visor/visorXbrl.html?docins=../ifrsxbrl/ifrsxbrl_1459101_2025-01_1.zip#/visorXbrl. [Último acceso: 27 mayo 2025].
- [25] GRUPO COMERCIAL CHEDRAUI, S.A.B. DE C.V., «Bolsa Mexicana de Valores,» 31 marzo 2025. [En línea]. Available: https://www.bmv.com.mx/docs-public/visor/visorXbrl.html?docins=../ifrsxbrl/ifrsxbrl_1459203_2025-01_1.zip#/visorXbrl. [Último acceso: 16 junio 2025].
- [26] ORGANIZACION SORIANA, S.A.B. DE C.V., «Bolsa Mexicana de Valores,» 31 marzo 2025. [En línea]. Available: https://www.bmv.com.mx/docs-public/visor/visorXbrl.html?docins=../ifrsxbrl/ifrsxbrl_1459857_2025-01_1.zip#/visorXbrl. [Último acceso: 17 junio 2025].
- [27] NIMBO, «Multiplos 2025,» 16 junio 2025. [En línea]. Available: <https://www.nimbo.net/es/multiples#%F0%9F>

%87%B2%F0%9F%87%BD-mx-mexiko.

- [28] LeadIQ, «Justo,» 2024. [En línea]. Available: <https://leadiq.com/c/j%C3%BCsto/5d3f2ac8f45f783eced0d17e>. [Último acceso: 03 julio 2025].
- [29] Compworth, «Cornershop App : Revenue, Funding, Valuation & Alternatives,» [En línea]. Available: <https://compworth.com/company/cornershop-app>. [Último acceso: 30 junio 2025].
- [30] S. Saldaña, «La app de Cornershop desaparecerá en México: ahora el súper se pedirá, sí o sí, desde Uber,» 05 octubre 2023. [En línea]. Available: <https://www.xataka.com.mx/aplicaciones/app-cornershop-desaparecera-mexico-ahora-super-se-pedira-uber>.
- [31] T. Molina, «Llega el fin de Cornershop en Chile y Latinoamérica y marca es absorbida completamente por Uber,» 30 noviembre 2023. [En línea]. Available: <https://www.emol.com/noticias/Economia/2023/11/30/1114447/fin-de-cornershop.html>.
- [32] M. Azevedo, «Colombian on-demand delivery startup Rappi raises 'over' \$500M at a \$5.25B valuation,» 19 julio 2021. [En línea]. Available: <https://techcrunch.com/2021/07/19/colombian-on-demand-delivery-startup-rappi-raises-over-500m-at-a-5-25b-valuation/>.
- [33] Dealroom, «Multiples,» 2025. [En línea]. Available: <https://dealroom.co/guides/multiples>. [Último acceso: 03 julio 2025].
- [34] D. Gray, «Average Growth Rate For Startups in 2025,» 01 abril 2025. [En línea]. Available: <https://www.equidam.com/benchmarks-for-startup-revenue-growth/>. [Último acceso: 19 junio 2025].

Análisis del Comportamiento del Algoritmo de Optimización de Crecimiento de Plantas

Analysis of the Behavior of the Plant Growth Optimization Algorithm

Martínez Ángeles, Hugo^{*,†}, Navarro Rubio, Cesar Augusto^{*,†}, Ríos Moreno, José Gabriel^{**}, Trejo Perea Mario^{*}, Velázquez Castillo, Rodrigo Rafael^{**}, Carrillo-Serrano, Roberto Valentín^{**}.

*División de Investigación y Posgrado, Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Querétaro, Querétaro 76010, México**
*Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Querétaro, Querétaro 76010, México***

hmartinez15@alumnos.uaq.mx[†]; cnavarro15@alumnos.uaq.mx[†], riosg@uaq.mx, mtp@uaq.mx, rodrigo.velazquez@uaq.mx, roberto.carrillo@uaq.mx

<https://orcid.org/0000-0002-8552-705X>[†], <https://orcid.org/0009-0003-7541-5841>[†], <https://orcid.org/0000-0002-8988-2729>,
<https://orcid.org/0000-0002-7014-3379>, <https://orcid.org/0000-0003-3318-9471>, <https://orcid.org/0000-0002-8246-8920>

Resumen: En este trabajo se muestra la implementación del algoritmo de optimización denominado "Algoritmo de Optimización de Crecimiento de Plantas" (PGO) con el objetivo de analizar su comportamiento en la resolución de problemas de optimización no lineales con restricciones. El algoritmo PGO se aplica a la función objetivo $f(\vec{x}) = (-20 + x_1)^3 + (-10 + x_2)^2$ sujeta a las restricciones $g_1(\vec{x}) = -(x_1 - 5)^2 - (x_2 - 5)^2 + 30 \leq 0$ y $g_2(\vec{x}) = (x_1 - 6)^2 + (x_2 - 5)^2 - 80.21 \leq 0$ con la finalidad de minimizar a la mejor solución posible, dentro de los rangos $10 \leq x_1 \leq 100$ y $5 \leq x_2 \leq 100$. El desarrollo del algoritmo permitió la exploración en el espacio de búsqueda para identificando la mejor solución en $x_1 = 10.0000$ y $x_2 = 9.9975$, con un resultado de $f(\vec{x}) = -999.999994$ en la función objetivo. Los valores de restricción obtenidos fueron de $g_1 = -19.975101$ y $g_2 = -59.212491$. Las restricciones fueron completamente satisfechas, y se evaluaron 19 puntos maduros durante 86 generaciones. Los resultados obtenidos indican que el algoritmo PGO constituye una herramienta prometedora para la optimización con restricciones, demostrando que el algoritmo es capaz de resolver problemas de optimización no lineales con restricciones de manera eficiente, manteniendo soluciones factibles y una rápida convergencia.

Palabras clave: CON, Metaheurísticas; Algoritmos inspirados en la naturaleza; Optimización con restricciones; Plant Growth Optimization (PGO); Penalización de restricciones.

Abstract: This paper presents the implementation of the optimization algorithm called "Plant Growth Optimization Algorithm" (PGO) with the aim of analyzing its behavior in solving nonlinear optimization problems with constraints. The PGO algorithm is applied to the objective function $f(\vec{x}) = (-20 + x_1)^3 + (-10 + x_2)^2$ subject to the constraints $g_1(\vec{x}) = -(x_1 - 5)^2 - (x_2 - 5)^2 + 30 \leq 0$ and $g_2(\vec{x}) = (x_1 - 6)^2 + (x_2 - 5)^2 - 80.21 \leq 0$ with the objective of minimizing to the best possible solution within the ranges $10 \leq x_1 \leq 100$ and $5 \leq x_2 \leq 100$. The development of the algorithm allowed exploration in the search space, identifying the best solution at $x_1 = 10.0000$ and $x_2 = 9.9975$, with a result of $f(\vec{x}) = -999.999994$ for the objective function. The obtained constraint values were $g_1 = -19.975101$ and $g_2 = -59.212491$. The constraints were fully satisfied, and 19 mature points were evaluated over 86 generations. The results obtained indicate that the PGO algorithm is a promising tool for constrained optimization, demonstrating that it is capable of solving constrained nonlinear optimization problems efficiently, while maintaining feasible solutions and rapid convergence.

Keywords: CON, Metaheuristics; Nature-inspired algorithms; Constraint optimization; Plant Growth Optimization (PGO); Constraint penalty.

1. Introducción

En los últimos años, los algoritmos de optimización inspirados en la naturaleza han demostrado ser herramientas eficaces para resolver problemas complejos en diversas áreas de la

ingeniería, la ciencia computacional y la inteligencia artificial [1]. Estos métodos, conocidos como metaheurísticas, han permitido abordar con éxito problemas no lineales, multimodales y con restricciones, en los que las técnicas clásicas de optimización resultan ineficientes o de difícil aplicación [2].

Actualmente, los algoritmos metaheurísticos inspirados en la naturaleza, han demostrado ser eficaces para encontrar soluciones óptimas en problemas de gran escala y complejos ya que, combinan estrategias de minimización y maximización incluso de manera simultánea a la vez [3].

En problemas con múltiples objetivos, donde se busca minimizar y maximizar diferentes funciones simultáneamente, se recurre a enfoques como la optimización multiobjetivo y la búsqueda de soluciones que equilibran los distintos objetivos en conflicto. Estas técnicas, permiten abordar una amplia variedad de problemas de optimización presentes tanto en la vida diaria como en la investigación avanzada [4].

Por lo tanto, es de saber que los algoritmos de optimización juegan un papel clave en la resolución de problemas prácticos en el mundo real, que van desde aplicaciones prácticas hasta complejas [5].

De esta manera, cuando se habla de optimización, se puede mencionar la existencia de aquellos métodos de optimización denominados heurísticos, los cuales buscan soluciones a través de la prueba y error [6].

En cambio, los denominados como metaheurísticas van un paso más allá, ya que emplean información previa y seleccionan soluciones de manera más estructurada con el objetivo de poder llevar a cabo una búsqueda más eficiente de la solución al problema de optimización planteado [7].

Sin embargo, la literatura indica que el manejo de restricciones sigue siendo un desafío importante en la optimización evolutiva. Para abordar este aspecto, se han desarrollado distintos enfoques teóricos y numéricos que incluyen el uso de términos de penalización, mecanismos de reparación, reglas de factibilidad y el método ϵ -constraint, entre otros [6, 8].

A pesar de los avances alcanzados por algoritmos como Particle Swarm Optimization (PSO) [7], Ant Colony Optimization (ACO) [8] o Firefly Algorithm (FA) [9], persisten desafíos importantes relacionados con el equilibrio entre exploración y explotación, la convergencia prematura y el manejo adecuado de restricciones [10].

También, se han creado algoritmos que simulan de manera inicial el comportamiento de las plantas,

observando cómo se adaptan a cambios fisiológicos y cómo crecen para garantizar su supervivencia en el ambiente [11].

Algunos estudios que exploran los algoritmos inspirados en plantas son: "Plant intelligence-based metaheuristic optimality somethings" [12] y "A New Bio-inspired Optimization Algorithm Based on the Self-defense Mechanisms of Plants" [13], que utilizan métodos como el Flower Pollination Algorithm (FPA) [14] y el Plant Growth Optimization (PGO) [15].

En los últimos años, los algoritmos de optimización inspirados en la naturaleza se han consolidado como una opción eficiente frente a los métodos deterministas tradicionales. A partir de la década de 1990, el interés por comprender la inteligencia colectiva en animales y plantas dio origen a diversos modelos computacionales que imitan sus comportamientos biológicos [16].

Con el tiempo, las técnicas de optimización han evolucionado y se han adaptado para resolver tanto problemas lineales como no lineales, incluso aquellos que incluyen restricciones dentro del proceso de búsqueda de la mejor solución posible. Entre los enfoques más recientes destaca el algoritmo PGO [17].

Una de las características más notables de los algoritmos inspirados en plantas es su capacidad para mantener un equilibrio natural entre exploración y explotación. Esto se debe a que reproducen la manera en que las plantas ajustan su crecimiento en respuesta a factores del entorno, como la disponibilidad de luz o nutrientes [18].

La Tabla 1 [18] resume las principales diferencias entre los diferentes tipos de algoritmos bioinspirados, destacando que los métodos inspirados en plantas, como el PGO, presentan un equilibrio natural entre exploración y explotación del espacio de búsqueda.

Tabla 1: Principales diferencias entre los diferentes tipos de algoritmos bioinspirados.

Tipo	Inspiración	Ventajas
Animal	Comportamiento colectivo	Rápida convergencia
Vegetal	Crecimiento y adaptación de plantas	Alta estabilidad
Evolutivo	Selección natural y genética	Gran diversidad de soluciones
Híbrido	Combinación de varios enfoques	Mayor rendimiento global

El objetivo de este trabajo es presentar un análisis del comportamiento del algoritmo de optimización PGO para resolver problemas de optimización no lineales bajo restricciones. En especial, se aplica el algoritmo a una función objetivo no lineal con dos restricciones, buscando minimizar la función objetivo dentro de un dominio específico. Mediante esta aplicación, se desea evaluar la efectividad de PGO en la solución de problemas de optimización explorando su eficiencia para encontrar soluciones óptimas dentro del espacio de búsqueda definido por las restricciones impuestas.

A diferencia de los estudios previos, donde el PGO se ha aplicado principalmente a problemas sin restricciones o de tipo continuo, en este trabajo se evalúa su desempeño considerando un esquema explícito de manejo de restricciones mediante penalización proporcional y se analiza su estabilidad estadística a partir de múltiples ejecuciones independientes.

De esta manera, la contribución principal del estudio radica en demostrar la viabilidad del PGO para abordar problemas de optimización no lineales restringidos, destacando su equilibrio natural entre exploración y explotación del espacio de búsqueda.

2. Fundamento teórico

El algoritmo de optimización PGO tiene como fundamento el cómo las plantas crecen de manera adaptativa hacia la luz y cómo realizan la búsqueda de los nutrientes que favorecen su desarrollo [19].

Este proceso o método de crecimiento se relaciona con la exploración del espacio en el que las plantas intentan maximizar su supervivencia, crecimiento y desarrollo [18].

El algoritmo de PGO basa su método de búsqueda en la exploración global, la cual estaría representada por nuevas hojas en una planta real y explotación local que sería la forma en que los troncos de las ramas crecen hacia lugares con mayor cantidad de luz. PGO usa una estrategia equilibrada que le permite escapar de los óptimos locales y encontrar soluciones más cercanas al óptimo global [20].

La forma de crecimiento artificial del algoritmo de optimización PGO inicia con la creación aleatoria de un conjunto de “N” puntos. Posteriormente, a cada uno de estos puntos se le asigna un valor de aptitud según la evaluación de la función objetivo [21].

Con base en este resultado se calcula la concentración de morfógeno (sustancia que influye en la formación y desarrollo de las estructuras biológicas en los organismos) en cada punto, empleando la Ec. (1) [21].

$$A_i = \begin{cases} 1 - \frac{f(x_i) - f_{min}}{\sum_{j=1}^N [f(x_j) - f_{min}]}, & f(x_i) > f_{min} (i = 1, 2, \dots, N) \\ 1, & f(x_i) = f_{min} (i = 1, 2, \dots, N) \end{cases} \quad (1)$$

Asimismo, el punto donde ocurre la ramificación puede adoptar tres formas distintas de ramificación [21].

Modo 1: Simpodial, $A_i > \beta$

Modo 2: Monopodial, $\alpha < A_i < \beta$

Modo 3: Sin ramificación, $\alpha < A_i$

Por otro lado, es necesario conocer que no todos los algoritmos de optimización son adecuados para cualquier tipo de problema. Su uso o aplicación está acotada a el método de búsqueda o naturaleza del algoritmo, motivo por el que es importante conocer cuándo es que estamos ante un problema de optimización. Si no es así, tal vez sería mejor usar enfoques de inteligencia artificial enfocados a la búsqueda de soluciones [22].

De esta manera, la optimización consiste en elegir la mejor opción entre varias alternativas, siempre que se respeten las restricciones del problema mejorando el rendimiento del sistema y acercándose a la solución que pueda brindar el mejor u óptimo desempeño de la función objetivo [23].

Ahora bien, el proceso general del PGO se compone de 5 etapas principales: inicialización, evaluación, ramificación maduración y convergencia [21].

1. **Inicialización:** En esta fase, se generan de forma aleatoria los puntos de crecimiento, dentro del espacio de búsqueda que define el problema. Cada punto simboliza una posible solución inicial, y su distribución al azar ayuda a cubrir el dominio de manera más uniforme. Con ello, se favorece una exploración global desde el comienzo del proceso.
2. **Evaluación:** Cada punto generado se analiza a través de la función objetivo, lo que permite obtener un valor de aptitud. Con base en este valor, se calcula el morfógeno. Este parámetro define la capacidad que tiene cada punto para extenderse dentro del entorno de búsqueda.
3. **Ramificación:** Dependiendo del valor del

morfógeno, se elige el modo de ramificación

4. **Maduración:** En esta etapa, los puntos con mejor desempeño son seleccionados para formar parte de la siguiente generación, garantizando que solo las soluciones más prometedoras continúen en el proceso evolutivo.
5. **Convergencia:** El algoritmo repite el ciclo de crecimiento y maduración hasta cumplir con un criterio de parada, que puede basarse en alcanzar un número máximo de generaciones o en la falta de mejoras notables en la función objetivo.

La Fig. 1 [21] presenta el pseudocódigo, donde se muestra la implementación básica del algoritmo PGO. En este pseudocódigo se describen las etapas principales del proceso.

Entradas

N $\leftarrow$ 50 // Puntos de ramificación (tamaño de población)
 NG $\leftarrow$ 0 // Contador de generaciones
 NC $\leftarrow$ 0 // Contador de iteraciones (evaluaciones)
 NM $\leftarrow$ 0 // Contador de puntos maduros (aceptados)
 NG_Max $\leftarrow$ 500 // Máximo de generaciones
 NC_Max $\leftarrow$ 20 // Máximo de iteraciones (por generación o por ciclo interno)
 NM_Max $\leftarrow$ 400 // Máximo de puntos maduros
 $\alpha \leftarrow$ 0.3 // Umbral inferior de ramificación (crecimiento hoja)
 $\beta \leftarrow$ 0.8 // Umbral superior de ramificación (ramificación)
 $F(x) \leftarrow f(x) + \text{penalizaciones por restricciones (según manejo de restricciones)}$

Salidas:
 x_{best} , F_{best} , NG (generaciones ejecutadas), NC (evaluaciones), NM (puntos maduros)

1. Inicialización

- 1.1. Fijar semilla aleatoria (si aplica).
- 1.2. Generar población inicial $\{x_i\}$ para $i=1..N$ dentro del Dominio.
- 1.3. Evaluar $F(x_i)$ para cada i . // Penalización activa si $g_{\text{max}}(x_i) > 0$
 $NC \leftarrow NC + N$
- 1.4. Establecer $x_{\text{best}} \leftarrow \text{argmin}_i F(x_i)$; $F_{\text{best}} \leftarrow \min_i F(x_i)$

2. Bucle evolutivo (mientras NG < NG_Max y NC < NC_Max y NM < NM_Max)

- 2.1. NG $\leftarrow$ NG + 1
- 2.2. Obtener $F_{\text{worst}} \leftarrow \max_i F(x_i)$
- 2.3. Para cada solución x_i en la población:
 - a) Calcular morfógeno (aptitud normalizada de minimización):
 $A_i \leftarrow (F_{\text{best}} - F(x_i)) / (F_{\text{best}} - F_{\text{worst}} + \epsilon)$ // $\epsilon = 1e-12$
 $A_i \in [0, 1]$; mayor A_i = mejor solución
 - b) Seleccionar modo de ramificación según umbrales α , β :
 Si $A_i \geq \beta$ $\rightarrow$ Modo 1 (Simpodial): generar 2 brotes
 Si $\alpha \leq A_i < \beta$ $\rightarrow$ Modo 2 (Monopodial): generar 1 brote
 Si $A_i < \alpha$ $\rightarrow$ Modo 3 (Sin ramificación): 0 brotes (opcional micro-perturbación)
 - c) Para cada brote k generado desde x_i :
 - c.1) Proponer candidato x' mediante operador de crecimiento:
 // explotación local (paso pequeño) y/o exploración (paso controlado)
 - c.2) Reparar/proyectar x' al Dominio si sale de límites.
 - c.3) Evaluar $F(x')$ con penalizaciones por restricciones.
 $NC \leftarrow NC + 1$
 - c.4) Criterio de maduración/reemplazo:
 - Priorizar factibles ($g_{\text{max}}(x') \leq 0$) sobre no factibles.
 - Si $F(x') < F(x_i)$ (o regla de aceptación definida), reemplazar $x_i \leftarrow x'$;
 $NM \leftarrow NM + 1$
- 2.4. Actualizar mejor solución:
 Si $\exists x_i$ con $F(x_i) < F_{\text{best}}$:
 $x_{\text{best}} \leftarrow x_i$; $F_{\text{best}} \leftarrow F(x_i)$
- 2.5. (Opcional) Parada por estancamiento:
 Si no hay mejora de F_{best} durante P generaciones consecutivas $\rightarrow$ salir

3. Criterios de parada global:
 Terminar si se cumple cualquiera:
 - NG $\geq$ NG_Max
 - NC $\geq$ NC_Max
 - NM $\geq$ NM_Max
 - (Opcional) Estancamiento por P generaciones

4. Devolver resultados:
 x_{best} , F_{best} , NG, NC, NM

estructura de PGO está compuesta por tres etapas principales: inicialización, crecimiento/ramificación y evaluación/maduración, que se repiten durante un número determinado de generaciones hasta alcanzar la convergencia.

Cada una de estas fases refleja la lógica biológica del crecimiento vegetal, en la que las soluciones más prometedoras generan nuevas “ramas” o alternativas dentro del espacio de búsqueda.

Finalmente, el algoritmo selecciona los puntos más aptos, consolidando así un proceso de maduración y convergencia hacia la solución óptima. Esta representación facilita comprender la interacción entre exploración y explotación que caracteriza al comportamiento del PGO, así como su capacidad para manejar restricciones y evitar óptimos locales.

3. Materiales y métodos

3.1. Modelación del algoritmo PGO

Para llevar a cabo la implementación del algoritmo PGO se hizo uso del software matricial MATLAB 2024b®. El equipo de hardware utilizado fue una computadora portátil, la cual consta de un procesador de onceava (11th) generación Intel(R) Core(TM) i5-1135G7 @ 2.40GHz con 8.0 GB de memoria RAM. Además, para poder ejecutar el código completo del algoritmo PGO, se establecieron los parámetros de entrada mostrados en la Tabla 2.

Tabla 2: Parámetros de entrada en Matlab recomendados para el algoritmo PGO.

Parámetro	Descripción	Valor recomendado
N	Puntos de ramificación	50
NG	Contador de generaciones	0
NC	Contador de iteraciones	0
NM	Contador de puntos maduros	0
NG_Max	Máximo de generaciones	500
NC_Max	Máximo de iteraciones	20
NM_Max	Máximo de puntos maduros	400
α	Factor de crecimiento de la hoja	0.3
β	Factor de ramificación	0.8

Figura 1: Pseudocódigo del Algoritmo de Optimización de Crecimiento de Plantas (PGO).

De la Fig. 1, se puede observar como la

3.2. Función objetivo a evaluar

La función objetivo a minimizar, para la cual se busca la solución óptima, se muestra en la Ec. (2).

$$f(\vec{x}) = (-20 + x_1)^3 + (-10 + x_2)^2 \quad (2)$$

Para la Ec. (2) se establecieron las fronteras con los valores de las soluciones mostradas en la Ec. (3) y Ec. (4):

$$10 \leq x_1 \leq 100 \quad (3)$$

$$5 \leq x_2 \leq 100 \quad (4)$$

Para las cuales se consideran 2 funciones de restricción mostradas en la Ec. (5) y Ec. (6):

$$g_1(\vec{x}) = -(x_1 - 5)^2 - (x_2 - 5)^2 + 30 \leq 0 \quad (5)$$

$$g_2(\vec{x}) = (x_1 - 6)^2 - (x_2 - 5)^2 - 80.21 \leq 0 \quad (6)$$

El objetivo de la investigación fue utilizar el algoritmo PGO para encontrar el valor para x_1 y x_2 con el menor valor posible de la función objetivo (2) sin violar las restricciones g_1 y g_2 mostradas en la Ec. (5) y Ec. (6).

3.3. Manejo de restricciones

El problema de optimización abordado presenta dos restricciones de desigualdad g_1 y g_2 ambas tratadas mediante un método de penalización estática aditiva.

Cada solución candidata fue evaluada a través de una función objetivo modificada $F(x)$ y el valor penalizado se calculó como se muestra en (7).

$$F(\vec{x}) = f(\vec{x}) + P1 * MAX(0, g_1(\vec{x})) + P2 * MAX(0, g_2(\vec{x})) \quad (7)$$

Donde $f(\vec{x})$ representa la función objetivo original y los coeficientes de penalización se fijaron en $P1 = 100$ y $P2 = 5$.

Con este enfoque, las soluciones que violan la primera restricción g_1 reciben una penalización fuerte, mientras que las violaciones menores en la segunda restricción g_2 se penalizan de forma moderada, equilibrando así factibilidad y exploración.

De esta manera, el algoritmo PGO mantiene la búsqueda dentro del dominio factible penalizando aquellas soluciones que se alejan de las regiones válidas.

4. Resultados y discusión

4.1. Espacio de soluciones

La Fig. 2, muestra el comportamiento de la función objetivo dentro del dominio definido por las restricciones definidas del problema. Este gráfico proporciona una visualización clara de cómo la función objetivo varía en función de los valores de x_1 y x_2 .

La forma de la superficie indica que la función tiene un valle profundo en la región inferior del dominio, lo que sugiere que las soluciones óptimas se encuentran en los límites más bajos de las variables de decisión.

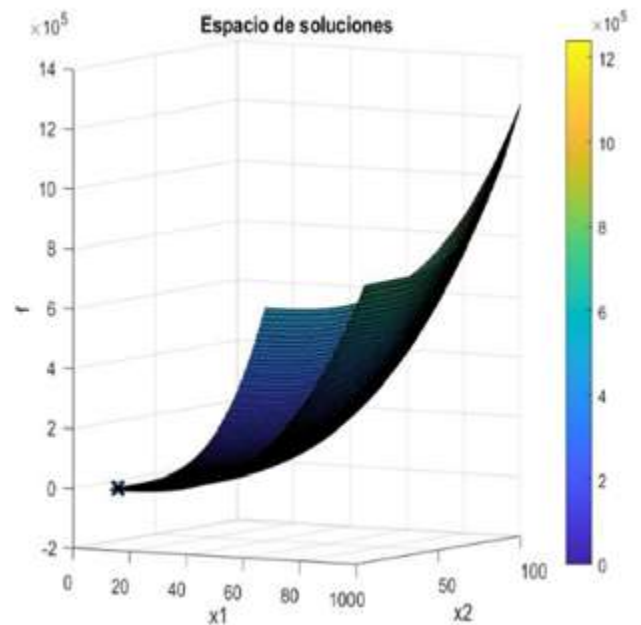


Figura 2: Visualización 3D de la función objetivo con las restricciones del espacio de búsqueda.

La visualización deja claro que el algoritmo no solo busca el mínimo global, sino que también debe ajustarse a las fronteras que limitan el espacio de búsqueda, las cuales están definidas por las restricciones g_1 y g_2 .

Por otro lado, es importante conocer que, el algoritmo de optimización PGO, al estar diseñado para abordar problemas no lineales con restricciones, debe navegar este espacio de soluciones mientras se asegura de que las soluciones generadas respeten las restricciones impuestas en el problema.

4.2. Restricción g_1

La Fig. 3, muestra la evolución de la restricción g_1 a lo largo de las generaciones revelando un comportamiento característico de los algoritmos evolutivos.

Inicialmente, el valor de g_1 es muy negativo, lo que indica

que las primeras soluciones generadas no cumplen con la restricción impuesta.

Sin embargo, conforme el algoritmo progresa y avanza a través de las generaciones, se observa una mejora sustancial en el valor de g_1 , acercándose gradualmente a cero.

Este comportamiento sugiere que el algoritmo ha logrado ajustar sus soluciones para acercarse a una región viable del espacio de soluciones, donde las restricciones comienzan a cumplirse de manera progresiva.

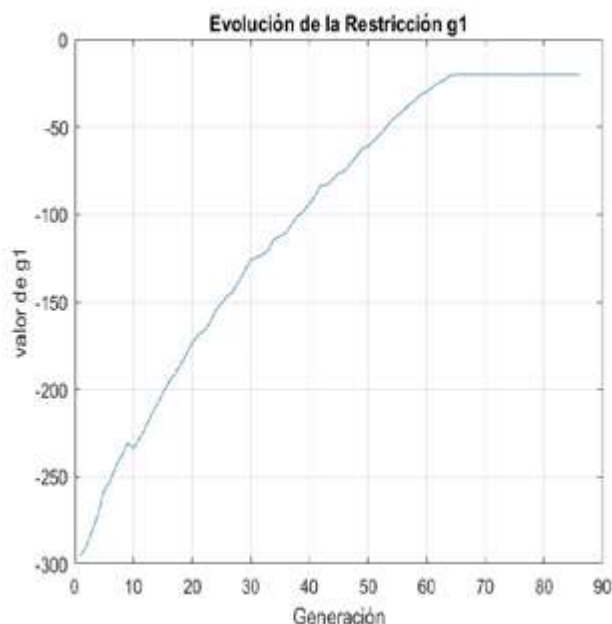


Figura 3: Progreso de la viabilidad de la restricción g_1 a lo largo de las generaciones.

En este sentido, el comportamiento observado en el PGO coincide con lo esperado en algoritmos de optimización con restricciones no lineales.

Al inicio, las soluciones propuestas por la población suelen presentar una baja viabilidad y se alejan de la región factible.

No obstante, a medida que avanza el proceso, el algoritmo va ajustando progresivamente dichas soluciones, lo que le permite mejorar su factibilidad y aproximarse gradualmente a una solución óptima dentro del espacio definido por las restricciones.

4.3. Restricción g_2

La Fig. 4, muestra la gráfica de evolución de g_2 el cual tiene un comportamiento similar al de la restricción g_1 , con valores inicialmente muy negativos.

A medida que avanzan las generaciones, el valor de g_2 disminuye, acercándose a un valor más cercano a cero.

Este comportamiento indica que el algoritmo es capaz de ajustar las soluciones de manera eficiente para cumplir con la restricción g_2 , de forma similar a cómo manejó g_1 .

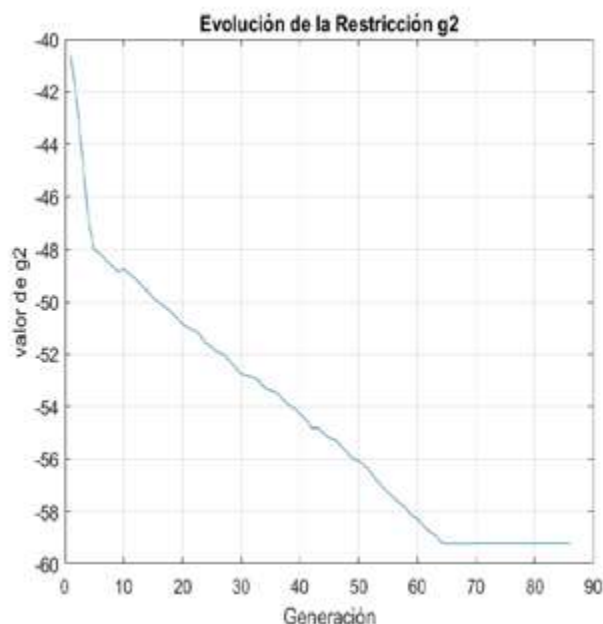


Figura 4: Comportamiento de la restricción g_2 a lo largo de las generaciones.

De esta manera, aunque no se cumple exactamente la restricción, el valor cercano a cero sugiere que el algoritmo ha encontrado una solución factible que se ajusta dentro de los límites permitidos.

4.4. Valor de fitness promedio

La Fig. 5 muestra la evolución del valor del fitness promedio del algoritmo a lo largo de las generaciones. Durante las primeras iteraciones, el valor de aptitud promedio es alto, lo que indica que las soluciones iniciales están alejadas del óptimo esperado.

A medida que avanza el proceso del algoritmo, este valor disminuye, lo que indica una mejora en la calidad de las soluciones y una mayor aproximación al mínimo de la función objetivo.

La estabilización durante las últimas generaciones indica que el algoritmo ha alcanzado la convergencia, donde las mejoras siguientes son mínimas y se concreta una solución cercana al óptimo.

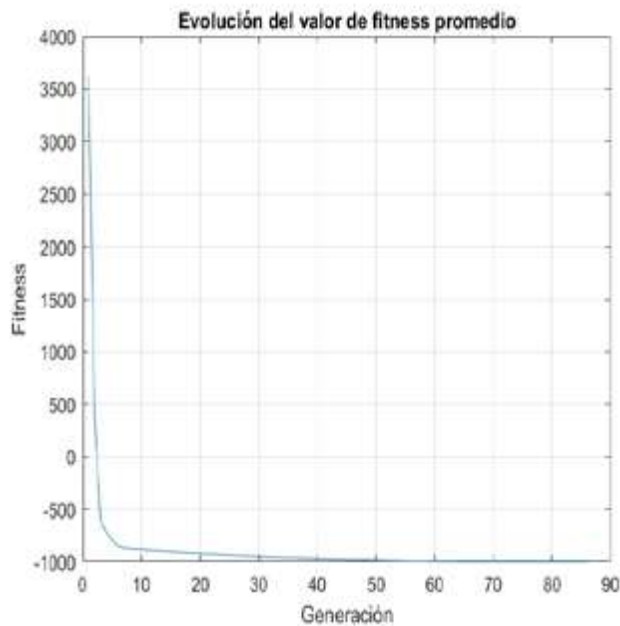


Figura 5: Progreso en la calidad de las soluciones promedio a medida que avanzan las generaciones.

De esta manera, el comportamiento de PGO es normal en los algoritmos evolutivos, ya que la población de soluciones se va ajustando y mejorando poco a poco durante el proceso de optimización.

Además, la rápida disminución del valor promedio de fitness es una buena señal de que el algoritmo explora bien el espacio de búsqueda y logra encontrar soluciones cercanas al óptimo.

4.5. Valor de mejor fitness

La Fig. 6, muestra la gráfica de evolución del valor de mejor fitness, en el cual se puede observar que este va disminuyendo en las primeras generaciones, lo que muestra que el algoritmo encuentra rápido opciones de buena calidad.

Luego, ese valor se estabiliza cerca de -999,9999, señal de que ya llegó a un punto en el que no puede mejorar mucho más. En otras palabras, el algoritmo logra converger hacia una solución ideal dentro del espacio de búsqueda, confirmando que su proceso de optimización es eficaz.

Asimismo, la estabilización rápida del valor del mejor fitness señala la eficiencia del algoritmo para encontrar rápidamente soluciones cercanas al mínimo global. Esto sugiere que el algoritmo PGO es capaz de manejar de buena manera los problemas de optimización no lineales, llegando un óptimo global en un número pequeño de

generaciones.

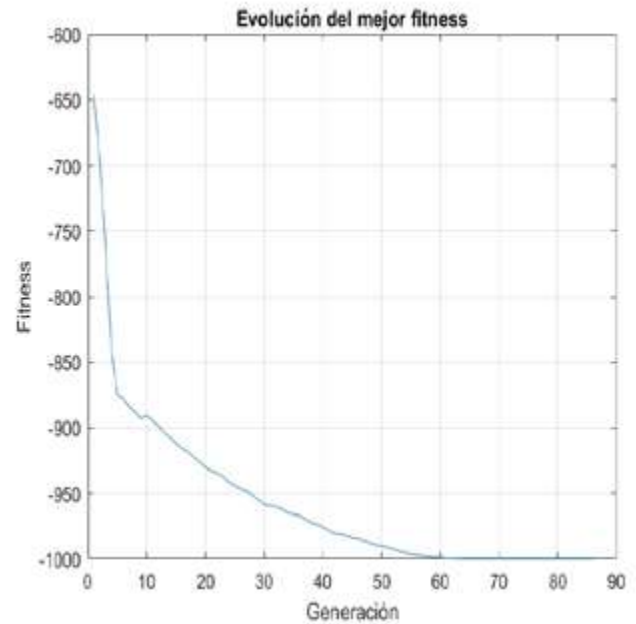


Figura 6: Comportamiento del valor de fitness más bajo encontrado a lo largo de las generaciones.

4.6. Resumen de resultados

La Tabla 3 muestra el resumen con los resultados obtenidos de la optimización a través del algoritmo PGO.

Tabla 3: Resultados obtenido de la optimización.

Variable	Valor obtenido
x ₁	10.0000
x ₂	9.9975
Mejor Fitness	-999.999994
g ₁	-19.975101
g ₂	-59.212491
NG	86
NC	20
NM	19

De la Tabla 3 se puede ver que el algoritmo PGO es eficiente en la resolución del problema de optimización con restricciones planteado, encontrando una solución óptima de la función objetivo y cumpliendo con las restricciones del problema.

Los valores de fitness y las restricciones cumplidas señalan una buena calidad de la solución, y el número de generaciones y evaluaciones por generación muestran que el algoritmo es eficiente en tiempo de cómputo.

El uso de mutaciones también fue adecuado para evitar caer en óptimos locales sin aumentar la complejidad del proceso.

El algoritmo realizó un total de 86 generaciones, lo que sugiere que exploró de manera adecuada el espacio de búsqueda sin necesidad de realizar muchas iteraciones.

También, se evaluaron 20 soluciones por generación, lo que indica que el tamaño de la población fue bueno para equilibrar la exploración y la explotación de las posibles soluciones.

El número de mutaciones fue de 19, lo que muestra que el algoritmo utilizó un número moderado de mutaciones para mantener la diversidad en la población sin realizar cambios drásticos.

De esta manera, los resultados demuestran que el algoritmo PGO es eficiente en la solución de problemas de optimización no lineales con restricciones, logrando encontrar una solución de alta calidad, cuidando las restricciones y utilizando de manera eficiente los recursos computacionales.

4.7. Comparación con el algoritmo PSO

Con el propósito de evaluar el desempeño del algoritmo PGO frente a otros métodos metaheurísticos, se realizó una comparación experimental con el algoritmo PSO, ampliamente utilizado en la literatura como referencia en problemas de optimización no lineales. Ambos algoritmos se implementaron en MATLAB 2024b® bajo las mismas condiciones experimentales.

Cada algoritmo se ejecutó 30 veces de manera independiente para obtener estadísticas robustas de desempeño. Se evaluaron tres métricas: valor promedio de la función objetivo (fitness), desviación estándar y número promedio de evaluaciones hasta la convergencia. Los resultados se resumen en la Tabla 4.

Tabla 4: Comparación del desempeño entre PGO y PSO.

Algoritmo	Mejor fitness	Promedio	Desviación estándar	Generaciones promedio	Tiempo de cómputo (s)
PGO	-999.9999	-999.8501	0.1205	86	4.2
PSO	-999.5453	-998.8732	0.4041	120	5.7

Los resultados muestran que PGO alcanza mejores valores de fitness promedio y menor desviación estándar en comparación con PSO, lo que indica una mayor estabilidad y capacidad de convergencia.

Además, PGO requirió un menor número de generaciones en promedio para alcanzar la convergencia,

lo cual refleja una exploración más eficiente del espacio de búsqueda.

En términos de tiempo de cómputo, PGO también mostró un mejor rendimiento (4.2 s frente a 5.7 s), debido a su estructura jerárquica de ramificación que favorece la explotación local sin perder diversidad poblacional.

En conjunto, estos resultados confirman que el PGO es competitivo frente a métodos metaheurísticos consolidados como PSO, y que constituye una alternativa viable para resolver problemas de optimización no lineales con restricciones.

5. Discusión

Los datos obtenidos de este estudio, señalan que el algoritmo de optimización PGO tiene un buen rendimiento en problemas de optimización lineal con restricciones.

De manera general, las soluciones que encuentra PGO en los mínimos globales lo hace de forma rápida y en pocas generaciones, lo que es un buen rendimiento comparado con otros métodos de optimización.

Una de las ventajas de PGO es que maneja de forma correcta las restricciones g1 y g2. Esto lo hace útil en situaciones donde no solo basta obtener la mejor solución, sino también es necesario e importante que dicha solución sea factible.

Otro aspecto interesante de PGO, es que se comporta de forma similar a otros métodos inspirados en la naturaleza, como el algoritmo PSO o FPA, los cuales logran un buen equilibrio entre la exploración de nuevas soluciones aprovechando las ya encontradas.

Para el problema planteado en este trabajo, PGO encontró soluciones válidas para el problema planteado utilizando pocas generaciones y mutaciones, lo que podría ser un indicio que este algoritmo tiene algunas ventajas en términos de tiempo y costos computacionales frente a otros algoritmos de optimización más complejos.

El comportamiento de PGO está en concordancia con la idea de que parte la inspiración del desarrollo del algoritmo, la cual consiste en que el crecimiento de las plantas depende de manera natural de la luz y de los nutrientes presente en el ambiente y que de manera natural equilibra la diversificación e intensificación de su desarrollo.

En contextos y aplicaciones reales, los resultados obtenidos en este trabajo sugieren que PGO podría ser utilizado en ingeniería y ciencias aplicadas, gracias a que converge de manera rápida y eficiente, lo cual es necesario en para la reducción de costos.

Los resultados comparativos con PSO evidencian que el algoritmo PGO ofrece una mejor estabilidad y menor tiempo de convergencia bajo las mismas condiciones de prueba.

Finalmente, este estudio señala que PGO es una buena

alternativa a otras metaheurísticas bioinspiradas, aunque es necesario agregar estrategias adicionales para hacerlo más preciso y en escenarios más exigentes testeando su rendimiento y probando su eficiencia con diferentes funciones de prueba complejas y sencillas.

6. Conclusión

Este trabajo mostró que el algoritmo PGO es una herramienta eficaz para resolver problemas de optimización no lineales con restricciones, demostrando su capacidad para mantener la factibilidad de las soluciones y alcanzar una rápida convergencia.

Su principal aportación radica en el análisis experimental del PGO bajo condiciones restringidas, incluyendo un esquema de penalización y su comparación con el algoritmo PSO.

Se pueden mencionar algunas conclusiones obtenidas del análisis de PGO.

- El algoritmo PGO encontró soluciones óptimas muy cercanas al mínimo global con un pequeño número de generaciones, demostrando su eficiencia en la resolución de problemas no lineales.
- PGO logró aproximarse a soluciones viables dentro de las restricciones, lo que demuestra su capacidad para manejar restricciones variables.
- La estabilización temprana del valor de fitness muestra que el algoritmo converge rápidamente hacia el óptimo global, evitando óptimos locales no deseados.
- Los resultados sugieren que PGO es adecuado para problemas reales donde las restricciones son un factor clave.

Finalmente, para trabajos futuros se recomienda investigar cómo mejorar el cumplimiento de las restricciones sin afectar la eficiencia del algoritmo PGO.

7. Patentes

No aplica.

Fuentes de financiamiento

No aplica.

Agradecimientos

Los autores agradecen a la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación por el apoyo brindado en los estudios de Posgrado.

Conflictos de interés

Los autores declaran que no existen conflictos de interés.

Abreviaturas

Las siguientes abreviaturas se utilizan en este manuscrito:

PSO: Particle Swarm Optimization

ACO: Ant Colony Optimization

FSO: Fish-Swarm Optimization

FA: Firefly Algorithm

FPA: Flower Pollination Algorithm

PGO: Algoritmo de Optimización de Crecimiento de Plantas.

8. Referencias bibliográficas

- [1] N. Mendoza-Andrade, E. Ruiz-y-Ruiz, and S. Rodríguez-Romo, "Solution Algorithms for the Capacitated Location Tree Problem with Interconnections," *Algorithms*, vol. 18, no. 1, pp. 1-24, 2025, doi: 10.3390/a18010050.
- [2] J. Rustagi, "Classical Optimization Techniques," *Eng. Optim. Theory Pract.*, 2019, doi: 10.1016/B978-0-12-604555-0.50008-X.
- [3] G. Kumar, R. Saha, M. Conti, T. Devgun, and R. Thomas, "GREPHRO: Nature-inspired optimization duo for Internet-of-Things," *Internet Things*, vol. 25, p. 101067, 2024, doi: 10.1016/j.iot.2024.101067.
- [4] U. Baumgartner, C. Magele, and W. Renhart, "Pareto optimality and particle swarm optimization," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 40, pp. 1172-1175, 2004, doi: 10.1109/TMAG.2004.825430.
- [5] J. D. Pintér, I. Castillo, and F. J. Kampas, "Nonlinear Optimization and Adaptive Heuristics for Solving Irregular Object Packing Problems," *Algorithms*, vol. 17, no. 11, 2024, doi: 10.3390/a17110480.
- [6] T. Takahama and S. Sakai, "Constrained optimization by the ϵ constrained differential evolution with gradient-based mutation and feasible elites," in *Proc. 2006 IEEE Int. Conf. Evolutionary Computation (CEC)*, Vancouver, BC, Canada, 2006, pp. 1-8, doi: 10.1109/CEC.2006.1688283.
- [7] A. Schueffler and T. Anke, "Fungal natural products in research and development," *Nat. Prod. Rep.*, vol. 31, no. 10, pp. 1425-1448, 2014.
- [8] C. A. Coello Coello, "Theoretical and numerical constraint-handling techniques used with evolutionary algorithms: a survey of the state of the art," *Computer*

- Methods in Applied Mechanics and Engineering, vol. 191, no. 11–12, pp. 1245–1287, 2002, doi: 10.1016/S0045-7825(01)00323-1.
- [9] Q. Duan, M. Mao, P. Duan, and B. Hu, “An improved artificial fish swarm algorithm optimized by particle swarm optimization algorithm with extended memory,” *Kybernetes*, vol. 45, pp. 210–222, Feb. 2016, doi: 10.1108/K-09-2014-0198.
- [10] M. Zhao, Z. Xuan, and C. Li, “Dynamics of a discrete-time predator-prey system,” *Adv. Differ. Equations*, vol. 2016, pp. 1–18, 2016.
- [11] H. Carreon-ortiz and F. Valdez, “Comparative Study of Type-1 and Interval Type-2 Fuzzy Logic Systems in Parameter Adaptation for the Fuzzy Discrete Mycorrhiza Optimization Algorithm,” 2023.
- [12] P. Saha, N. Bairagi, and M. Biswas, “On the dynamics of a discrete predator–prey model,” *Trends Biomath. Model. Optim. Comput. Probl. Sel. Work. from BIOMAT Consort. Lect. Moscow 2017*, pp. 219–232, 2018.
- [13] P. Liu and S. N. Elaydi, “Discrete competitive and cooperative models of Lotka–Volterra type,” *J. Comput. Anal. Appl.*, vol. 3, pp. 53–73, 2001.
- [14] X.-S. Yang, “Flower pollination algorithm for global optimization,” in *International conference on unconventional computing and natural computation*, Springer, 2012, pp. 240–249.
- [15] W. Cai, W. Yang, and X. Chen, “A Global Optimization Algorithm Based on Plant Growth Theory : Plant Growth Optimization,” pp. 1194–199, 2008, doi:10.1109/ICICTA.2008.416.
- [16] M. J. Kochenderfer and T. A. Wheeler, *Algorithms for optimization*. Mit Press, 2019.
- [17] A. Kumar, M. Nadeem, and H. Banka, “Nature inspired optimization algorithms: a comprehensive overview,” *Evol. Syst.*, vol. 14, pp. 141–156, 2022, doi: 10.1007/s12530-022-09432-6.
- [18] K.-M. Ong, P. Ong, and C. Sia, “A carnivorous plant algorithm for solving global optimization problems,” *Appl. Soft Comput.*, vol. 98, p. 106833, 2021, doi: 10.1016/j.asoc.2020.106833.
- [19] P. Sharma, K. Choudhary, K. Gupta, R. Chawla, D. Gupta, and A. Sharma, “Artificial plant optimization algorithm to detect heart rate & presence of heart disease using machine learning,” *Artif. Intell. Med.*, vol. 102, p. 101752, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.artmed.2019.101752>.
- [20] A. E. Ezugwu et al., “Metaheuristics: a comprehensive overview and classification along with bibliometric analysis,” *Artif. Intell. Rev.*, vol. 54, no. 6, pp. 4237–4316, 2021, doi: 10.1007/s10462-020-09952-0.
- [21] N. M. RAO and K. V. N. Rao, “TESTING THE PERFORMANCE OF PLANT GROWTH OPTIMIZATION ALGORITHM,” *i-Manager’s J. Futur. Eng. Technol.*, vol. 8, no. 4, 2013.
- [22] K. Mao, Q. Pan, X. Pang, and T. Chai, “A novel Lagrangian relaxation approach for a hybrid flowshop scheduling problem in the steelmaking- continuous casting process,” *Eur. J. Oper. Res.*, vol. 236, no. 1, pp. 51–60, 2014.
- [23] B. Benaissa, N. A. Hocine, S. Khatir, M. K. Riahi, and S. Mirjalili, “YUKI Algorithm and POD-RBF for Elastostatic and dynamic crack identification,” *J. Comput. Sci.*, vol. 55, p. 101451, 2021.

Salas de espera en entornos hospitalarios: análisis isovista y orientación de los pacientes

Waiting Areas in Hospital Environments: Isovist Analysis and Patient Orientation

LDG. Esteban Orlando Zavala Chávez
M en A María Esther Magos Carrillo
Universidad Autónoma de Querétaro
Querétaro, México
orlando.zavala@uaq.mx
maria.magos@uaq.mx

Resumen: En entornos hospitalarios de alta demanda como las Unidades de Medicina Familiar del Instituto Mexicano del Seguro Social los pacientes experimentan incertidumbre durante la espera debido a la dificultad de visualizar los nodos de control donde se gestionan los turnos de acceso a consultas. Esta desorientación visual afecta su capacidad para anticipar el turno y comprender la secuencia del proceso de atención. Ante esta problemática, el estudio propone un procedimiento metodológico basado en el análisis isovista que permite operacionalizar la visibilidad hacia la asistente médica, considerada un nodo de información clave, como un criterio proyectual mensurable y auditable. A partir de las plantas arquitectónicas de tres salas de espera, los asientos se definieron como puntos de observación con un cono horizontal de 120 grados, clasificando la visibilidad en acceso completo, parcial o nulo. Los resultados evidencian diferencias tipológicas: La Sala A presenta un cincuenta por ciento de asientos con acceso visual completo y cincuenta por ciento con acceso parcial, mientras que en las Salas B y C la totalidad corresponde a ubicaciones con desorientación visual. Más que en los valores numéricos, el valor principal del estudio reside en la construcción de un instrumento sistemático y trazable que permite comparar configuraciones espaciales, evaluar el desempeño de salas existentes y generar indicadores que vinculan la legibilidad espacial con la orientación del paciente. Se reconocen limitaciones inherentes al enfoque, como el análisis bidimensional y la exclusión de variables lumínicas o de movimiento, coherentes con el propósito de comparación y validación metodológica.

Palabras clave: ARQ; Arquitectura; Hospitales; Servicios de salud; Pacientes

Abstract: In high-demand hospital environments such as the Family Medicine Units of the Mexican Social Security Institute, patients experience uncertainty during waiting periods due to the difficulty of visualizing the control points where access to medical consultations is managed. This visual disorientation affects their ability to anticipate their turn and to understand the sequence of the care process. In response to this problem, the study proposes a methodological procedure based on isovist analysis that allows the visibility toward the medical assistant, considered a key information node, to be operationalized as a measurable and verifiable design criterion. Using the architectural floor plans of three waiting rooms, the seats were defined as observation points with a horizontal cone of 120 degrees, and visibility was classified as full, partial, or none. The results reveal typological differences: Room A presents fifty percent of seats with full visual access and fifty percent with partial access, while in Rooms B and C all seats correspond to locations with visual disorientation. Beyond numerical values, the main contribution of the study lies in the development of a systematic and traceable instrument that enables the comparison of spatial configurations, the evaluation of the performance of existing waiting rooms, and the generation of indicators that relate spatial legibility to patient orientation. The study acknowledges limitations inherent to the approach, such as its two-dimensional scope and the exclusion of lighting or movement variables, which are consistent with its purpose of methodological comparison and validation.

Keywords: ARQ; Architecture; Hospitals; Health Services; Patients

1. Introducción

La red de Unidades de Medicina Familiar (UMF) del Instituto Mexicano del Seguro Social (IMSS) constituye el primer nivel de atención y concentra el mayor volumen de contacto ambulatorio con la población derechohabiente. La cartera de servicios en estas unidades integra prevención, consulta de medicina familiar y apoyos diagnósticos, definiendo el primer contacto asistencial del sistema [1-2]. En 2023 se reportaron 92.9 millones de consultas de medicina familiar, dato que dimensiona las exigencias funcionales sobre áreas de acceso, tránsito y espera [3]. En este flujo, la sala de espera opera como articulador espacial que vincula admisión, gestión de turnos y acceso a consultorios, además de constituir un componente programático esencial conforme a la NOM-016-SSA3-2012, que establece capacidades mínimas, mobiliario y condiciones de accesibilidad [4]. No obstante, estos lineamientos se orientan a la dimensión operativa y no desarrollan criterios proyectuales relativos a la orientación del usuario y la visibilidad hacia los nodos de atención, ni a su capacidad para anticipar el momento de acceso al consultorio. Tal omisión limita la evaluación de la legibilidad espacial de las salas de espera y justifica la incorporación de instrumentos analíticos que vinculen configuración arquitectónica con orientación dentro del entorno asistencial. Paralelamente, el tiempo de espera es un indicador operativo con relevancia en calidad percibida [5], y el propio IMSS monitorea experiencias de usuario que incluyen condiciones operativas, funcionales, estéticas y de limpieza, así como percepción de trato, tiempos y confort, lo que relaciona decisiones de diseño y operación con la experiencia reportada [6-7].

En la práctica cotidiana, el nodo de atención, generalmente constituido por la estación de la asistente médica y, en segundo término, la puerta del consultorio, organiza la interacción con el servicio y condiciona las expectativas del usuario respecto a la secuencia de llamada y acceso. La disposición espacial de bancas, accesos y barreras físicas genera con frecuencia interrupciones del campo visual hacia ese nodo, afectando la capacidad de anticipación del paciente. La literatura internacional ha documentado que la configuración espacial puede producir zonas con visibilidad reducida o nula que dificultan comprender el flujo de trabajo entre personal y pacientes [8]; a su vez, la evidencia muestra que los tiempos de espera

impactan significativamente la satisfacción, efecto que se intensifica cuando faltan referentes visuales claros para interpretar la secuencia de turnos [9]. En este contexto, la visibilidad deja de ser un atributo meramente geométrico para actuar como variable proyectual con implicaciones funcionales y perceptuales.

La ausencia de lineamientos explícitos sobre visibilidad y orientación en normativas aplicables al primer nivel de atención vuelve pertinente recurrir a herramientas analíticas que representen y cuantifiquen el campo visual en términos útiles para el proyecto arquitectónico. En este trabajo se emplea el análisis isovista en su variante direccional. Entendemos por análisis isovista la modelación geométrica del conjunto de puntos del espacio visibles desde un punto de observación, formalizada en términos de polígonos de visibilidad y métricas derivadas [10]. Históricamente, estos análisis han sido aplicados para estudiar legibilidad, seguridad o control visual en ambientes construidos y se relacionan con marcos de sintaxis espacial que operacionalizan relaciones configuracionales [11-12]. Su principal ventaja radica en traducir situaciones perceptuales en valores cuantificables aplicables al diagnóstico y a la comparación de alternativas. Sus limitaciones, por otro lado, se asocian a la omisión de variables dinámicas (movimiento de usuarios, iluminación oclusiva, cambios temporales) y a la simplificación de la visión humana a condiciones planimétricas.

Dado que la experiencia de espera se produce desde posturas y orientaciones corporales específicas, el análisis isovista requiere ajustes para representar con mayor realismo el campo de visión efectivo del usuario. Por ello se adopta el análisis isovista direccional, que acota el campo visual a un ángulo horizontal definido y a una orientación determinada del observador. Este enfoque resulta pertinente en salas de espera, donde la posición de asiento, la orientación de bancas y la localización del nodo de atención restringen el abanico de direcciones relevantes. El análisis direccional permite valorar no sólo la existencia de visibilidad, sino su pertinencia funcional hacia objetivos específicos (por ejemplo, mostrador o puerta de consultorio), y establecer indicadores operativos sobre accesibilidad visual plena, parcial o inexistente. Así, se favorece la lectura proyectual: la traducción de atributos espaciales en umbrales y parámetros evaluables de diseño (p. ej., proporciones de asientos

con acceso visual completo a los nodos de atención).

En el estado del arte, diversas herramientas computacionales han contribuido a medir relaciones espaciales pertinentes al desempeño asistencial. El Visibility Graph Analysis (VGA) ha permitido inferir patrones de intervisibilidad y conectividad, sustentando decisiones relativas a accesos, mobiliario y emplazamiento de estaciones de trabajo [13], [11]. La sintaxis espacial ha ofrecido el andamiaje teórico para relacionar configuración y patrones de movimiento e interacción [12], mientras que desarrollos y plataformas asociadas (por ejemplo, DepthmapX) han facilitado análisis de redes de visibilidad y rutas potenciales en distintos contextos [14]. De forma complementaria, enfoques de simulación basada en agentes han reproducido desplazamientos y ocupación, enriqueciendo la lectura de flujos y cuellos de botella. [13], [15]. Sin embargo, gran parte de estos trabajos se ha orientado a hospitales de gran escala, circulación global o desempeño del personal, más que a la orientación del paciente sentado en entornos de primer nivel. Asimismo, los análisis de visibilidad global tienden a privilegiar configuraciones omnidireccionales, que resultan menos sensibles a la condición direccional propia de la situación de espera.

En consecuencia, se identifica un vacío metodológico en la evaluación específica de la orientación del paciente en salas de espera ambulatorias: hacen falta instrumentos que, sin perder la precisión geométrica de los análisis de visibilidad, ajusten el modelo a las condiciones direccionales y proporcionen indicadores simples, comparables y accionables en el proyecto arquitectónico. El enfoque que aquí se presenta atiende ese vacío al estructurar una herramienta metodológica que integra análisis isovista direccional con una revisión normativa institucional, de modo que las métricas de visibilidad se vinculen con funciones y responsabilidades del nodo de atención en la gestión de turnos [6], [7], [16], [17].

Desde la perspectiva de la experiencia del usuario, la psicología ambiental ha mostrado que los atributos espaciales tangibles como la luz, las vistas y las referencias legibles inciden en respuestas fisiológicas y cognitivas asociadas al estrés y al sentido de control, y fundamentan el valor de contar con señales ambientales claras en entornos asistenciales [18]. Estudios recientes

sobre salas de espera, con metodologías cualitativas y transculturales, reportan que el diseño de estos espacios influye en estados emocionales y en la interpretación del tiempo de espera [19]. En paralelo, investigaciones en contextos oncológicos han explorado cómo las narrativas de la espera, tanto en su dimensión física como informacional, modelan la claridad de la experiencia del paciente [20]. Si bien estos aportes no se centran en el primer nivel de atención ni ofrecen mediciones espaciales objetivas, su convergencia con la literatura de visibilidad sugiere que dotar de claridad visual la relación usuario-nodo aporta simultáneamente a la eficiencia operativa y al bienestar percibido. La propuesta metodológica que aquí se describe busca articular ambas dimensiones: traducir la visibilidad relevante para la orientación en indicadores cuantitativos replicables, sin perder de vista sus implicaciones perceptuales.

En términos operativos, la orientación visual se entiende como la capacidad del usuario para identificar el nodo de atención y anticipar la secuencia de llamado-acceso. Desde la lógica del proyecto, esta capacidad depende de la posición y orientación relativas entre asientos y nodo, de la profundidad del recinto y de la continuidad del campo visual libre de obstrucciones. El análisis direccional permite clasificar cada asiento según su acceso visual hacia los nodos de atención en categorías discretas (completo, parcial, inexistente) y, con ello, detectar zonas de desorientación visual: áreas en las que se concentra la imposibilidad de observar uno o más nodos relevantes. Los valores obtenidos en el análisis constituyen indicadores cuantitativos verificables que complementan los criterios normativos de capacidad y equipamiento, al incorporar una dimensión espacial orientada a evaluar la legibilidad y comprensión del entorno por parte de los usuarios dentro del servicio.

No obstante, es pertinente reconocer límites del enfoque. El análisis se apoya en representación planimétrica y no incorpora, en su formulación básica, efectos de iluminación, ruido o señalización dinámica; tampoco modela el movimiento intra-sala ni las variaciones de ocupación horaria. Estas restricciones son comunes a enfoques geométricos de visibilidad y pueden mitigarse, en etapas posteriores de evaluación, mediante integraciones con simulación dinámica, auditorías de wayfinding o estudios observacionales. El valor del instrumento propuesto radica en su transferibilidad: ofrece una entrada de bajo costo de

modelado para detectar patrones de desorientación visual vinculados a decisiones de planta y mobiliario, y para justificar reconfiguraciones puntuales del frente de atención.

El panorama institucional refuerza la relevancia de esta perspectiva. Documentos operativos del IMSS otorgan centralidad al nodo de atención en la comunicación con el derechohabiente y en la gestión de turnos, incluyendo acciones informativas en sala de espera [6], [7]. Guías internacionales de infraestructura, por su parte, subrayan que en entornos de alto estrés los sistemas de orientación efectivos, comprendidos más allá de la señalética, contribuyen al bienestar, la seguridad y la sensación de control [12]. Integrar, por tanto, un criterio explícito de visibilidad hacia los nodos de atención en UMF no solo dialoga con prácticas de wayfinding, sino que traduce la responsabilidad informativa del servicio en una condición espacial comprobable.

En síntesis, la literatura indica que la visibilidad hacia el nodo de atención condiciona la orientación del paciente y su comprensión del flujo asistencial [8]–[13]; no obstante, en el primer nivel de atención persisten vacíos proyectuales que impiden incorporar este factor como parámetro de diseño. Para atender dicho vacío, este trabajo estructura una herramienta metodológica que adapta el análisis isovista a condiciones direccionales de espera, lo integra con criterios normativos del rol del nodo de atención y produce indicadores comparables entre configuraciones de salas como soporte a decisiones proyectuales y operativas.

Con base en lo anterior, el objetivo de este estudio es desarrollar y aplicar una herramienta metodológica para el diagnóstico de la visibilidad y la orientación del usuario en salas de espera del primer nivel de atención, integrando análisis isovista direccional y revisión normativa institucional, a fin de identificar zonas de desorientación visual y proponer parámetros verificables que orienten el diseño de espacios asistenciales más legibles y centrados en la experiencia del usuario.

2. Materiales y métodos

El estudio se basó en planos arquitectónicos en planta de

salas de espera de Unidades de Medicina Familiar (UMF) del IMSS con servicio activo de consulta externa. Por razones de confidencialidad institucional, las unidades se identifican con códigos genéricos que no permiten su rastreo y no se publica su localización. Se seleccionaron tres configuraciones tipológicas representativas del primer nivel de atención con el fin de cubrir variaciones recurrentes de disposición y profundidad del recinto: (a) lineal con frente continuo de atención, (b) modular en batería con frentes segmentados y (c) longitudinal con varios accesos y nodos distribuidos a lo largo de un frente extendido. Se incluyeron casos con plano acotado y legible, presencia de sala de espera asociada a consulta externa, identificación del nodo de atención (estación de asistente médica) y mobiliario de espera dibujado en planta; se excluyeron planos sin escala o deformados, salas compartidas con usos no comparables y casos sin nodo operativo reconocible.

El procedimiento se basó en un análisis espacial aplicado, orientado a evaluar la relación entre la configuración arquitectónica y la visibilidad de los nodos de atención. Los planos fueron digitalizados en Rhinoceros 8; la modelación paramétrica y el cálculo se realizaron en Grasshopper con el complemento DecodingSpaces (empleado previamente en análisis de visibilidad hospitalaria [11]). Para cada sala se delimitó el polígono del recinto, se identificaron los nodos de atención y se colocó un punto por asiento con orientación coincidente con el eje de la banca.

Se empleó análisis isovista direccional en planta. Cada asiento se modeló como punto de observación con cono horizontal de 120°, orientado según la banca. Este ángulo corresponde al solapamiento binocular efectivo descrito para la visión humana en el plano horizontal ($\approx 114\text{--}120^\circ$) y se adopta como umbral operativo conservador para estandarizar la comparación entre tipologías y evitar sobreestimar la orientación visual mediante visión periférica amplia [21]–[22]. No se representó la rotación de cabeza/cuello a fin de mantener la comparabilidad entre configuraciones y evitar incrementos artificiales de acceso visual. Se consideraron como oclusiones los elementos opacos representados en el plano (muros, mamparas, mostradores) tratándolos como barreras lineales a la línea de vista. El análisis es estrictamente bidimensional; no se modelaron factores verticales ni dinámicos (iluminación, señalización, acústica, ocupación y movimiento de usuarios).

Para la medición se verificó, asiento por asiento, si el conjunto de nodos de atención quedaba dentro del cono de 120° y sin oclusión. Con base en ello, cada asiento se clasificó en tres categorías: acceso completo (todos los nodos dentro del cono y sin oclusión), acceso parcial (al menos un nodo completamente visible) y sin acceso visual (ningún nodo visible por estar fuera del cono u ocluido). A partir de esta clasificación se elaboró una matriz asiento-nodo que registró la visibilidad de cada caso. Con ello se obtuvieron las frecuencias y porcentajes por categoría y el nivel de desorientación visual, calculado a partir de los asientos con acceso parcial o sin acceso visual. Las cartografías resultantes muestran la codificación por asiento y la distribución espacial de las categorías, permitiendo comparar proporcionalmente salas con distinto número de asientos.

Para el análisis de los casos de estudio se empleó un método organizado en cinco fases: 1) digitalización de planos y delimitación de las salas de espera, 2) identificación de los nodos de atención, 3) colocación de conos de visibilidad de 120° desde cada asiento, 4) generación de isovistas direccionales orientadas hacia dichos nodos y 5) clasificación de niveles de visibilidad y elaboración de cartografías de zonas de desorientación visual. La aplicación de este procedimiento permitió estandarizar y replicar los pasos en cada caso, asegurando la consistencia del análisis y la comparabilidad de los resultados. Este instrumento, además, facilita su reproducción en otros entornos hospitalarios y su adaptación a distintos contextos arquitectónicos de atención ambulatoria, como se muestra en la fig. 1.

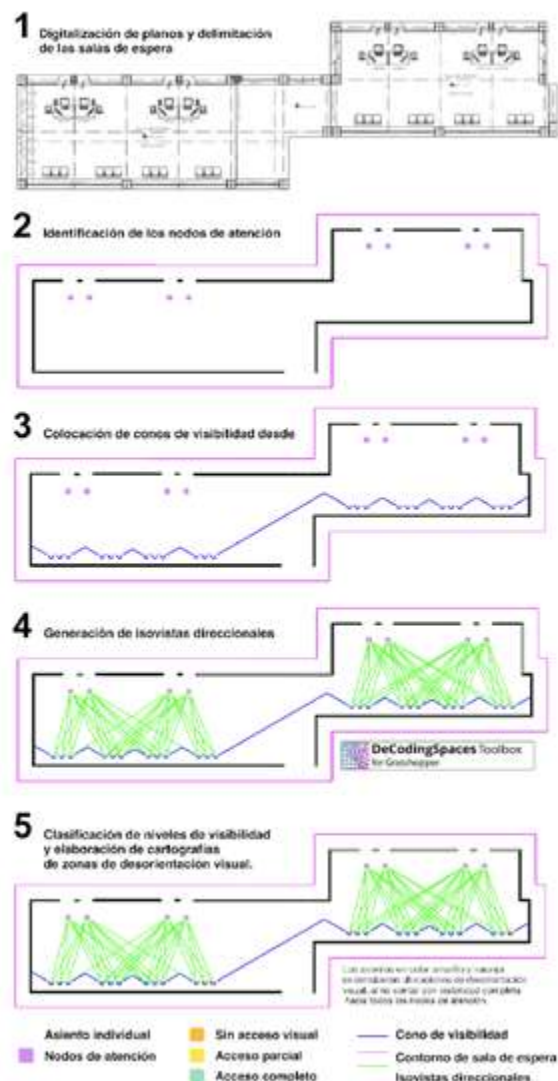


Figura 1: Fases del proceso de análisis.

3. Resultados

El análisis de visibilidad se aplicó a tres salas de espera de UMF: Sala A, Sala B y Sala C. Se utilizó un procedimiento uniforme que clasifica cada asiento según su acceso visual en tres categorías: acceso completo, acceso parcial o sin acceso hacia los nodos de atención. La categorización se realizó de manera individual para cada asiento, tomando como referencia el cálculo isovista direccional con un ángulo de 120° y las oclusiones representadas en el plano. Las cartografías correspondientes a cada caso se presentan en las figuras 2 a 4, mientras que el Cuadro 1 resume las distribuciones porcentuales obtenidas.

En el caso de la Sala A, de configuración lineal, se contabilizaron 24 asientos. La clasificación resultó en 50.0 % con acceso completo y 50.0 % con acceso parcial, sin registros en la categoría de sin acceso visual. La fig. 2 ilustra una disposición continua de asientos a lo largo del frente de atención y permite ubicar con precisión la transición entre ambas categorías en el mismo recinto.

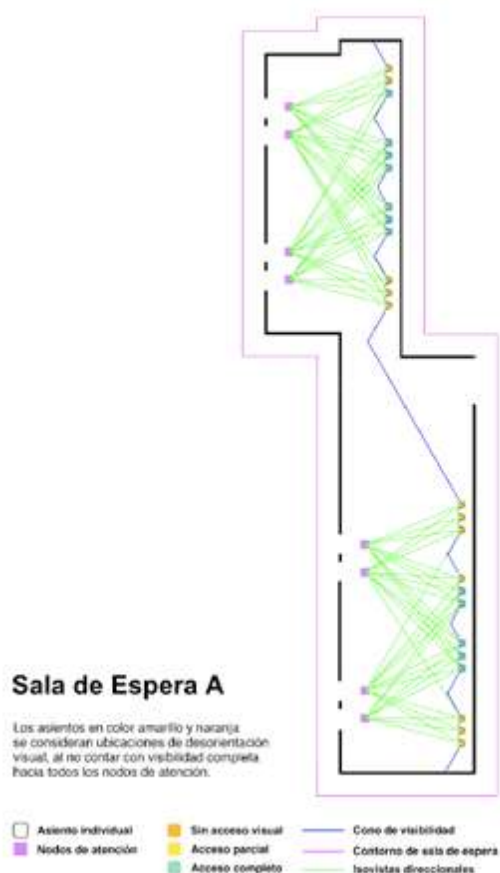


Figura 2: Cartografía de visibilidad – Sala A.

Por contraste, la Sala B presenta una configuración modular en batería con 91 asientos. El conteo indica 0.0 % con acceso completo, 29.7 % con acceso parcial y 70.3 % sin acceso visual. Como se aprecia en la fig. 3, la distribución por módulos da lugar a agrupamientos definidos: las primeras filas concentran con mayor frecuencia los asientos con acceso parcial, mientras que las filas intermedias y posteriores acumulan segmentos continuos clasificados como sin acceso visual.

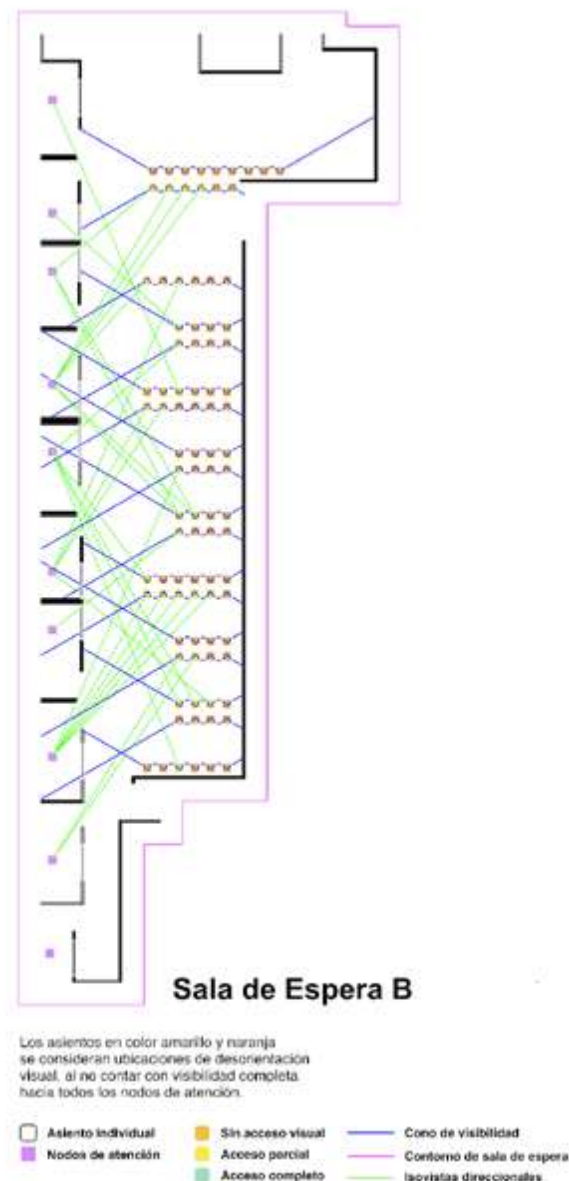


Figura 3: Cartografía de visibilidad – Sala B.

Finalmente, la Sala C corresponde a una configuración longitudinal con 90 asientos. La clasificación arrojó 0.0 % con acceso completo, 25.6 % con acceso parcial y 74.4 % sin acceso visual. La fig. 4 muestra una secuencia extendida a lo largo del eje principal del recinto, en la que los asientos con acceso parcial tienden a disponerse cerca de los accesos y los asientos sin acceso visual se distribuyen de forma más amplia en la franja media y posterior.

matriz asiento por nodo de atención.

Cuadro 1: Distribución porcentual de asientos por categoría de visibilidad y sala de espera

Sala de espera	Total de asientos (n)	Acceso completo (%)	Acceso parcial (%)	Sin acceso visual (%)	Ubicaciones de desorientación visual (%)
Sala A	24	50.0	50.0	0.0	50.0
Sala B	91	0.0	29.7	70.3	100.0
Sala C	90	0.0	25.6	74.4	100.0

Como verificación interna, se comprobó que la suma de categorías coincide con el total de asientos en cada sala y que la asignación de etiquetas es estable al reproducir el cálculo con los mismos parámetros. Tanto las cartografías como la tabla resumen proceden de la misma corrida, lo que asegura consistencia entre la representación gráfica y los porcentajes reportados; adicionalmente, se revisó la integridad del trazado en planta para garantizar que las oclusiones consideradas correspondieran a las geometrías presentes en los planos.

4. Discusión

Los resultados muestran que la configuración espacial y la disposición del mobiliario condicionan la orientación visual del usuario hacia los nodos de atención. El valor principal del estudio radica en que el procedimiento utilizado traduce esa relación en indicadores verificables y en cartografías comparables entre salas. La clasificación asiento por asiento en acceso completo, acceso parcial y sin acceso visual permite pasar de observaciones cualitativas a un diagnóstico cuantitativo replicable. El análisis isovista direccional con un cono fijo de 120 grados y con reglas explícitas de oclusión establece una base común de lectura que evita sobreestimar la orientación visual y favorece la comparación proporcional entre configuraciones.

La distinción entre las tres tipologías estudiadas funciona como demostración de uso de la herramienta y no como intento de generalización. En la configuración lineal se observó un reparto equilibrado entre acceso completo y acceso parcial. En las configuraciones modular y longitudinal predominaron los asientos clasificados como

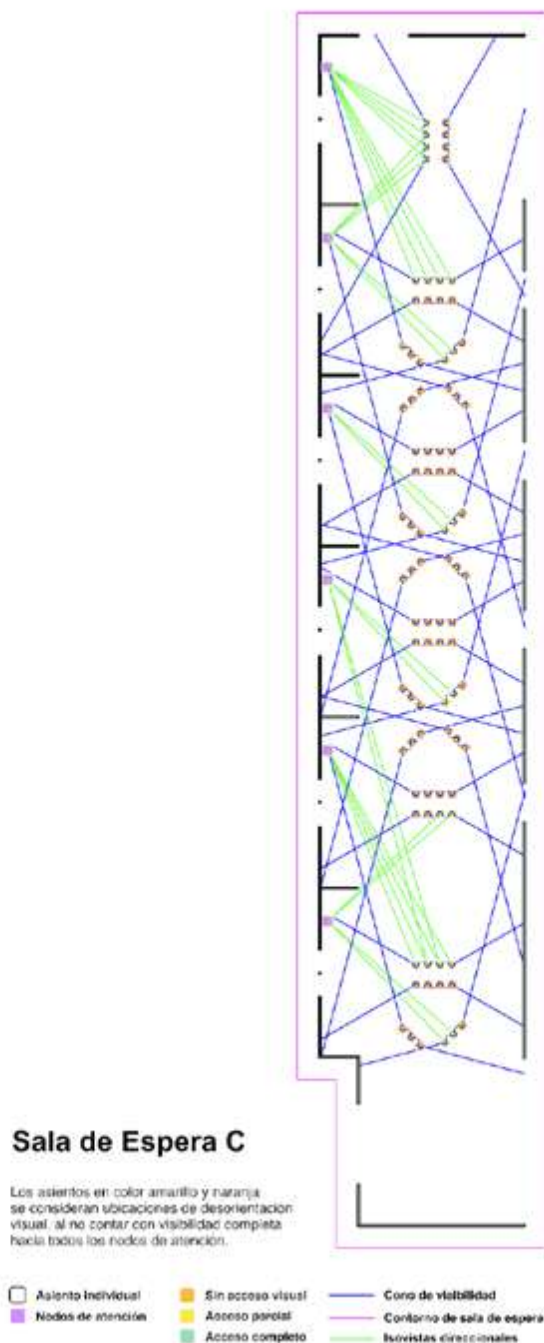


Figura 4: Cartografía de visibilidad – Sala C.

En conjunto, el Cuadro 1 permite comparar proporcionalmente las tres configuraciones sin depender del tamaño muestral de cada sala. Además del desglose por categoría, se reporta el porcentaje de desorientación visual, entendido como la suma de los casos con acceso parcial y los que carecen de acceso visual, con los siguientes valores: 50.0 % en la Sala A, 100.0 % en la Sala B y 100.0 % en la Sala C. Estas proporciones se corresponden con las cartografías y con los conteos obtenidos a partir de la

El patrón obtenido es congruente con los aportes que relacionan morfología del espacio y legibilidad. La literatura citada en [8]–[9] asocia la presencia de referencias visuales con la percepción de orden y control. Los fundamentos de Benedikt en [10] y los desarrollos de análisis de visibilidad referidos en [11], [13], [16] señalan que la continuidad del campo visual favorece la comprensión espacial. En este estudio, la concentración de asientos con acceso parcial o nulo permite localizar con precisión zonas de desorientación y se vincula con los aportes teóricos existentes al proponer una forma operacional de cartografiar el fenómeno en entornos ambulatorios del primer nivel.

Desde la práctica proyectual, los resultados del análisis permiten definir metas de visibilidad hacia el nodo de atención en etapas de anteproyecto, comparar alternativas bajo un mismo umbral geométrico y orientar ajustes en configuraciones existentes mediante el reacomodo de bancas, la clarificación del frente de atención y la revisión de accesos. Esta articulación entre diagnóstico y acción adquiere relevancia en contextos con recursos limitados, donde los planos en planta constituyen el insumo principal para evaluar y mejorar.

El alcance metodológico se definió de forma conservadora. El modelo trabaja en dos dimensiones, no incorpora rotación de cabeza y no integra variables dinámicas ni ambientales. Estas decisiones preservan la comparabilidad entre casos y establecen un piso común para la lectura de resultados. La misma estructura admite ampliaciones por medio de simulación dinámica, modelado tridimensional y auditorías de wayfinding con integración de señalética y condiciones lumínicas cuando el objetivo sea explorar escenarios específicos.

Con lo anterior se confirma que el aporte del trabajo es de naturaleza metodológica. La herramienta convierte la relación entre la configuración espacial y la orientación del paciente en evidencia cuantificable y cartografiable. Además, puede aplicarse de manera estandarizada a salas de espera del primer nivel y abre la posibilidad de avanzar hacia lineamientos de diseño que incorporen la visibilidad hacia los nodos de atención como parámetro explícito, manteniendo la trazabilidad del procedimiento y la comparabilidad de resultados entre unidades.

5. Conclusión

El estudio presenta una herramienta metodológica orientada a diagnosticar la visibilidad hacia los nodos de atención en salas de espera del primer nivel. La herramienta convierte la configuración espacial en indicadores verificables y en cartografías que localizan con precisión ubicaciones de desorientación visual. Con ello ofrece un modo sistemático de leer la relación entre la disposición del mobiliario, el trazado del recinto y la orientación del usuario, y aporta una base objetiva para discutir decisiones de diseño centradas en la legibilidad del servicio.

La demostración en tres configuraciones tipológicas confirma que el procedimiento es estandarizable y reproducible. El uso consistente de un umbral geométrico único y reglas claras de clasificación permite comparar proporcionalmente salas con distintos tamaños muestrales. Este rasgo habilita aplicaciones que van más allá del análisis puntual: auditorías periódicas de salas de espera, evaluación intersitio dentro de una misma red de unidades y seguimiento de mejoras tras reacomodos de mobiliario o ajustes del frente de atención. El valor de la herramienta no reside en los números de un caso aislado, sino en la posibilidad de construir series comparables en el tiempo y entre sedes.

Desde la práctica proyectual, los resultados del análisis se integran de manera natural en etapas estratégicas del proceso de diseño. En la fase de anteproyecto, permiten establecer metas explícitas de visibilidad orientadas hacia el nodo de atención. En la comparación de alternativas facilitan decidir entre configuraciones que, a simple vista, podrían parecer equivalentes, pero difieren en su capacidad para orientar al usuario. En la intervención de espacios existentes orientan reacomodos puntuales con una relación directa entre la cartografía y la acción: mover bancas, reorganizar accesos o clarificar el frente de atención para transformar ubicaciones de desorientación en posiciones

con acceso visual.

El enfoque también tiene implicaciones institucionales. Al producir indicadores simples y trazables, la herramienta puede traducirse en criterios operativos dentro de lineamientos de infraestructura para Unidades de Medicina Familiar. Esto facilitaría establecer objetivos mínimos de visibilidad hacia los nodos de atención, incorporar verificaciones en procesos de supervisión y respaldar con evidencia las propuestas de mejora. La economía de insumos favorece su adopción en contextos con recursos limitados, ya que trabaja a partir de planos en planta y requiere una parametrización transparente.

El alcance metodológico se definió de manera intencionalmente acotada. El modelo opera en dos dimensiones, utiliza un ángulo direccional fijo y no incorpora rotación de cabeza, movimiento de usuarios ni condiciones ambientales. Estas decisiones preservan la comparabilidad entre casos y establecen una base común para la interpretación de los resultados. A partir de esta estructura, se plantea una línea de desarrollo futuro que puede integrar simulación dinámica, evaluación tridimensional y auditorías de orientación que incluyan señalética y niveles de iluminación, con el fin de ampliar la lectura perceptual cuando los objetivos del proyecto así lo requieran.

En conjunto, la herramienta propuesta aporta un marco claro y replicable para incorporar la visibilidad como parámetro explícito de diseño en el primer nivel de atención. Al transformar la relación entre configuración espacial y orientación del paciente en evidencia cuantificable y cartografiable, ofrece fundamentos para decisiones de proyecto, para políticas internas de evaluación y para la construcción de lineamientos que favorezcan entornos de espera más legibles y centrados en el usuario.

Agradecimientos

Las autoras y los autores agradecen a la SECIHTI y a la Universidad Autónoma de Querétaro por el respaldo otorgado para la realización de esta investigación, así como al Instituto Mexicano del Seguro Social por facilitar la información técnica y las plantas arquitectónicas que hicieron posible el desarrollo del análisis.

Abreviaturas

Las siguientes abreviaturas se utilizan en este manuscrito:

IMSS: Instituto Mexicano del Seguro Social
UMF: Unidad de Medicina Familiar
NOM: Norma Oficial Mexicana
VGA: Visibility Graph Analysis
TAOD: Técnico en Atención y Orientación al Derechohabiente

6. Referencias bibliográficas

- [1] Instituto Mexicano del Seguro Social (IMSS), “Catálogo de Unidades de Medicina Familiar de primer nivel del IMSS,” 2024.
- [2] IMSS, “Catálogo de servicios de las UMF,” s. f.
- [3] IMSS, *Informe Financiero y Actuarial 2023*, cap. III.
- [4] Secretaría de Salud, *NOM-016-SSA3-2012, que establece las características mínimas de infraestructura y equipamiento de establecimientos para la atención médica ambulatoria*, 2013.
- [5] Secretaría de Salud, “Indicador: Tiempo de espera en consulta externa,” s. f.
- [6] IMSS, “ENCAL 2024, Cuestionario de satisfacción para primer nivel,” 2024; IMSS, GC10-003-001: Procedimiento TAOD, 2021.
- [7] IMSS, 2430-003-041, 2025.
- [8] F. A. Mustafa and S. S. Ahmed, “The role of waiting area typology in limiting the spread of COVID-19: Outpatient clinics of Erbil hospitals,” *Frontiers of Architectural Research*, 2022.
- [9] H. Zhang *et al.*, “Effect of waiting time on patient satisfaction in outpatient clinics: Evidence from large-scale surveys in China,” *Frontiers in Public Health*, 2023.
- [10] M. L. Benedikt, “To take hold of space: isovists and isovist fields,” *Environment and Planning B: Planning and Design*, vol. 6, no. 1, pp. 47–65, 1979, doi: 10.1068/b060047.
- [11] A. Turner, M. Doxa, D. O’Sullivan, and A. Penn, “From isovists to visibility graphs: A methodology for the analysis of architectural space,” *Environment and Planning B: Planning and Design*, vol. 28, no. 1, pp. 103–121, 2001.
- [12] B. Hillier and J. Hanson, *The Social Logic of Space*. Cambridge, U.K.: Cambridge Univ. Press, 1984.
- [13] K. S. Sailer, C. Obst, and S. Dean, “Lanes, clusters, sightlines: Modelling patient flow in medical environments,” *Buildings and Cities*, vol. 6, no. 1, pp. 1–22, 2025.
- [14] T. Varoudis, “DepthmapX—Open source spatial network analysis software,” Bartlett, UCL, 2012.
- [15] K. Sailer and A. Penn, “Spatiality and transpatiality in workplace studies,” in *Proc. 7th Int. Space Syntax*

- Symp., 2009, pp. 1–12.
- [16] M.-S. Chen, Y.-T. Ko, and W.-C. Hsieh, “Exploring the planning and configuration of the hospital wayfinding system by space syntax: A case study of Cheng Ching Hospital,” *ISPRS Int. J. Geo-Inf.*, vol. 10, no. 8, p. 570, 2021.
 - [17] Defense Health Agency, *Wayfinding Guidelines and Signage Standards for MHS Facilities*, 2022.
 - [18] R. S. Ulrich, “Effects of interior design on wellness: Theory and recent research,” *J. Health Care Interior Design*, vol. 3, pp. 97–109, 1991.
 - [19] A. Huber, “Designing Worthy Waiting Spaces: A Cross-Cultural Study,” *SAGE Open*, vol. 14, no. 1, pp. 1–15, 2024.
 - [20] M. Světlák, “The New Narrative of Waiting in Oncology Care,” *Patient Experience Journal*, vol. 11, no. 2, pp. 45–57, 2024.
 - [21] I. P. Howard and B. J. Rogers, *Binocular Vision and Stereopsis*. New York, NY, USA: Oxford Univ. Press, 1995.
 - [22] N. J. Wade and M. T. Swanston, *Visual Perception: An Introduction*, 3rd ed. New York, NY, USA: Psychology Press, 2013.

Mejora en la perfilometría por transformada de Fourier 2D utilizando filtrado con distintas formas de máscara

Improved 2D Fourier transform profilometry using filtering with different mask shapes

García Echevarría, Mercy Yureymi; Aguayo Serrano, Francisco Emiliano; Pedraza Ortega, Jesús Carlos; Espinosa Bernal, Osmar Antonio; Ramos Arreguin, Juan Manuel; Arriaga Tovar, Saul

*Afiliación: Facultad de Ingeniería
Universidad Autónoma de Querétaro
Querétaro, México*

*mgarciae114@gmail.com; ORCID (<https://orcid.org/0009-0001-6342-4869>)
microstudio.aguayo@gmail.com; ORCID(<https://orcid.org/0000-0003-0500-1873>)
caryoko@yahoo.com; ORCID(<https://orcid.org/0000-0001-5125-8907>)
oespinosa07@alumnos.uaq.mx; ORCID(<https://orcid.org/0000-0002-6730-2009>)
jsistdig@yahoo.com.mx; ORCID(<https://orcid.org/0000-0001-5125-8907>)
saul.tovar@uaq.mx; ORCID(<https://orcid.org/0000-0002-2695-1934>)*

Resumen: La reconstrucción tridimensional (3D) es una herramienta esencial en ingeniería y metrología óptica, ya que permite obtener información precisa sobre la topografía de superficies sin contacto físico. Entre las técnicas más destacadas se encuentra la Perfilometría por Transformada de Fourier (FTP), la cual analiza la deformación de un patrón de franjas proyectado sobre un objeto para recuperar su relieve con alta precisión. En la presente investigación se presenta la medición topográfica de la precisión, así como la vulnerabilidad de la Perfilometría de Fourier ante el ruido y las discontinuidades. Se propuso realizar una evaluación sistemática del impacto de las diferentes geometrías de máscaras de filtrado espectral en conjunto con diversos algoritmos de desenrollamiento de fase en el proceso de reconstrucción 3D. Para ello, se implementó la perfilometría de Fourier bidimensional, lo que permitió analizar la calidad de las fases reconstruidas según la forma del filtro aplicado. Los resultados demostraron que las máscaras elípticas y en forma de diamante ofrecieron un mejor desempeño, generando fases más suaves y continuas en comparación con la máscara rectangular, la cual amplificó el ruido. Finalmente, se estableció que la sinergia entre un filtrado espectral selectivo y algoritmos robustos de desenrollamiento de fase, como los propuestos por Ghiglia o Zhao, produjo la mayor estabilidad y fidelidad en la reconstrucción tridimensional de las superficies analizadas.

Palabras clave: Perfilometría de Fourier 2D, filtrado espectral, Reconstrucción 3D, desenrollamiento de fase, proyección de franjas, mapa de fase envuelto

Abstract: Three-dimensional (3D) reconstruction is an essential tool in optical engineering and metrology, as it allows obtaining precise information about the topography of surfaces without physical contact. Among the most notable techniques is Fourier Transform Profilometry (FTP), which analyzes the deformation of a fringe pattern projected onto an object to recover its relief with high precision. This research presents the topographic measurement accuracy, as well as the vulnerability of Fourier Profilometry to noise and discontinuities. A systematic evaluation of the impact of different spectral filtering mask geometries in conjunction with various phase unwrapping algorithms on the 3D reconstruction process was proposed. To this end, two-dimensional Fourier profilometry was implemented, which allowed analyzing the quality of the reconstructed phases according to the shape of the applied filter. The results demonstrated that elliptical and diamond-shaped masks offered better performance, generating smoother and more continuous phases compared to the rectangular mask, which amplified the noise. Finally, it was established that the synergy between selective spectral filtering and robust phase unwrapping algorithms, such as those proposed by Ghiglia or Zhao, produced the greatest stability and fidelity in the three-dimensional reconstruction of the analyzed surfaces.

Keywords: 2D Fourier profilometry, spectral filtering, 3D reconstruction, phase unwrap, fringe projection, wrapped phase map.

1. Introducción

En el área de la ingeniería y de la ciencia de los materiales, la capacidad de medir con precisión la topografía de una superficie es de suma importancia. Las tecnologías de reconstrucción tridimensional (3D) han evolucionado con el paso del tiempo, convirtiéndose en herramientas indispensables para el control de calidad, la ingeniería inversa y la inspección industrial [1, 2]. Entre las distintas técnicas disponibles, los métodos ópticos sin contacto, como la Perfilometría por Proyecciones de Franjas (FPP), han adquirido notable relevancia debido a su alta precisión, velocidad y naturaleza no destructiva [2].

La Perfilometría por Transformada de Fourier (FTP) fue desarrollada por Takeda y Mutoh en 1983 y constituye una de las técnicas más eficientes dentro de la FPP, ya que permite la reconstrucción de una superficie 3D a partir de un patrón de franjas proyectado [3, 4]. Este método se enfoca en el análisis, en el dominio de la frecuencia, de la imagen del patrón deformado por el objeto [5]. La información de la superficie se obtiene al aplicar la transformada de Fourier a la imagen con las franjas proyectadas, resultando en un espectro que presenta distintas regiones, entre las cuales destacan dos picos simétricos conocidos como lóbulos laterales. En uno de estos lóbulos se concentra la información de la superficie del objeto, representada por la fase deformada que describe su forma y relieve tridimensional [6]. Para extraer esta información, se aplica un filtro pasa-banda que aísla el lóbulo de interés [1, 7].

Posteriormente, se emplea la Transformada Inversa de Fourier (IFT) para recuperar la fase del objeto en su forma envuelta, la cual está limitada al rango de $[-\pi, \pi]$, presentando saltos de 2π que no corresponden a la geometría real [8]. Finalmente, el proceso de desenrollamiento de fase (*phase unwrapping*) elimina estas discontinuidades, obteniendo una fase continua que representa con precisión la altura del objeto [3, 4].

La FTP ha evolucionado considerablemente a lo largo del tiempo. Originalmente se propuso con una Transformada de Fourier Unidimensional (FTP1D), que procesaba la escena línea por línea, pero posteriormente se extendió a una versión bidimensional (FTP2D). Esta última analiza la escena completa de forma simultánea, logrando mejores resultados y reduciendo las discontinuidades en la reconstrucción, aunque con un tiempo de ejecución mayor [9, 10, 11].

Las investigaciones posteriores se centraron en optimizar distintas etapas del proceso, como el diseño de filtros para aislar la frecuencia fundamental del espectro, dado que una selección inadecuada puede introducir ruido o distorsiones [6, 7, 5].

Los esfuerzos iniciales se enfocaron en mejorar los algoritmos para reducir el impacto del ruido y resolver ambigüedades en la fase [12]. Se exploraron distintas estrategias de filtrado en el dominio de la frecuencia para aislar la información de manera más efectiva [1, 13, 14], desarrollándose algoritmos de desenrollamiento de fase cada vez más sofisticados [3, 15, 16].

Estos métodos tradicionales se clasifican principalmente en dos categorías: espaciales y temporales [17]. Los métodos espaciales operan sobre una única imagen de fase, ofreciendo mayor rapidez, aunque con la desventaja de ser vulnerables a la propagación de errores [18]. Por otro lado, los métodos temporales, como la técnica heterodina de múltiples frecuencias, mezclan señales de diferentes frecuencias para generar una señal intermedia más robusta, proporcionando mayor estabilidad al usar información de distintos patrones proyectados [6, 7, 19]. Sin embargo, la necesidad de múltiples capturas limita su aplicación en objetos dinámicos o en escenarios donde se requiere alta velocidad [5, 19].

Una de las áreas de investigación más activas en la FTP es el desenrollamiento de fase, debido a que representa una etapa crítica y compleja. El algoritmo clásico propuesto por Itoh, aunque simple, es altamente susceptible a errores cuando existen ruido o discontinuidades [12, 1]. Para superar estas limitaciones, se desarrollaron métodos más robustos y sofisticados, destacando los enfoques de Ghiglia, Herraiez, Zhao y Andreas, basados en mínimos cuadrados o en el procesamiento de mapas de residuos, los cuales mejoran significativamente la calidad de la reconstrucción [3, 13]. La elección del algoritmo adecuado implica un equilibrio entre la precisión y la velocidad de procesamiento del modelo tridimensional final.

A pesar de los avances logrados, los métodos convencionales de Perfilometría de Fourier presentan limitaciones importantes, especialmente cuando se aplican a objetos de geometría compleja o en condiciones no ideales [2].

Factores como el ruido ambiental, las discontinuidades superficiales o la variación en la reflectividad de los materiales pueden distorsionar los patrones

de franjas, afectando la precisión de la reconstrucción [6, 20].

Una etapa fundamental en este proceso es el filtrado en el dominio de la frecuencia, cuyo objetivo es aislar el espectro que contiene la información de la forma del objeto. La geometría del filtro es determinante, pues un diseño inadecuado puede introducir artefactos o eliminar detalles finos [1, 7]. Por ello, se requiere un análisis sistemático que evalúe cómo las distintas estrategias de filtrado afectan la precisión final de la reconstrucción [6, 20], con el objetivo de mejorar la técnica FTP tradicional.

Esta investigación tiene como objetivo implementar y evaluar un sistema de perfilometría basado en la transformada de Fourier para la reconstrucción tridimensional (3D) de objetos, analizando el impacto que tienen distintos parámetros del proceso en la reducción del error final.

Para alcanzar dicho propósito, se propone implementar un algoritmo completo de perfilometría de Fourier tradicional, abarcando desde la adquisición de la imagen hasta la obtención del mapa de profundidad; desarrollar una base de datos con objetos sintéticos junto con sus respectivos patrones de franjas proyectados; realizar un análisis comparativo del efecto de las distintas máscaras de filtrado en el dominio de la frecuencia (cuadrada, circular, elíptica y en forma de diamante) sobre la calidad de la fase recuperada; y, finalmente, evaluar cuantitativamente el error en la reconstrucción tridimensional obtenida con cada una de las configuraciones, con el fin de determinar los parámetros más óptimos para el método tradicional.

El presente artículo se organiza de la siguiente manera: en la Sección II se presenta los métodos y materiales, en la cual se describen los principios de la Perfilometría de Fourier (FTP1D y FTP2D), los fundamentos de los algoritmos de desenvolvimiento de fase y las máscaras de frecuencia empleadas, además se detalla la metodología implementada, incluyendo el diseño experimental, la adquisición de datos sintéticos y la implementación de los algoritmos y las máscaras. En la Sección III se analizan los resultados obtenidos, comparando sistemáticamente el rendimiento de las distintas configuraciones. La Sección IV expone los resultados experimentales, y finalmente, la Sección V presenta la discusión, conclusiones y las posibles líneas futuras de investigación.

2. Materiales y métodos

En esta sección, se describen los recursos técnicos y computacionales que fueron utilizados para el desarrollo del proceso de la reconstrucción tridimensional mediante la Perfilometría de Fourier Bidimensional (FTP2D), también se especifica y se detalla la metodología empleada para el tratamiento, así como el análisis de imágenes codificadas en fase. Se implementó un flujo de trabajo el cual permita obtener los mapas de fase y reconstrucciones 3D confiables, evaluando la influencia de diferentes máscaras en el dominio de la frecuencia y algoritmos de desenvolvimiento de fase.

La plataforma de desarrollo que se utilizó es MATLAB en la que se procesaron tanto imágenes reales capturadas con proyecciones de franjas sobre el mismo objeto físico como imágenes sintéticas. En el proceso se aplicaron operaciones en el dominio espectral, técnicas de filtrado, transformada inversa y desenvolvimiento de fase, con el propósito de obtener reconstrucciones tridimensionales comparables. A continuación, se detallan los materiales utilizados y el procedimiento metodológico que se implementó.

En el desarrollo de dicho trabajo se empleó un equipo de cómputo MacBook Air con chip M2, con 8GB de RAM y un sistema operativo macOS Tahoe 26.01, el cual permitió que se pudieran realizar todas las operaciones de procesamiento y visualización de las imágenes de manera eficiente.

Por otro lado, el software utilizado fue MATLAB R2024b, es recomendable que se use junto con el toolbox de procesamiento de imágenes (Image Processing Toolbox). También, se incorporaron scripts personalizados para hacer la implementación de los algoritmos de desenvolvimiento de fase (Phase Unwrapping), para la transformada de Fourier, filtrado en el dominio espectral y reconstrucción 3D.

Las imágenes que se procesaron fueron obtenidas de una base de datos sintética la cual fue generada mediante el software especial de modelado 3D Blender 3.6, se simuló las proyecciones de franjas senoidales sobre la superficie 3D con diferentes características geométricas con una función cosenoidal. Dichas imágenes fueron exportadas en formato PNG, con una resolución de 512x512 píxeles con una frecuencia espacial de 30 líneas por campo de visión, también se generaron variantes con orientaciones de 45° y 90°.

Los objetos de prueba fueron creados con un relieve controlado de tipo gaussiano, teniendo una profundi-

dad máxima (ground truth) de 5 mm dimensiones en blender, permitiendo disponer de una mapa de fase de referencia con el fin de cuantificar el error relativo.

Fueron diseñadas con el fin de representar dos condiciones esenciales: una escena con el objeto iluminado con franjas deformadas y la segunda condiciones es correspondiente a un plano de referencia sin deformaciones.

Al hacerse con una base de datos sintética, se asegura un control en los parámetros de iluminación, orientación del patrón y geometría de la superficie favoreciendo la validación de los métodos de reconstrucción y análisis de la fase.

Para hacer el análisis comparativo, se diseñaron cuatro tipos de máscaras espectrales: rectangular, circular, elíptica y diamante. Cada una se aplica sobre el espectro bidimensional el cual fue obtenido mediante la Transformada de Fourier, estas máscaras se centraron alrededor de la frecuencia f_0 , correspondiente al lóbulo lateral en el espectro de magnitud.

Para el criterio de centrado se hizo la localización del máximo pico de frecuencia desplazado y trasladando su coordenada (u_0, v_0) al origen antes de aplicar la ventana de filtrado. En todos los casos este centrado se aplicó de forma semiautomática mediante un algoritmo de búsqueda del máximo local aproximándose a la componente portadora.

Las características de cada máscara se fueron ajustando de acuerdo con su geometría así como su propósito de filtrado:

Las ventanas de filtrado (máscaras) se diseñaron en función del número de franjas proyectadas sobre el objeto. A partir de este valor, el ancho y la altura de cada máscara se adaptaron dinámicamente al tamaño del espectro bidimensional y a la posición de la frecuencia portadora f_0 .

- **Máscara elíptica:** centrada en la coordenada (u_0, v_0) correspondiente al máximo pico del espectro. Los semiejes se establecieron con valores proporcionales al número de franjas detectadas: el semieje horizontal igual a una cuarta parte de las franjas ($franjas/4$) y el semieje vertical equivalente a la mitad de la altura total de la imagen. Esta configuración permite abarcar la región del lóbulo principal sin incluir componentes conjugadas.
- **Máscara circular:** también centrada en (u_0, v_0) , con un radio definido como la mitad del número

total de franjas proyectadas ($franjas/2$). Se utilizó para obtener un filtrado simétrico, conservando uniformidad direccional en torno a la frecuencia portadora.

- **Máscara rectangular:** posicionada a partir del desplazamiento lateral correspondiente a f_0 , con una esquina superior izquierda en $[cy + (franjas/2), 1]$. El ancho fue igual al número total de franjas proyectadas y la altura igual al tamaño vertical completo del espectro ($ax - 1$). Esta forma produce un filtrado más selectivo y direccional, adecuado para evaluar la preservación de detalles de alta frecuencia.
- **Máscara tipo diamante:** centrada en $[cy + franjas, cx]$ y definida por la condición:

$$\frac{|x - x_c|}{r_x} + \frac{|y - y_c|}{r_y} < 1, \quad (1)$$

donde $r_x = franjas/2$ y $r_y = ax$. Esta máscara se extiende verticalmente a lo largo del espectro, proporcionando una transición suave entre las regiones de paso y de rechazo.

En todos los casos, las dimensiones de las máscaras fueron adaptativas al tamaño de la imagen de entrada, lo que permitió mantener una proporción coherente entre la resolución espacial y la selectividad espectral. El criterio general de diseño buscó conservar aproximadamente el 95 % de la energía del lóbulo principal del espectro, evitando solapamientos con el espectro conjugado y reduciendo al mínimo las distorsiones de fase durante la reconstrucción tridimensional.

Una vez aplicado el filtrado, se compararon distintos algoritmos de desenvolvimiento de fase, cada uno con parámetros ajustados según su naturaleza:

- **Itoh:** método de línea a línea basado en la corrección de discontinuidades locales, utilizado como referencia base.
- **Herraez:** algoritmo de calidad guiada, con una ventana local de 3×3 píxeles y priorización de los puntos de mayor coherencia de fase.
- **Zhao:** método iterativo con función de ponderación adaptativa, diseñado para reducir errores acumulativos en regiones de alto gradiente.

- **Andreas:** enfoque por mínimos cuadrados con término de regularización que controla la suavidad de la fase; el parámetro de regularización se ajustó para minimizar el error cuadrático medio.
- **Ghiglia & Pritt:** implementación basada en transformada discreta del coseno (DCT) con condiciones de frontera de tipo Neumann, lo que asegura continuidad global de la fase desarrollada.

Dichas configuraciones permitieron un análisis del efecto de la geometría de las máscaras, así como de los distintos enfoques de desenvolvimiento sobre la precisión y la estabilidad que se tiene en la reconstrucción tridimensional. En conjunto, dicho proceso permitió definir los parámetros óptimos del filtrado espectral y del desenvolvimiento de fase.

A continuación, se describirá y presentará la metodología que se utilizó para desarrollar la reconstrucción tridimensional con la Perfilometría de Fourier Bidimensional (FTP2D) como se muestra en la "Fig 1", el cual es el procedimiento en cada etapa del procesamiento: desde la adquisición sintéticas de las imágenes hasta la obtención del desenvolvimiento de fase y la adquisición de la reconstrucción 3D.

Para observar la secuencia lógica del procesamiento implementado, se realizó un diagrama de flujo, como se muestra en la "Fig. 1", resumiendo las etapas principales del método. Desde la lectura de la imágenes hasta la reconstrucción final, dicho diagrama permite que se puedan visualizar las decisiones clave del algoritmo, el uso de los distintos tipos de máscara espectral y la selección del algoritmo de desenvolvimiento de fase. La Perfilometría por Transformada de Fourier (FTP), fue introducida por Takeda y Mutoh en 1983, esta es una técnica que se usa como medición óptica no invasiva y sin contacto, la cual fue consolidada para la reconstrucción tridimensional de las superficies [1] [8]. Su trabajo principal se basa en la proyección de un patrón de franjas sinusoidales sobre el objeto [4][3]. La topografía del objeto tiene como propósito modular la fase del patrón la fase que tiene este patrón, la imagen resultante se le denomina como escena, la cual es capturada por un sensor, mediante una configuración de ejes ópticos cruzados [3][21]. La información dimensional que se tiene específicamente en la altura $h(x, y)$ relativa a un plano de referencia, esta codificada en la deformación de la fase [2][22]. La distribución de la intensidad $g(x, y)$ de la escena que fue capturada se puede modelar de manera mate-

mática mediante la siguiente ecuación 1 [2][14].

$$g(x, y) = a(x, y) + b(x, y) \cdot \cos(2\pi f_{\theta}x + \phi(x, y)) \quad (2)$$

Donde:

- $a(x, y)$ representa la iluminación de fondo, la cual es considerada de baja frecuencia.
- $b(x, y)$ se refiere a la modulación de las franjas como su contraste o amplitud.
- f_{θ} es la frecuencia espacial que porta el patrón de franjas proyectado.
- $\phi(x, y)$ representa la fase que contiene la información topográfica modulada por la altura del objeto.

Cuando se aplica la Transformada de Fourier, la señal de la intensidad se descompone en sus componentes espectrales. Se obtiene como resultado un espectro que representa un componente de Corriente Directa (DC) en el origen y los dos lóbulos laterales que son simétricos en las frecuencias $+f_0$ y $-f_0$ [23]. Se realiza un proceso de filtrado en el dominio de la frecuencia haciendo que se puedan aislar uno de estos lóbulos, al momento de usar Transformada Inversa de Fourier (IFFT) se recupera la fase [14]. La FTP se puede implementar en dos distintas variantes las cuales son la unidimensional (FTP1D) y la bidimensional (FTP2D), lo que diferencia a ambas variantes es que la (FTP1D) procesa la escena línea por línea en sentido contrario a la proyección de las franjas obtenido la ecuación 1 y (FTP2D) la analiza en su totalidad. Se ha demostrado que la (FTP2D) tiene como ventaja que puede producir reconstrucciones con menores discontinuidades [7] [9][24].

$$F(u) = A(u) + C(u - f_0) + C^*(u + f_0) \quad (3)$$

Donde $F(u)$ representa la transformada de Fourier de la señal original $I(x)$; la transformada de la componente de fondo se representa por $A(u)$. Por otro lado, el lóbulo lateral positivo, desplazado a la frecuencia $+f_0$ y que contiene la fase del objeto, se describe mediante $C(u - f_0)$, mientras que $C^*(u + f_0)$ se interpreta como el lóbulo lateral negativo desplazado a $-f_0$.

A pesar de sus ventajas, la FTP tradicional puede ser susceptible a los errores que se incluyen por el ruido ambiental, las discontinuidades abruptas que se generan en la superficie y las variaciones en la reflectividad

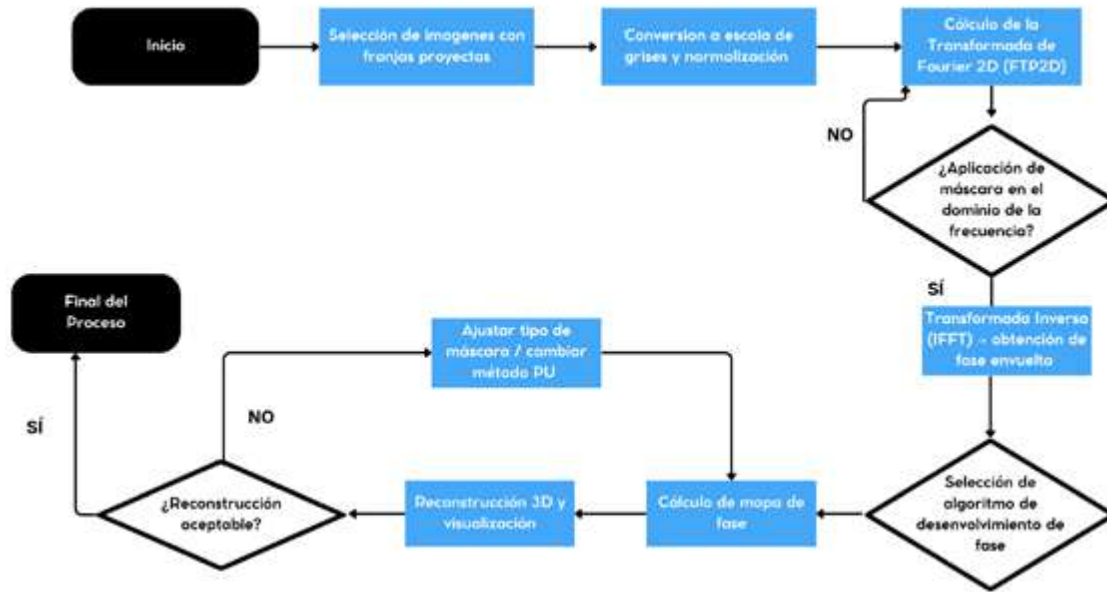


Figura 1: Diagrama de flujo del procesamiento implementado para la reconstrucción tridimensional

de los materiales, los factores mencionados anteriormente pueden provocar que la precisión en la reconstrucción final no sea buena [10][16]. La transformada de Fourier bidimensional se aplica a la señal de entrada $f(x, y)$, la cual representa la intensidad del patrón de franjas proyectado sobre el objeto. Al aplicar dicha transformada, se obtiene el espectro $F(u, v)$, como se muestra en la ecuación 3[23].

$$F(u, v) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f(x, y) e^{-j2\pi(ux+vy)} dx dy \quad (4)$$

Donde:

- $f(x, y)$: es la función original en el dominio espacial.
- $F(u, v)$: es el resultado de la transformada en el dominio de la frecuencia.
- (u, v) : representa las coordenadas espaciales que están en el dominio de la frecuencia.
- $e^{-j2\pi(ux+vy)}$: hace referencia al núcleo complejo oscilatorio de la transformación.
- Las integrales dobles cubren todo el plano espacial, garantizando que la transformada considere cada punto de la imagen.

Por otro lado, la FTP1D utiliza la escena capturada, la cual se representa con la siguiente ecuación 4 [13][6][25].

$$I(x, y) = a(x, y) + b(x, y) \cos [2\pi f_0 x + \phi(x, y)] \quad (5)$$

Donde:

- $I(x, y)$: intensidad registrada en cada píxel de la imagen.
- $a(x, y)$: iluminación promedio (componente de fondo o DC).
- $b(x, y)$: contraste o modulación local del patrón.
- f_0 : frecuencia espacial de las franjas proyectadas.
- $\phi(x, y)$: fase codificada, que contiene la información topográfica del objeto.

Uno de los pasos fundamentales en el procesamiento mediante la *Fourier Transform Profilometry* (FTP) es el desenrollamiento de fase (*Phase Unwrapping*, PU, por sus siglas en inglés). La fase que se recupera tras aplicar la transformada inversa de Fourier (IFFT) se conoce como fase envuelta $\phi_w(x, y)$, la cual está matemáticamente restringida al intervalo de $[-\pi, \pi]$ [1]. Dicha limitación puede generar discontinuidades artificiales de 2π , denominadas *saltos de fase*, que no corresponden a la topografía real del objeto, sino que

son consecuencia del cálculo del ángulo de la señal compleja [8].

El objetivo principal del PU es recuperar la fase continua $\phi(x, y)$ mediante la eliminación de estos saltos [8], de acuerdo con la relación:

$$\phi(x, y) = \phi_w(x, y) + 2\pi k(x, y) \quad (6)$$

Donde $k(x, y)$ representa un campo de números enteros que deben determinarse para cada píxel, de manera que la fase desenrollada sea suave y consistente [3]. La precisión de este proceso es de suma importancia, ya que cualquier error que se propague en la reconstrucción 3D final puede generar deformaciones significativas [3, 4]. Para poder contrarrestar este desafío se desarrollaron varios algoritmos de desenvolvimiento de fase, cada uno tiene sus ventajas y limitaciones computacionales [1][26]. Entre los métodos tradicionales más relevantes se encuentran:

- **Métodos de integración de gradiente:** Este tipo de métodos se basa en calcular la fase desenrollada mediante la integración del gradiente de la fase envuelta, con el fin de reconstruir la fase continua a partir de las diferencias entre los píxeles adyacentes [11].
- **Algoritmo de Itoh:** Este algoritmo asume que las diferencias de fase reales entre los píxeles adyacentes son menores que π . En caso de que la medida exceda este umbral, se corrige sumando o restando múltiplos de 2π . Su principal ventaja radica en su simplicidad y rapidez; sin embargo, presenta una desventaja importante: es altamente sensible al ruido y más propenso a fallar ante grandes discontinuidades [5].
- **Método de gradiente de mínimo cuadrático:** Este método plantea el desenvolvimiento como un problema de optimización global, en el que se busca minimizar la discrepancia entre el gradiente de la fase desarrollada y el de la fase envuelta en toda la imagen [22, 14, 23].
- **Método por fiabilidad:** Este enfoque fue introducido por Herraes *et al.* (2002) y se basa en asignar una métrica de calidad a cada píxel, comenzando el desenvolvimiento en las zonas más confiables. El desenrollado sigue caminos no continuos, lo que ayuda a evitar la propagación de errores desde regiones críticas con alto nivel de ruido [23].
- **Métodos iterativos y de transporte de intensidad:** Existen algoritmos iterativos como el TIE-DCT, que utilizan la Ecuación de Transporte de

Intensidad (TIE) en conjunto con la Transformada Discreta del Coseno (DCT) para reconstruir la fase de manera iterativa, ofreciendo mayor robustez frente al ruido aleatorio y las discontinuidades suaves [23].

- **Métodos heterodinos y multifrecuencia:** Estas técnicas emplean múltiples patrones de franjas con distintas frecuencias para mejorar la robustez del desenvolvimiento, especialmente en objetos que presentan geometrías complejas [7, 9].

La elección del algoritmo de PU implica un compromiso entre dos factores importantes que son la precisión del resultado y el costo computacional. Para procesos rápidos, se pueden emplear algoritmos sencillos, sin embargo, para poder obtener una reconstrucción de alta exactitud se recurre a métodos más complejos y robustos [2].

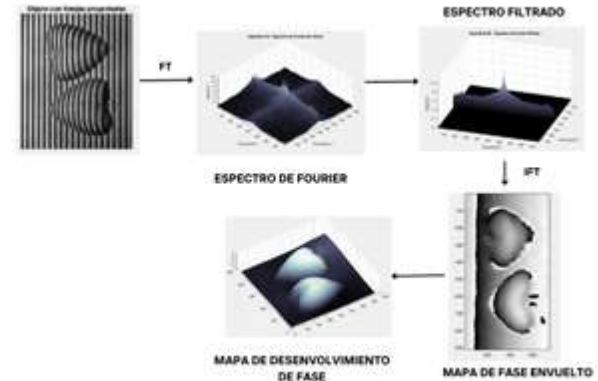


Figura 2: Descripción gráfica de la perfilometría por transformada de Fourier (FTP).

En la "Fig. 2", se muestra el proceso general de la perfilometría mediante la transformada de Fourier, a continuación se describe el proceso mismo: De arriba a la izquierda:

1. Se registra un patrón de franjas proyectado $g(x, y)$
2. Se aplica la transformada de Fourier bidimensional (FT2D) la cual genera el espectro $G(f_x, f_y)$.
3. Se aplica una máscara para aislar una banda lateral y obtener el espectro filtrado $C(f_x, f_y)$.
4. Se utiliza la transformada de Fourier inversa (IFT) para recuperar el mapa de fase envuelto $\phi(x, y)$.

5. Finalmente, un algoritmo de desenvolvimiento de fase produce una distribución de fase continua para la reconstrucción tridimensional (3D).

Esta "Fig. 2", presenta el paso inicial del proceso de perfilometría por transformada de Fourier (FTP) la adquisición de imágenes de proyección de franjas: En la imagen de la izquierda de la "Fig. 2" se muestra la proyección de un patrón de franjas sinusoidales sobre un objeto complejo.

La deformación de las franjas se debe directamente a las variaciones topográficas de la superficie, y esta deformación es la que codifica la información tridimensional del objeto. En contraste, la imagen de la derecha muestra la proyección del mismo patrón sinusoidal sobre una superficie de referencia plana, donde las franjas permanecen uniformemente espaciadas y paralelas, sin distorsión.

La función de este patrón de referencia es fundamental, ya que proporciona la frecuencia portadora base que permite separar las variaciones de fase inducidas por el objeto de la referencia sinusoidal pura. Al comparar ambas imágenes, se evidencia que la diferencia en la deformación de las franjas contiene la información de fase codificada necesaria para la reconstrucción. Sin esta referencia base, aislar la contribución topográfica en el dominio de Fourier sería significativamente más complejo.

La etapa de filtrado en el dominio de la frecuencia es de suma importancia para la calidad y precisión de la reconstrucción tridimensional (3D). El objetivo principal es diseñar una máscara que permita aislar el primer armónico f_0 del espectro, separándolo de su componente de DC y de los otros armónicos, sin introducir ruido y sin perder información relevante de la señal [7, 6].

El uso de máscaras definidas por formas geométricas centradas en la frecuencia fundamental f_0 , con un ancho de ventana proporcional al número de franjas de la escena, ha demostrado ser una estrategia efectiva [6]. En el método FTP-2D, el empleo de una máscara cuadrada centrada en f_0 y con un ancho correspondiente al número de franjas proyectadas es una práctica común [1]. El tipo de máscara rectangular es ampliamente utilizado debido a su facilidad de implementación.

La elección de la forma y el tamaño de la máscara es crítica: una máscara demasiado grande puede incluir frecuencias con ruido cercanas al armónico, mientras que una máscara demasiado pequeña puede atenuar

los componentes de alta frecuencia que contienen los detalles finos de la superficie del objeto, ocasionando un suavizado excesivo o pérdida de información [7, 6].

Por lo tanto, el diseño del filtro debe realizarse cuidadosamente para optimizar la relación señal-ruido en la fase recuperada y garantizar una reconstrucción precisa del relieve del objeto.

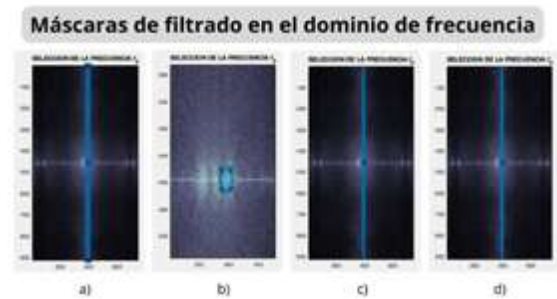


Figura 3: Máscaras de filtrado en el dominio de la frecuencia con diferente forma; a) rectangular, b) circular, c) diamante y d) elipse

La "Fig 3" muestra diferentes tipos de máscaras utilizadas en el dominio de la frecuencia para el filtrado del primer armónico f_0 en la perfilometría por transformada de Fourier (FTP).

- En la subfigura (a) se presenta la máscara rectangular, caracterizada por su facilidad de implementación y su buen desempeño en escenas con patrones regulares.
- La subfigura (b) corresponde a la máscara circular, que proporciona un filtrado isotrópico adecuado cuando el ruido está distribuido de manera uniforme en el espectro.
- En (c) se observa la máscara con forma de diamante, la cual ofrece una transición más gradual entre las frecuencias filtradas y no filtradas, reduciendo efectos de borde.
- Finalmente, la subfigura (d) muestra la máscara elíptica, diseñada para adaptarse a espectros donde la banda lateral presenta una distribución de energía asimétrica.

La elección de la geometría de la máscara influye directamente en la calidad del filtrado y en la precisión de la fase recuperada.

3. Resultados y discusión

En la presente sección se muestran y analizan los resultados que fueron obtenidos tras aplicar el procedimiento de la reconstrucción tridimensional basado en la Perfilometría de Fourier Bidimensional (FTP2D) en imágenes creadas sintéticamente las cuales fueron generadas con el software de Blender. Para la experimentación se usaron cuatro imágenes sintéticas las cuales se observan en la "Fig4".

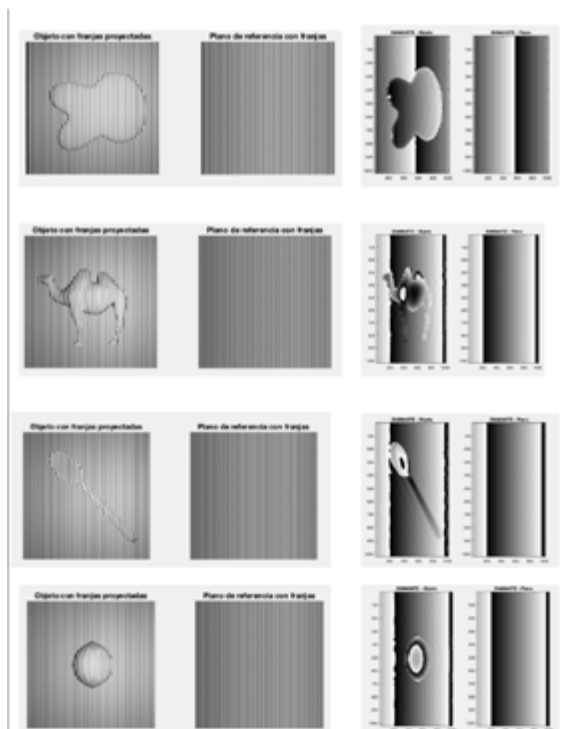


Figura 4: Datos sintéticos de objetos con franjas; en la primera columna se muestra el objeto con franjas proyectada, la segunda columna el plano de referencia con franjas y en la tercera se presenta el mapa de fase envuelto

En el transcurso del proceso se usaron distintos tipos de máscaras espectrales en el dominio de la frecuencia (elíptica, circular, rectangular y diamante) para su evaluación, por otro lado, se usaron distintos algoritmos de desenvolvemento de fase (Itoh, Herraiz, Zhao, Andreas y Ghiglia), con el objetivo de poder analizar su impacto en la calidad así como continuidad de las reconstrucciones obtenidas.

Los resultados se visualizan en forma de mapa de fase como en su forma tridimensional utilizando representaciones de malla (mesh) e imágenes en escala de grises (imgesc). También se hizo la combinación

de cada máscara con cada método de desenvolvemento, comprando los distintos aspectos como los son: la presencia de discontinuidades, la suavidad que tiene la superficie reconstruida, la robustez que se tiene ante el ruido espectral y la fidelidad con respecto a su geometría original.

Estos resultados nos permiten poder identificar ciertos patrones recurrentes que son asociados en la selección de la máscara y al algoritmo de desenvolvemento de fase mostrando su eficacia relativa en la reducción de errores.

A continuación, se mostrarán los resultados, así como su discusión de ellos mismos:

En la "Fig 5", se muestra el mapa de fase del objeto y del plano de referencia con franjas proyectadas en ambos casos usando la máscara de diamante, dicho resultado sucede al hacer un procesamiento de la imagen original mediante el uso de la Transformada de Fourier Bidimensional (FTP2D) filtrando la frecuencia con ayuda de la Transformada Inversa (IFFT), de tal manera que se obtuvo la fase envuelta tanto del objeto como del plano de referencia. Ambas fases tienen un rango de $-\pi$ a π .

En el mapa de fase del objeto se pueden observar ciertas variaciones tanto en la orientación como en la densidad de las franjas, ciertos aspectos corresponden a la deformaciones topográficas que se tiene en la superficie real. Por otro lado, la del plano de referencia nos muestra una estructura regular en las franjas, sin deformaciones, esta funciona como base para poder calcular la diferencia de fases.

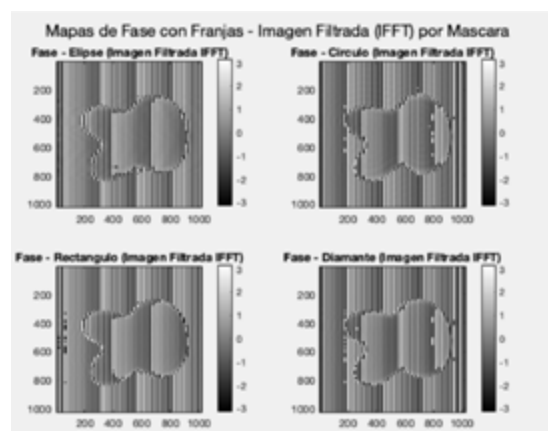


Figura 5: Mapa de fase; se presenta la imagen filtrada con cada una de las máscaras que se utilizaron

Por otro lado, en la "Fig. 6", se muestra una comparación de cómo se presentan los mapas de fase cuando

se hace el desenvolvimiento (R3D), en este caso fueron calculados mediante el algoritmo de Ghiglia aplicando distintas máscaras espectrales en el dominio de la frecuencia.

Para el mapa de fase utilizando la máscara de diamante en el lóbulo lateral se puede observar una buena reconstrucción con detalles bien definidos, aunque en ciertas zonas se puede notar un poco de ruido o deformación en algunas regiones saturadas. Por otro lado, al usar la máscara rectangular se capturo mayor cantidad de información frecuencial, sin embargo, también se introdujo un nivel considerable de ruido. En lo contrario la máscara circular produjo contornos más suaves, pero como consecuencia tuvo que se redujo el nivel de detalle dificultando la interpretación en formas complejas.

Finalmente, la máscara de elipse conserva una buena definición de bordes sin introducir saturaciones excesivas. Esta comparativa permite observar como la forma que tiene la máscara influye de manera significativa en la calidad de los mapas de fase, volviéndose un factor importante para minimizar los errores en la reconstrucción 3D.

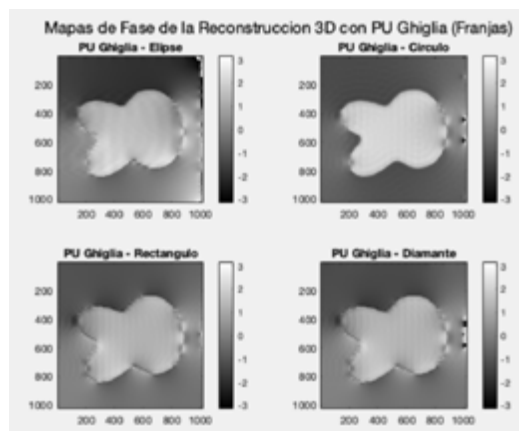


Figura 6: Comparación de mapas de fase desenvueltos (R3D) con distintas máscaras

En la "Fig. 7", se puede observar la diferencia de las reconstrucciones 3D con distinto método de desenvolvimiento de fase, pero usando la misma máscara espectral que en este caso es tipo diamante. Al usar el algoritmo de Itoh se presenta una topografía con buena suavidad, pero se tiene como desventaja la presencia de artefactos escalonados, por otro lado, el método de Zhao genera un volumen que esta más detallado en zonas abruptas y finalmente Andreas logro hacer una superficie más homogénea teniendo algunas regiones

planas esto se debe a la sensibilidad al ruido.

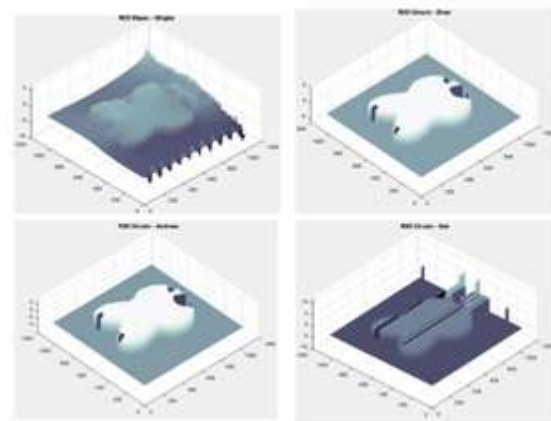


Figura 7: Reconstrucción 3D con distintos algoritmos de desenvolvimiento de fase como lo son: Ghiglia, Zhao, Andreas e Itoh

En la siguiente "Fig 8", presenta la reconstrucción 3D usando el mismo algoritmo de desenvolvimiento de fase que en este caso es el de Ghiglia aplicando distintas máscaras espectrales, en la caso de la máscara de elipse se muestra una reconstrucción más detallada y continua; la máscara circular nos proporcionó una reconstrucción más centrada, pero con bordes más difusos, finalmente la rectangular ayudo a resaltar los detalles laterales introduciendo artefactos. Dicha comparación permite evaluar un impacto en la geometría del filtro espectral en la calidad final de la reconstrucción tridimensional.

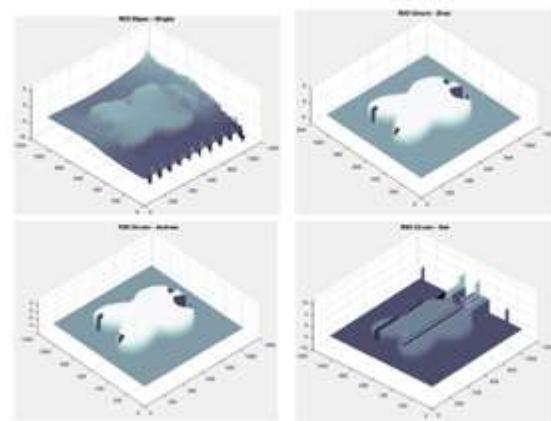


Figura 8: Reconstrucción 3D de la escena usando distintas mascaras con el método de Ghiglia

Los resultados obtenidos al aplicar las distintas formas de la máscara espectral en el dominio de la fre-

cuencia para la reconstrucción tridimensional (3D) mediante el método de perfilometría por transformada de Fourier (FTP) evidenciaron diferencias significativas en la calidad del mapa de fase, resaltando la importancia del diseño de la máscara en la etapa de filtrado de fase.

En los casos de las máscaras elíptica y en forma de diamante se logró una reconstrucción más suave, obteniendo menor saturación que con la máscara rectangular. Aunque esta última capturó un espectro de frecuencia más amplio, también introdujo artefactos visibles y ruido en el mapa de fase. Este hallazgo concuerda con lo reportado por Takeda [27] y ampliado posteriormente por Kreis en 2004 [28], quienes argumentaron que la forma de la ventana frecuencial tiene un impacto crucial tanto en la continuidad como en la fidelidad de la fase reconstruida.

Desde un punto de vista espectral, estas diferencias se explican por la selectividad que ofrece cada tipo de máscara. Las formas circulares y elípticas tienden a atenuar los componentes de alta frecuencia no deseados debido a su geometría suave y simétrica, lo que provoca mapas de fase con menos discontinuidades, aunque con pérdida de detalles finos en la superficie del objeto. Por otro lado, las máscaras con contornos definidos, como la rectangular, permiten conservar un mayor contenido espectral, pero a costa de amplificar el ruido, generando envolventes poco suaves. Este comportamiento coincide con lo documentado en estudios previos sobre el filtrado en el dominio de la frecuencia en técnicas de proyección de franjas [1, 4].

Asimismo, los algoritmos de desenvolvimiento de fase tuvieron un papel relevante en la precisión de la reconstrucción. En este estudio se emplearon los algoritmos de Ghiglia, Zhao, Andreas e Itoh, cada uno con un comportamiento distinto frente a las discontinuidades y el ruido.

El algoritmo de Ghiglia, basado en el método de mínimos cuadrados, proporcionó fases continuas pero con tendencia al suavizado en regiones con pendientes pronunciadas; Zhao permitió preservar mejor las regiones con alto gradiente, aunque resultó más sensible al ruido; Andreas ofreció una reconstrucción visualmente limpia pero con pérdida de detalle en zonas finas; mientras que Itoh presentó buena continuidad, pero introdujo errores en regiones con gradientes elevados.

La combinación de una máscara elíptica o de diamante con los algoritmos de Ghiglia o Zhao produ-

jo los resultados más estables y estructurados, lo que sugiere una sinergia entre el filtrado frecuencial selectivo y las técnicas robustas de desenvolvimiento de fase. En cambio, cuando se emplearon máscaras rectangulares junto con algoritmos como Itoh o Andreas, las reconstrucciones mostraron discontinuidades, pérdida de información y saturación de fase, reflejando una menor compatibilidad entre la selectividad espacial del filtro y la respuesta del algoritmo ante bordes o ruido.

En cuanto a los métodos implementados, se confirma que la Transformada de Fourier bidimensional (FTP2D), combinada con máscaras adecuadas y métodos robustos de desenvolvimiento de fase como el de Ghiglia, constituye una técnica efectiva para la reconstrucción 3D en condiciones controladas. No obstante, su sensibilidad al ruido, las discontinuidades y los errores de alineación continúan representando un reto, especialmente al trabajar con objetos reales en lugar de modelos sintéticos generados en laboratorio.

Como línea futura de investigación, la integración de métodos de aprendizaje profundo, particularmente de Redes Neuronales Convolucionales (CNN), resulta de gran relevancia para el posprocesamiento de los mapas de fase. Esto permitirá evaluar cuantitativamente los resultados mediante métricas objetivas y explorar nuevas variantes de desenvolvimiento de fase bajo las mismas condiciones, con el fin de determinar su interacción con cada tipo de máscara y su impacto en la precisión de la reconstrucción.

En la parte experimental, la precisión que tiene la reconstrucción tridimensional basada en la Perfilometría basada en la Transformada de Fourier (FTP) depende de la calidad del algoritmo filtrado y del desenvolvimiento de fase, pero también las condiciones físicas que se tienen bajo las cuales se adquieren las imágenes son de suma importancia. Aunque los resultados presentados en dicho trabajo se basan en imágenes sintéticas las cuales fueron generadas bajo condiciones controladas, es de suma importancia considerar como los factores ambientales, así como las propiedades ópticas de los materiales pueden afectar de manera significativa la exactitud de la fase recuperada. La iluminación ambiental es uno de los factores más importantes, para los sistemas de proyecciones de franjas cuando se presentan fuentes luminosas externas estas pueden reducir el contraste de las franjas o introducir gradientes de intensidad los cuales pueden dificultar la separación precisa de la componente

de frecuencia portadora en el dominio espectral. Este suceso produce distorsiones en la fase envuelta, así como errores al momento de hacer la reconstrucción.

Otro factor importante es la reflectancia y la textura superficial que tiene el objeto medido. Las superficies que tienen una alta reflectancia especular, estas pueden generar saturación local en el sensor o una pérdida de información de reflexión directa. Por otro lado, las superficies de baja reflectancia difusa tienden a producir patrones con un bajo contraste y una relación señal-ruido limitada. Para ambos casos, la recuperación de la fase se ve afectada, provocando discontinuidades de envolvimiento.

Las vibraciones mecánicas, las variaciones de temperatura y las inestabilidades geométricas en la alineación del sistema proyector-cámara también pueden introducir errores sistemáticos. Vibraciones de baja frecuencia pueden desplazar el patrón de franjas entre capturas consecutivas, generando ruido de fase de tipo aleatorio o pseudoaleatorio. Las fluctuaciones térmicas pueden alterar ligeramente la distancia efectiva o el ángulo de proyección, afectando la linealidad del mapa de fase.

Finalmente, factores asociados al ruido electrónico del sensor, la resolución espacial y la respuesta no lineal del sistema óptico influyen en la fidelidad de la reconstrucción. Cámaras con baja relación señal-ruido o con variaciones de ganancia entre píxeles pueden introducir artefactos periódicos que se manifiestan como bandas residuales en el espectro.

4. Conclusión

Dicha investigación logro implementar y evaluar se manera sistemática un sistema de perfilometría basado en las Transformada de Fourier Bidimensional (FTP2D) para la reconstrucción 3D de objetos sintéticos cumpliendo con el objetivo que es analizar el impacto de para metros críticos en la reducción del error final.

Se ha demostrado que la geometría del filtro espectral es un factor determinante en el proceso FTP2D, afectando directamente la calidad de la fase filtrada. Los resultados indicaron que las máscaras de elipse y diamante proporcionaron reconstrucciones consistentemente más suaves y continuas, logrando minimizar la introducción de artefactos y el ruido espectral. Este hallazgo subraya la superioridad de estas geometrías para optimizar la relación señal-ruido en la fase recuperada, un punto que concuerda con reportes previos

en la literatura sobre la importancia de la pestaña frecuencial. En contraste, aunque la máscara rectangular capturó un espectro de frecuencia más amplio, su uso resultó en la amplificación de ruido y la introducción de artefactos visibles, lo que compromete la suavidad y fidelidad del mapa de fase.

El desenvolvimiento de fase (Phase Unwrapping, PU) se confirmó como una etapa crítica. Se identificó una sinergia crucial entre el filtrado selectivo y los algoritmos de PU, siendo las combinaciones más estables las que integraron máscaras elípticas o diamante con algoritmos robustos, como el método basado en mínimos cuadrados de Ghiglia o el de Zhao. Estos algoritmos lograron ofrecer fases más continuas o preservar mejor las regiones abruptas, respectivamente. Por el contrario, la combinación de máscaras menos selectivas (rectangulares) con algoritmos sencillos como Itoh o Andreas resultó en la aparición de discontinuidades y saturaciones de fase, demostrando una falta de compatibilidad.

El principal aporte de esta investigación reside en la validación de que la Transformada de Fourier Bidimensional (FTP2D), al ser complementada con máscaras espectrales optimizadas y métodos robustos de desempaquetado, constituye una técnica efectiva para la reconstrucción 3D en condiciones controladas. El análisis comparativo sistemático proporciona información crucial para la optimización práctica del método tradicional FTP. Sin embargo, la investigación reconfirma la principal limitación inherente a la técnica FTP: su persistente susceptibilidad a la propagación de errores causados por el ruido ambiental, las discontinuidades abruptas de la superficie y las variaciones en la reflectividad de los materiales.

Para superar las limitaciones mencionadas y validar los hallazgos, es esencial priorizar la evaluación cuantitativa. Aunque visualmente se observó que el algoritmo de Ghiglia ofreció un desempeño destacado al generar fases más continuas, se requiere una validación rigurosa. Por lo tanto, como trabajo futuro, se recomienda enfáticamente una evaluación cuantitativa rigurosa de los resultados utilizando métricas objetivas, lo cual permitirá determinar la interacción más óptima entre el filtrado y el desenvolvimiento de fase.

Haciendo el análisis comparativo de las distintas combinaciones de máscaras espectrales y los algoritmos de desenvolvimiento de fase, fue posible identificar una configuración la cual tiene un desempeño sobresaliente en términos de estabilidad, precisión y

robustez frente al ruido. Estos resultados evidenciaron que la máscara elíptica se puede adaptar de una manera eficiente a la distribución del lóbulo principal en el espectro de Fourier, permitiendo conservar la mayor parte de la información estructural del objeto reduciendo las interferencias de la componente conjugada.

Cuando se hizo la combinación de esta máscara con el algoritmo de Herraiez, basado en un enfoque de calidad guiada, se pudo obtener una reconstrucción tridimensional mucho más continua evitando las discontinuidades abruptas. Este algoritmo prioriza las regiones de mayor coherencia de fase, reduciendo de manera significativa los errores observados en los métodos secuenciales o por mínimos cuadrados.

Comparando las máscaras, la rectangular presenta una mayor sensibilidad al ruido, la circular redujo la resolución espacial y la diamante mostro un comportamiento intermedio. Entonces la combinación de máscara elíptica en conjunto con el algoritmo de Herraiez se considera una configuración ideal en las condiciones experimentales planteadas, ofreciendo una mejor calidad entre la resolución, estabilidad y fidelidad de la reconstrucción 3D.

Como línea de investigación futura, se propone la incorporación de métodos basados en redes neuronales convolucionales (CNN) para el proceso de reconstrucción tridimensional mediante la Perfilometría de Fourier. Estas técnicas nos permitirán mejorar las etapas críticas como lo es el desenvolvimiento de fase, a través de aprendizaje de patrones complejos entre la distribución de intensidad y la geometría del objeto.

Esta aplicación nos podría ayudar a mejorar de manera significativa la generación de manera significativa de la precisión de la reconstrucción 3D, en especial en ciertos escenarios que son afectados por el ruido y variaciones de iluminación. La implementación de este enfoque requerirá la generación de un conjunto de datos sintéticos y experimentales que incluyan pares de imágenes de franjas y mapas de fase de referencia, lo que permitirá entrenar modelos capaces de generalizar a diferentes condiciones de captura.

Por tanto, el uso de redes neuronales se plantea como una extensión natural de este trabajo, orientada a desarrollar sistemas híbridos que combinen las ventajas de los métodos clásicos de la FTP con las capacidades predictivas de la inteligencia artificial moderna.

Referencias

- [1] J. C. Morales, J. C. Ortega, J. M. Arreguín, and J. E. Soto, "Comparación de filtros para el análisis del espectro espacial bidimensional de Fourier, en el proceso de digitalización 3d," *Research in Computing Science*, vol. 140, pp. 175–187, 2017.
- [2] Z. Wang, H. Zhang, and Y. Lu, "Deep learning-based surface reconstruction using fringe projection," *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 15, no. 8, pp. 4526–4534, 2019. doi: 10.1109/TII.2019.2894679.
- [3] K. Wang, J. Di, J. Zhao, and Q. Kemao, "One-step robust deep learning phase unwrapping," *Optics Express*, vol. 27, no. 10, pp. 15100–15115, 2019. doi: 10.1364/OE.27.015100.
- [4] C. Zuo, Q. Chen, W. Feng, L. Feng, Y. Tao, and A. Asundi, "Deep learning in optical metrology: a review," *Light: Science & Applications*, vol. 11, 2022.
- [5] Q. Chen, S. Feng, W. Yin, J. Qian, and C. Zuo, "An improved circular fringe Fourier transform profilometry," *Optics Express*, vol. 30, no. 24, pp. 43876–43888, 2022. doi: 10.1364/OE.472093.
- [6] S. Zhang, "Absolute phase retrieval methods for digital fringe projection profilometry: A review," *Optics and Lasers in Engineering*, vol. 107, pp. 28–37, 2018. doi: 10.1016/j.optlaseng.2018.03.004.
- [7] P. Yao, Z. Zhang, J. Qian, and C. Zuo, "A multi-code 3d measurement technique based on deep learning," *Optics and Lasers in Engineering*, vol. 145, 2021. doi: 10.1016/j.optlaseng.2021.106654.
- [8] W. Yin, Q. Chen, S. Feng, T. Tao, L. Huang, M. Trusiak, A. Asundi, and C. Zuo, "Temporal phase unwrapping using deep learning," *Scientific Reports*, vol. 9, no. 20175, 2019.
- [9] P. Yao, J. Qian, and C. Zuo, "Coding-net: A multi-purpose neural network for fringe projection profilometry," *Optics & Laser Technology*, vol. 139, 2021. doi: 10.1016/j.optlastec.2021.106939.

- [10] J. Qian, S. Feng, P. Yao, Q. Chen, and C. Zuo, "Deep-learning-enabled geometric constraints and phase unwrapping for single-shot absolute 3d shape measurement," *APL Photonics*, vol. 5, no. 4, p. 046105, 2020. doi: 10.1063/1.5140728.
- [11] X. Li and S. Zhang, "Flexible 3d shape measurement method using deep learning and fringe projection," *Optics Letters*, vol. 42, no. 5, pp. 893–896, 2017. doi: 10.1364/OL.42.000893.
- [12] J. Liu, L. Zhang, and F. Chen, "An improved three-frequency heterodyne synthesis phase unwrapping method," *Applied Optics*, vol. 61, no. 35, pp. 10257–10266, 2022. doi: 10.1364/AO.471884.
- [13] H. Wang, Z. Zhou, and C. Zuo, "A high-accuracy and reliable end-to-end phase unwrapping network for fourier transform profilometry," *Journal of Optical Engineering*, vol. 64, no. 1, 2025.
- [14] X. Guo, W. Yin, J. Di, Q. Chen, and C. Zuo, "A unifying temporal phase unwrapping framework using deep learning," *Optics Express*, vol. 31, no. 10, pp. 16659–16677, 2023. doi: 10.1364/OE.488282.
- [15] K. Wang, J. Di, and Q. Kemao, "On the use of deep learning for phase recovery," *Light: Science & Applications*, vol. 12, 2023. doi: 10.1038/s41377-023-01235-3.
- [16] Y. Quan, J. Di, and Q. Kemao, "Phase unwrapping via fully exploiting global and local dependencies with vision transformers," *Optics & Laser Technology*, vol. 174, 2025. doi: 10.1016/j.optlastec.2024.110005.
- [17] Y. Li, Z. Zhao, and T. Liu, "An insar least-squares phase unwrapping method with adaptive filtering," *Optics & Laser Technology*, vol. 176, 2025. doi:10.1016/j.optlastec.2024.110107.
- [18] Y. Liu, H. Liu, and Y. Li, "Improved temporal fourier transform profilometry for 3d shape measurement," *Sensors*, vol. 20, no. 7, p. 1808, 2020. doi: 10.3390/s20071808.
- [19] W. Wang, S. Feng, W. Yin, Y. Li, J. Qian, Q. Chen, and C. Zuo, "Deep learning-enabled temporally super-resolved multiplexed fringe projection profilometry: High-speed khz 3d imaging with low-speed camera," *Photonix*, vol. 5, no. 1, 2024. doi: 10.1038/s41377-023-01247-z.
- [20] Y. Chen, S. Feng, and Q. Zuo, "Deep-learning-based frequency-multiplexing composite profilometry integrating fourier transform and phase-shifting methods," *Measurement*, vol. 229, p. 115038, 2024. doi: 10.1016/j.measurement.2024.115038.
- [21] K. Wang, J. Di, J. Zhao, and Q. Kemao, "Deep-learning spatial phase unwrapping: a comparative review," *Advanced Photonics Nexus*, vol. 1, no. 1, p. 014001, 2022. doi:10.1117/1.APN.1.1.014001.
- [22] X. Luo, Y. Gao, and Z. Zhang, "Deep-learning-enabled invalid-point removal for spatial phase unwrapping," *Optics & Laser Technology*, vol. 164, 2023. doi: 10.1016/j.optlastec.2023.109433.
- [23] X. Gao, Y. Xu, S. Feng, Q. Chen, and C. Zuo, "Self-supervised phase unwrapping in fringe projection profilometry," *Optics Express*, vol. 31, no. 8, pp. 12862–12876, 2023. doi: 10.1364/OE.488158.
- [24] R. Yamashita, M. Nishio, R. K. G. Do, and K. Togashi, "Convolutional neural networks: an overview and application in radiology," *Insights into Imaging*, vol. 9, no. 4, pp. 611–629, 2018. doi: 10.1007/s13244-018-0639-9.
- [25] J. Song, H. Wang, and Y. Li, "Automatic look-up table-based real-time phase unwrapping for temporal phase unwrapping in phase measuring profilometry," *Optics Express*, vol. 27, no. 9, pp. 13357–13370, 2019.
- [26] J. Smith and R. Patel, "Advances in 3d reconstruction technologies for industrial applications," *Journal of Manufacturing Processes*, vol. 49, pp. 35–42, 2020. doi: 10.1016/j.jmapro.2019.11.008.
- [27] Y. Bai, Z. Zhang, S. Fu, H. Zhao, and C. Zuo, "Recent progress of full-field 3d shape measurement based on phase information: Review

of transform-based methods including fourier profilometry,” *Light: Advanced Manufacturing*, vol. 5, 2024. doi: 10.37188/LAM.2024.003.

- [28] R. Di, “Lossless background encoding and phase-difference method enabling high-frequency phase unwrapping in fringe profilometry,” *Optics and Lasers in Engineering*, vol. 181, p. 108357, 2025. doi: 10.1016/j.optlaseng.2024.108357.

Análisis numérico para estimar el daño por fatiga en pilotes marinos durante el proceso de hincado

Soto Chávez Andrés, Ocaña Espinosa de los Monteros Karina Griselda, Arjona Catzim Iván Fermín y Pérez-Moreno L. Francisco

Universidad Autónoma de Querétaro
Instituto Mexicano del Transporte
Querétaro, México

andressc343@gmail.com (ORCID: [<https://orcid.org/0009-0003-6387-3626>]), lf.perez@uaq.mx (ORCID: [<https://orcid.org/0000-0003-3565-9510>]), ivan.arjona@uaq.edu.mx (ORCID: [<https://orcid.org/0000-0003-1509-9579>]), karina.ocana@imt.mx (ORCID: [<https://orcid.org/0009-0001-1580-105X>]).

Resumen: En este estudio se realizó un modelo numérico para evaluar el daño por fatiga en pilotes de acero, durante el proceso de hincado mediante martillos hidráulicos de alta energía. El análisis consideró el hincado de un pilote tubular de gran diámetro en segmentos de 12.00 m de uniones soldadas, hasta alcanzar una penetración de 66 m. Se implementaron parámetros operativos realistas, incluyendo una energía nominal de martillo de 1400 kJ con 75% de eficiencia, rangos entre 180 y 600 golpes por metro y frecuencias de impacto de 32 a 40 golpes por minuto. Bajo estas condiciones, se estimó el daño acumulado por fatiga en las soldaduras utilizando la regla de Miner, obteniéndose perfiles de daño a lo largo de la profundidad de hincado del pilote. Los resultados indicaron una mayor concentración de daño en las soldaduras cercanas a la cabeza del pilote, con una disminución progresiva hacia la punta. Este enfoque permitió una cuantificación preliminar de la vida residual de las conexiones soldadas y destacó la importancia de incluir criterios de fatiga en la planificación y diseño de cimentaciones de plataformas localizadas costa afuera.

Palabras clave: EST; Pilotes costa afuera; Daño por fatiga; Hincado dinámico; Conexiones soldadas.

Abstract: This study realized a numerical model to evaluate fatigue damage in steel piles during the driving process using high-energy hydraulic hammers. The analysis considered a large-diameter tubular pile driven 12 m segments with welded joints, reaching a penetration depth of 66 m. Realistic operational parameters were implemented, including a nominal hammer energy of 1400 kJ with 75% efficiency, blow counts ranging from 180 to 600 blows per meter, and impact frequencies between 32 and 40 blows, per minute. Under these conditions, cumulative fatigue damage at the welds was assessed using Miner's rule, obtaining damage profiles along the pile depth. Results indicated a higher fatigue damage concentration near the pile head welds, with a progressive decrease toward the toe. This approach provided a preliminary quantification of the residual life of welded connections and highlighted the importance of including fatigue criteria in the planning and design of offshore foundations.

Keywords: Offshore piles; Fatigue damage; Dynamic driving; Welded connections; Numerical simulation.

1. Introducción

Las plataformas tipo *Jacket* constituyen una de las tipologías más comunes de estructuras costa afuera utilizadas para la explotación de hidrocarburos y otras actividades marinas. Se caracterizan por una geometría reticulada de acero que proporcionan rigidez y estabilidad frente a cargas ambientales como oleaje, corrientes y viento. Su conformación estructural se divide en tres partes principales: cimentación, compuesta por pilotes de acero hincados en el lecho marino que transfieren las cargas al subsuelo; subestructura, formada por el entramado tubular que conecta los pilotes y asegura la estabilidad global; y la superestructura, que alberga los equipos de

perforación, procesamiento y operación. La figura 1, muestra esquemáticamente estas tres secciones y su interrelación.

El hincado de pilotes de acero constituye uno de los métodos más utilizados para cimentaciones en obras de infraestructura localizadas costa afuera, particularmente en plataformas tipo *Jacket*, debido a su capacidad de transmitir elevadas cargas dinámicas al subsuelo marino. Sin embargo, este procedimiento genera esfuerzos de alta intensidad y de carácter cíclico que inducen daños por fatiga en las uniones soldadas, comprometiendo la vida útil de la estructura.

Trabajos recientes han señalado que el proceso de hincado no sólo produce deformaciones locales y tensiones

residuales significativas, sino que también contribuye al deterioro acumulativo de las conexiones soldadas, a continuación, se presentan estos trabajos. Hu *et al.* (2023) demostraron que los componentes sometidos a impactos repetidos en el sistema de hinca presenta daños de fatiga acumulativos que afectan directamente la integridad del pilote [1].

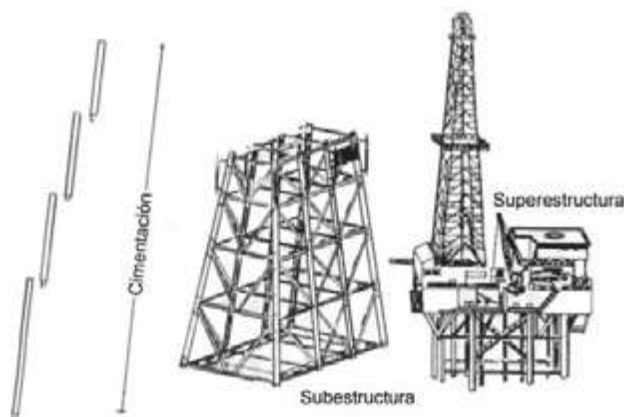


Figura 1. Componentes de una estructura marina tipo *Jacket*, Rubisel Pérez, 2015.

Por su parte, Tsetas, Tsouvalas y Metrikine (2024) analizaron el fenómeno de *friction fatigue* en pilotes instalados por vibración, destacando que el desgaste progresivo modifica la resistencia efectiva con el número de ciclos [2]. De manera complementaria, Mehmanparast *et al.* (2024) revisaron y actualizaron las curvas de fatiga S-N para estructuras costa afuera, mostrando que las uniones soldadas y la presencia de tensiones residuales reducen de manera significativa la vida útil proyectada de los elementos [3]. Estos hallazgos confirman que el hincado dinámico y vibratorio, junto con las cargas ambientales, representan un reto para la seguridad, la integridad estructural y la durabilidad de las cimentaciones marinas.

En el estado del arte se han desarrollado metodologías experimentales y numéricas para evaluar los efectos del hincado sobre pilotes. Algunas investigaciones han empleado variantes modernas de la ecuación de onda unidimensional, optimizadas para suelos intermedios, como los propuestos por Kalauni (2024), para modelar la transmisión dinámica de energía a lo largo del pilote y estimar los esfuerzos inducidos [4]. Por otra parte, estudios recientes también han incorporado criterios de fatiga modernos en la evaluación de uniones soldadas. Schubnell *et al.* (2025) aplicaron enfoques de *transfer learning* para estimar la vida a fatiga en soldaduras [5], mientras que

Niraula *et al.* (2025) analizaron el efecto de defectos locales (p. ej. *Undercut*) en la reducción de la duración de soldaduras sometidas a carga cíclica [6]. Sin embargo, aún son pocos los trabajos que integran de forma explícita el hincado dinámico con la cuantificación del daño por fatiga en conexiones soldadas y su impacto en la vida útil residual del pilote bajo condiciones operativas reales.

La relevancia de este estudio radica en la necesidad de contar con herramientas numéricas que permitan predecir de manera temprana a la concentración de daño por fatiga en pilotes hincados, especialmente en zonas críticas como las uniones soldadas cercanas a la cabeza del pilote. Este tipo de análisis contribuye a optimizar el diseño de cimentaciones en estructuras costa afuera, reducir costos de mantenimiento e incrementar el nivel de seguridad estructural.

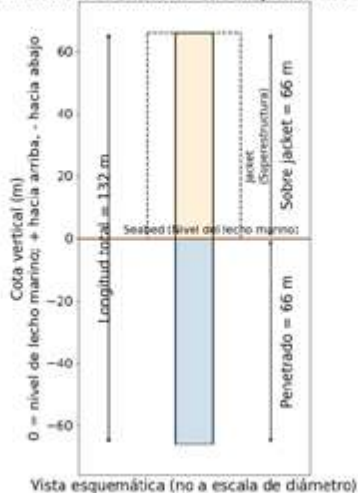
El objetivo específico de este trabajo fue desarrollar un modelo numérico capaz de estimar el daño por fatiga acumulado durante el proceso de hincado de pilotes de acero, considerando parámetros operativos realistas y representando la geometría en segmentos de 12 metros con uniones soldadas. Asimismo, se buscó identificar la distribución del daño a lo largo de la profundidad del pilote y evaluar la concentración del daño en zonas críticas.

2. Materiales y métodos

El estudio se desarrolló a partir de un modelo numérico implementado en lenguaje *Python*, con el propósito de simular el daño por fatiga en pilotes de acero sometidos a hincado dinámico. El pilote analizado correspondió a una geometría tubular de 2.0 m de diámetro exterior, 76 mm de espesor de pared y una longitud total de 132 m. La configuración estructural consideró la segmentación comercial en tramos longitudinales de 12 m, unidos mediante soldaduras de penetración completa, lo que permitió identificar zonas críticas asociadas a las conexiones.

En la Figura 2, se muestra un esquema del pilote analizado, cuya longitud total es de 132 metros. Durante el proceso de instalación, únicamente 66 metros se encuentran efectivamente penetrados en el lecho marino, mientras que los 66 metros restantes quedan sobre el nivel del fondo y forman parte de la zona cubierta por la estructura tipo *Jacket*, donde se realiza la conexión con la superestructura. Esta representación permite aclarar la diferencia entre la longitud total del pilote y la profundidad de penetración, destacando que el análisis de daño por fatiga se centra en la porción enterrada, aunque las soldaduras superiores mantienen relevancia estructural al construir la interfase de unión con la plataforma y estar sometidas posteriormente a cargas ambientales como el oleaje.

Esquema del Pilote Marino: 132 m Totales (66 m penetrados + 66 m sobre jacket)



Vista esquemática (no a escala de diámetro)

Figura 2. Esquema del pilote marino: longitud total y profundidad de penetración.

El material estructural empleado fue un acero equivalente a ASTM A572 Grado 50, cuyas propiedades mecánicas fueron: módulo de elasticidad (E)= 2.05×10^{11} , Pa, densidad (ρ)= 7850 kg/m^3 , y coeficiente de Poisson (ν)= 0.3. Se incorporó un factor correctivo por espesor siguiendo formulaciones establecidas en normativas internacionales de fatiga, así como coeficientes de concentración de esfuerzos (*Stress Concentration Factors, SCT*) aplicados a las uniones soldadas y a la zona afectada por el calor (*Heat Affected Zone, HAZ*).

Para las condiciones de operación, se consideró el uso de un martillo hidráulico de alta energía con una energía nominal de 1400 kJ y una eficiencia global del 75% que contempló pérdidas asociadas al sistema hidráulico, a la cabeza y a los elementos de amortiguamiento. Se analizaron frecuencias de impacto entre 32 y 40 golpes por minuto, con rangos de entre 180 y 600 golpes por metro de penetración, lo que permitió representar los escenarios realistas in situ.

El modelo de propagación de esfuerzos se basó en una aproximación de onda unidimensional, en la cual la energía efectiva transmitida al pilote se tradujo en rangos de esfuerzos equivalente. Posteriormente, se generaron historias sintéticas de esfuerzos cíclicos mediante señales periódicas amortiguadas, que fueron sometidas a conteo de ciclos por el método de *rainflow*, siguiendo la recomendación de la norma *ASTM E1049-85* [1].

$$\Delta\sigma_{ff} = f(\Delta\sigma(t)) \quad (1)$$

Donde:

$\Delta\sigma_{ff}$: Es el incremento de esfuerzo efectivo de fatiga, representa la amplitud o rango de esfuerzo que se utiliza

en el análisis de daño acumulado a fatiga. Es el valor filtrado o procesado a partir de la historia de esfuerzos reales.

f : Es la función de transformación o regla matemática/experimental que toma como entrada la historia de esfuerzos y devuelve el rango de esfuerzo efectivo para la fatiga. Puede ser una extracción de ciclos mediante el método *rainflow* o un filtrado de máximos/mínimos.

$\Delta\sigma(t)$: Es la variación de esfuerzo en el tiempo. Es la señal real de esfuerzos alternantes a la que está sometido el material o la estructura durante la carga cíclica.

La evaluación del daño por fatiga se realizó utilizando la regla de *Miner*, tanto en su formulación lineal como en una variante no lineal, con el fin de analizar la sensibilidad de los resultados. La resistencia a fatiga del acero fue modelada mediante curvas S-N (*Stress-Number of cycles curve*), ajustadas con parámetros empíricos para detalles de soldadura en pilotes hincados costa afuera. Los resultados de daño acumulado (D) se representaron en perfiles a lo largo de la profundidad del pilote, identificando tramos donde se alcanzaron los umbrales normativos ($D > 0.2$ para inicio de daño, $D > 0.5$ para estado crítico y $D > 1.0$ para falla por fatiga).

$$N = A(\Delta\sigma)^{-m} \quad (2)$$

Donde:

N : Es el número de ciclos a la falla por fatiga, indica cuántas repeticiones de carga (ciclos) puede soportar el material antes de que ocurra la falla.

A : Constante de material, depende de las propiedades mecánicas y de la calibración experimental de la curva S-N del material.

$\Delta\sigma$: Es el rango de esfuerzo aplicado, diferencia entre esfuerzo máximo y esfuerzo mínimo, es variable independiente de la curva de fatiga.

$-m$: Es la exponente de fatiga, describe la sensibilidad del material a la amplitud de esfuerzos; un m alto indica pequeñas variaciones en esfuerzo producen grandes cambios en la vida a fatiga.

Este procedimiento permitió cuantificar la distribución del daño en función de la profundidad y diferenciar las zonas más vulnerables del pilote, garantizando la reproducibilidad del análisis bajo los parámetros establecidos.

$$D = \sum_{i=1}^k \frac{n_i}{N_i} \quad (3)$$

Donde:

D : Es el daño acumulado por fatiga (adimensional). Si D es menor a 1, la estructura aún no falla, D es semejante a 1 la estructura alcanza la condición de falla por fatiga y si D es

mayor a 1 se espera la falla prematura.

k : Es el número de intervalos o bloques de carga cíclica considerados.

n_i : Es el número de ciclos aplicados en el bloque i , corresponde a los ciclos que realmente sufrió la estructura bajo cierto rango de esfuerzo.

N_i : Es el número de ciclos a falla correspondiente al rango de esfuerzo del bloque i , obtenido se la curva S-N.

La ecuación de onda unidimensional (conocida también como *wave equation* de *Smith* en pilotes) es fundamental para describir la propagación de esfuerzos durante el hincado, así que vale la pena incluirla de forma clara en tu artículo.

La ecuación clásica que describe la propagación de una onda longitudinal en una barra, es:

$$\frac{\partial^2 u(z,t)}{\partial t^2} = c^2 \frac{\partial^2 u(z,t)}{\partial z^2} \quad (4)$$

$U(z,t)$ = desplazamiento longitudinal en función de la profundidad z y del tiempo t .

c = velocidad de propagación de la onda de tensión en el material se expresa como $c = \sqrt{E/\rho}$

E = módulo de elasticidad del material del pilote.

ρ = densidad del material.

Su aplicación en los pilotes, esta ecuación se discretiza para representar el pilote como un conjunto de elementos de masa y resortes (modelo de barras o elementos tipo “*lumped mass*”). El golpe del martillo se modela como una carga dinámica en la cabeza del pilote, y la ecuación permite calcular:

- Las tensiones de compresión que viajan hacia abajo por el pilote.
- Las ondas reflejadas en discontinuidades (soldaduras, punta del pilote, cambios de sección).
- La interacción con el suelo, modelada mediante resortes, amortiguadores y resistencias dinámicas.

Esta ecuación sirve para predecir las tensiones máximas e el pilote durante el hincado, calcular penetración por golpe y estimar el número de golpes necesarios para alcanzar la profundidad deseada, identificar zonas críticas (cerca de la cabeza o soldaduras) donde las tensines cíclicas son más elevadas, diseñar y seleccionar martillos adecuados para un pilote y suelo específicos.

Durante el hincado, la fuerza del martillo $F(t)$ aplicada en la cabeza del pilote se traduce en una onda de compresión que viaja a velocidad c . Cuando esta onda llega a la punta

del pilote, parte de la energía se transmite al suelo (resistencia estática y dinámica) y otra parte se refleja como onda de tensión de retorno. El análisis de estas ondas sucesivas permite calcular esfuerzos en cada sección y, combinando con reglas de fatiga (Miner), estimar el daño acumulado [7, 8, 9].

3. Resultados

Los resultados obtenidos mediante la simulación numérica permitieron identificar le evolución del daño por fatiga acumulado (D) en las soldaduras del pilote bajo condiciones de penetración en arena densa, así como la relación entre el desempeño del martillo y la resistencia que opone el suelo.

En la Figura 3 se presenta la variación del tiempo requerido por metro de penetración, comparando el desempeño teórico del martillo con el escenario operativo. Se observa que, mientras el martillo mantuvo un crecimiento prácticamente lineal en el consumo de tiempo por metro, el comportamiento operativo mostró un incremento más pronunciado conforme aumentó la profundidad, alcanzando valores cercanos a 100 minutos por metro en la penetración final. Esta diferencia refleja la influencia directa de la resistencia creciente del terreno.

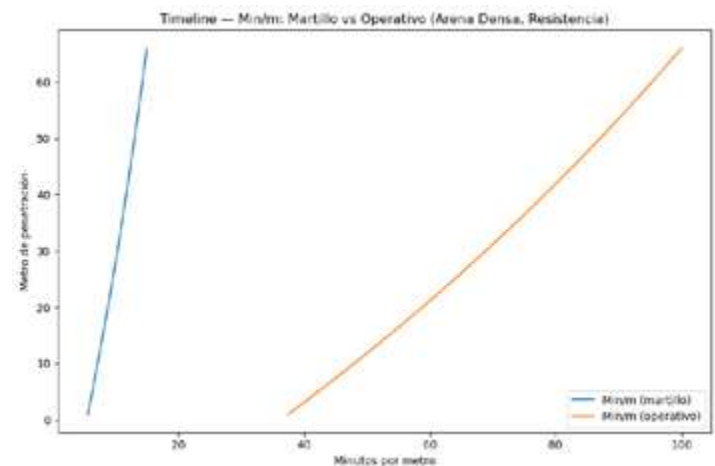


Figura 3. Relación entre tiempo por metro de penetración considerando la capacidad del martillo y el escenario operativo en arena densa.

La tabla 1 resume los parámetros operativos empleados en la simulación para los primeros metros de penetración que se generan mediante los esfuerzos dinámicos del martillo hidráulico y de forma consecuente el suelo rechaza estos esfuerzos dinámicos por lo que la cantidad de golpes se presenta de forma muy diferentes unos con respecto de otros, esto aumenta el daño en las conexiones soldadas del pilote de forma temprana.

Tabla 1. Parámetros operativos empleados en la simulación.

Metro de penetración	Golpes/m	Gpm	Min /m	Min/m (Op.)
1	180	32.00	5.62	37.50
2	186	32.12	5.80	38.70
3	192	32.25	5.98	39.89
4	199	32.37	6.16	41.06
5	205	32.49	6.34	42.23

El perfil del daño acumulado a 66 metros de penetración se muestra en la figura 4, los valores de D fueron máximos en las soldaduras de la cabeza del pilote ($D=0.806$) y decrecieron progresivamente hacia la punta ($D=0.007$ a 132 m). Este comportamiento evidencia que la mayor concentración de esfuerzos cíclicos se genera en la zona superior del pilote, donde el impacto del martillo hidráulico que induce ondas de compresión de mayor amplitud que se atenúan conforme se propagan hacia la punta debido a la disipación de energía en el material y al incremento de la resistencia del suelo. El gradiente descendente de daño refleja la respuesta típica de pilotes hincados en suelos de arena densa, en los cuales la rigidez y la fricción lateral aumentan con la profundidad, provocando una amortiguación progresiva de las tensiones transmitidas. De esta manera, las soldaduras cercanas a la cabeza se identifican como zonas críticas susceptibles a la iniciación de grietas por fatiga, mientras que las uniones más profundas presentan un comportamiento más estable.

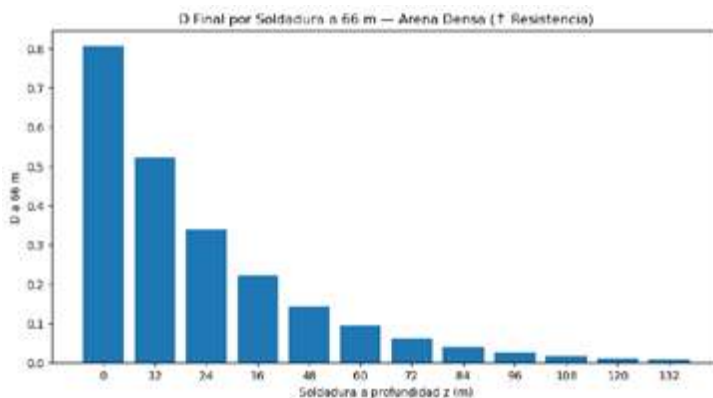


Figura 4. Perfil de daño acumulado D por soldadura a 66 metros de penetración.

La Figura 5, presenta la profundidad de las soldaduras y el primer metro de penetración en el que cada una alcanzó los umbrales normativos de daño ($D>0.2$, 0.5 , 1.0). Se observa que, en las primeras soldaduras, ubicadas cerca de la cabeza del pilote, alcanzan los umbrales de daño en etapas iniciales del hincado, incluso dentro de los primeros 10 a 20 metros de penetración. Esto indica una rápida acumulación de daño en las uniones sometidas a las mayores amplitudes de esfuerzo, derivadas del impacto directo del martillo y de la menor disipación de energía en los primeros metros.

Las soldaduras ubicadas a mayor profundidad presentan una respuesta más retardada alcanzando los umbrales de daño en etapas avanzadas o sin llegar a superarlos dentro del rango de penetración analizado. Este comportamiento confirma que la distribución del daño a lo largo del pilote no es uniforme y está gobernada principalmente por atenuación de las ondas de esfuerzo y el incremento progresivo de la rigidez del suelo. El patrón observado sugiere que la zona superior de pilote experimenta un proceso de deterioro acelerado que podría comprometer la integridad de las soldaduras más próximas a la cabeza, mientras que las uniones profundas permanecen dentro de un régimen estructural seguro. Esta información resulta importante para definir estrategias de monitoreo y mantenimiento, priorizando las conexiones que alcanzan tempranamente los umbrales críticos de daño.

Estos hallazgos resaltan la importancia de incorporar el análisis de daño por fatiga dentro de las evaluaciones de desempeño estructural durante la instalación de pilotes. La identificación temprana de zonas críticas no sólo permite priorizar inspecciones y optimizar parámetros de hincado, sino además proporciona una base cuantitativa para alimentar modelos predictivos de deterioro.



Figura 5. Profundidad de soldadura y primer metro de penetración en que se alcanzaron los umbrales normativos.

Finalmente, la evolución temporal del daño acumulado con la penetración se representa en la figura 6. En ella se observa que las soldaduras cercanas a la superficie presentan una acumulación de daño rápida y sostenida, alcanzando valores superiores a 0.7 en 66 m de penetración. Por lo contrario, en las soldaduras profundas mostraron curvas planas con incrementos marginales de D , indicando una menor vulnerabilidad a la fatiga durante el hincado.

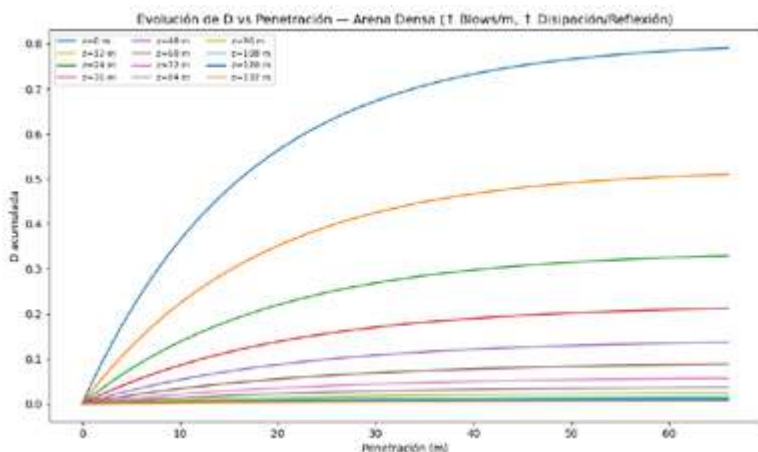


Figura 6. Evolución del daño acumulado con la penetración para diferentes soldaduras a lo largo del pilote.

4. Discusión

Los resultados obtenidos en la simulación mostraron que el daño por fatiga en las soldaduras del pilote presenta una distribución decreciente con la profundidad, alcanzando un valor máximo de $D=0.806$ en la cabeza y reduciéndose progresivamente hasta valores cercanos a $D=0.007$ en la punta. Este comportamiento evidencia que los esfuerzos inducidos por el martillo se concentran en la parte superior del pilote, donde la transferencia de energía es mayor y la disipación hacia el suelo es aún limitada.

Estos resultados son consistentes con los hallazgos de Chung *et al.* (2013), quienes reportaron que los pilotes sometidos a hincado dinámico presentaban concentraciones de daño acumulado entre $D=0.4$ y $D=0.6$ en las uniones superiores, particularmente durante los primeros 60 a 70 metros de penetración [10]. De manera similar, en este trabajo se observó que las primeras soldaduras superan el umbral normativo de daño ($D>0.2$) desde etapas tempranas del hincado, lo que concuerda con la tendencia identificada por los autores.

Por su parte, Priest (2010), destacó que la fatiga inducida por hincado se concentra principalmente en los primeros 20 a 25 metros desde la cabeza del pilote, donde los gradientes de esfuerzo son más pronunciados [11]. La simulación realizada en este estudio reproduce esa misma tendencia, ya que las soldaduras de los primeros 24 metros presentaron los niveles de daño más significativos, mientras que a profundidades superiores el daño se redujo considerablemente.

En un análisis técnico más reciente, Hussein (2022) documentó que pilotes tubulares con espesores de pared de entre 70 a 80 mm experimentaron un incremento notable del daño por fatiga en las soldaduras cercanas a la cabeza, aunque señaló que rara vez se alcanzaban valores de $D>1$ durante el proceso de hincado, salvo en condiciones extremas de golpeo [12]. Los resultados obtenidos en la presente investigación muestran una tendencia similar, ya que si bien se alcanzaron niveles críticos de daño ($D>0.5$) en la soldadura de la cabeza, los valores se mantuvieron en un rango subcrítico en el resto de la estructura, sin llegar a condición de falla.

Asimismo, Paikowsky (1994) y Holeyman (2002) han enfatizado que el enfoque tradicional en el análisis del hincado ha estado centrado en la capacidad portante y en la eficiencia de transmisión de energía, sin evaluar de manera explícita los efectos acumulativos de la fatiga en las uniones soldadas. La diferencia con el presente estudio radica en que aquí se incorporó un procedimiento específico para cuantificar el daño por fatiga, mediante conteo de ciclos de esfuerzo y aplicación de la regla de Miner, lo cual permite obtener un panorama más integral sobre la vida útil del pilote.

En este sentido, la aportación del modelo numérico empleado es doble: por un lado, reproduce tendencias observadas experimentalmente en el campo, y por otro, introduce un enfoque orientado a la predicción temprana del deterioro por fatiga en zonas críticas. Esto representa un avance respecto a los trabajos previos, a que al identificar los tramos con mayor vulnerabilidad es posible proponer estrategias de reforzamiento, rediseño o monitoreo preventivo.

En este contexto, los resultados obtenidos permiten no solo validar la pertinencia del modelo desarrollado, sino también proyectar futuras líneas de investigación que integren elementos adicionales al análisis. Por ejemplo, la incorporación de condiciones ambientales marinas como oleaje y corrientes, el efecto combinado del hincado con cargas de operación a largo plazo y la influencia de diferentes tipos de suelos pueden enriquecer la comprensión

del fenómeno de fatiga en pilotes. Asimismo, la metodología aquí planteada podría extenderse al análisis de conexiones soldadas en otras tipologías estructurales costa afuera, como torres eólicas marinas o muelles portuarios, favoreciendo el desarrollo de criterios de diseño más robustos y sostenibles.

De esta manera, el trabajo presentado no solo representa un avance en la cuantificación del daño por fatiga en pilotes hincados, sino que también constituye una base sólida para la implementación de modelos predictivos más integrales, orientados a optimizar la seguridad estructural y la durabilidad de las cimentaciones marinas en escenarios cada vez más exigentes.

Un aspecto particularmente relevante es que las soldaduras cercanas a la cabeza del pilote, donde se identificaron los valores máximos de daño acumulado, corresponden a la zona en la que posteriormente se instala la superestructura de la plataforma. Esto significa que estas uniones, ya debilitadas por el proceso de hincado, quedan expuestas a la acción continua de cargas cíclicas asociadas al oleaje y corriente marinas. Tal condición implica que el daño por fatiga observado en la fase de instalación puede prolongarse y amplificarse durante la vida operativa de la estructura, convirtiéndose en un factor crítico para la integridad global del sistema pilote-superestructura.

5. Conclusión

El presente trabajo desarrolló un modelo numérico para estimar el daño por fatiga acumulado en pilotes tubulares de acero durante el proceso de hincado dinámico, representando de manera explícita las uniones soldadas en segmentos de 12 metros. Bajo condiciones operativas realistas, los resultados permitieron obtener perfiles detallados de daño a lo largo de la profundidad de penetración y poner en evidencia la distribución no uniforme de esfuerzos cíclicos en el pilote.

Los valores más altos de daño se localizaron en las soldaduras cercanas a la cabeza ($D=0.8$ a los 66 metros de penetración), lo que confirma que esta zona constituye el punto crítico durante la instalación. Conforme se avanza en la profundidad, el daño decrece progresivamente hasta ser prácticamente despreciable en la punta ($D=0.007$ a 132 metros), el comportamiento que coincide con la forma en que se transmite y disipa la energía de hincado a través de la estructura. Esa tendencia valida la pertinencia del

modelo y ofrece un marco cuantitativo para integrar la vulnerabilidad de las uniones soldadas.

Un hallazgo significativo es que las soldaduras superiores, ya que, sometidas a un proceso de fatiga durante la instalación, constituyen posteriormente la interfase donde se conecta la superestructura de la plataforma. En consecuencia, estas uniones quedan expuestas a la acción continua de oleaje y corrientes marinas, que actúan como factores cíclicos adicionales y pueden acelerar el proceso de deterioro. Reconocer este escenario resulta fundamental para el diseño y la planeación de cimentaciones costa afuera, ya que la integridad de esta zona puede definir la seguridad global de la estructura.

La metodología implementada, basada en el conteo de ciclos de esfuerzo por el método de *rainflow* y la aplicación de la regla de Miner, demostró ser una herramienta eficaz para traducir parámetros operativos del hincado (energía, frecuencia de golpeo y número de impactos por metro) estimaciones cuantitativas de daño por fatiga. Al mismo tiempo, la segmentación del pilote en tramos comerciales permitió identificar con claridad las zonas más vulnerables, aportando un criterio técnico aplicable al diseño y a la gestión de mantenimiento.

En síntesis, el modelo desarrollado representa un aporte metodológico al análisis de pilotes hincados en ambientes marinos, ofreciendo una base para incorporación de criterios de fatiga en proyectos de cimentaciones costa afuera. Los resultados obtenidos resaltan la necesidad de considerar no solo la capacidad portante y el rechazo dinámico durante el hincado, sino también el impacto acumulativo en la vida útil de las conexiones soldadas. Con ello, este trabajo da un primer paso hacia el establecimiento de estrategias de diseño y monitoreo orientadas a garantizar la durabilidad, la seguridad y la sostenibilidad de plataformas tipo *Jacket* y otras infraestructuras costa afuera.

Fuentes de financiamiento

Los autores agradecen a la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación de México (SECIHTI) por los recursos otorgados para la realización de esta investigación.

Agradecimientos

Agradezco a mi asesor de tesis al Dr. Iván Fermín Arjona Catzim por su apoyo y paciencia para la revisión de esta investigación, así como la aportación de información para guiarme, agradezco a la Dra. Karina Griselda Ocaña Espinosa de los Monteros, por su tiempo y dedicación para la revisión de esta investigación, quiero agradecer al coordinador de M.C.

(Estructuras), el Dr. Luis Francisco Pérez Moreno por su apoyo para mi formación académica.

Conflictos de interés

Los autores declaran que no existen conflictos de interés.

Los financiadores no tuvieron participación en el diseño del estudio; en la recolección, análisis o interpretación de los datos; en la redacción del manuscrito; ni en la decisión de publicar los resultados.

Abreviaturas

Las siguientes abreviaturas se utilizan en este manuscrito:

S-N: Stress-Number of cycles curve.

ASTM: American Society for Testing and Materials.

SCT: Stress Concentration Factor.

HAZ: Heat-Affected Zone.

D: Damage.

kJ: kiloJulio.

GPM: Golpes por Minuto.

International, West Coshohocken, PA, 2017.

- [8] DNVGL, Recommended Practice DNVGL-RP-C203: Fatigue Design of Offshore Steel Structures, Det Norske Veritas, Hovik, Norway, 2015.
- [9] Pile installation fatigue damage from impact driving records. A case study of offshore monopiles. (2023) in proceedings of the foundations reuse workshop, Orlando. Retrieved from <https://foundationreuse.com/wp-content/uploads/2023/07/Foundation-Reuse-Orlando.pdf>
- [10] J. Chung, R. Wallerand, and M. Hélias-Braut, "Pile fatigue assessment during driving", Procedia Engineering, vol. 66, pp. 189-200, 2013.
- [11] A. M. Priest, "Observations on the effect of pile driving on fatigue endurance," in Proc. European Offshore Mechanics Symposium (EUROMS 10). 2010.
- [12] M. Hussein, "Determination of driving induced pile damage," GRL Engineers Technical Paper, 2022.

6. Referencias bibliográficas

- [1] Hu, H; et al (2023). Fatigue analysis of large anvil in the pile driving of offshore wind turbines. Ocean Engineering, 283, 115017.
- [2] Tsetas, A; Tsouvalas, A; and Metrikine, A. (2024). Exploring memory mechanisms for friction fatigue in vibratory pile driving. Journal of Physics: Conference series, 2767(6), 062021.
- [3] Mehmanparast, A; Della Santa, F and Zorzi, G (2024). Comparison of S-N curves from international fatigue design standards for a better understanding of the long-term operational of offshore wind turbine welded foundations. Wind, 4(3), 251-274
- [4] Kalauni, H. K. (2024), Improved wave equation analysis for piles in soil-based intermediate geomaterials. Infrastructures, 9(2), 2.
- [5] Schubnell, J; Fliegner, S; Rosenberger, J; Feth, S; Braun, M and Beiler, M (2025). Data-driven fatigue assessment of welded steel joints based on transfer learning. Welding in the world, 69, 815-829.
- [6] Niraula, A; et al (2025). The severity of local undercut on fatigue life of welded joints. Engineering Structures, 317, 119248.
- [7] ASTM International, E1049-85: Standard Practices for Cycle Counting in Fatigue Analysis, ASTM

Revisión sistemática del aprovechamiento de la pulpa de café para obtener productos de valor agregado

Coffee Pulp upcycling to obtain value added products a systematic review

Escudero-Enríquez, Eliud*, Caltzontzin-Rabell, Valeria*, Carrillo-Parra, Artemio** y Gutiérrez-Antonio, Claudia*.

*Procesos Sustentables de Producción de Bioproductos, Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Querétaro **
*Instituto de Silvicultura e Industria de la Madera, Universidad Juárez Autónoma de Durango ***
 Querétaro, México.

eliud.escudero@uaq.mx, valeria.caltzontzin@uaq.mx, acarrilloparra@ujed.mx, claudia.gutierrez@uaq.mx; <https://orcid.org/0000-0002-0131-9158>, <https://orcid.org/0000-0002-5739-0957>, <https://orcid.org/0000-0003-0285-5224>, <https://orcid.org/0000-0002-7557-2471>.

Resumen: La pulpa de café es el componente más abundante del fruto del café, representando el 40% del peso fresco del fruto. Toda esta biomasa es desechada durante el proceso de obtención del grano del café, y su destino habitual son los vertederos a campo abierto, teniendo por consecuencia un impacto ambiental negativo. A lo largo de los años múltiples propuestas han surgido para darle un uso a esta biomasa, principalmente para la obtención de polifenoles, etanol, pellets combustibles y ensilado. El propósito de esta revisión es compilar y analizar los artículos científicos reportados en este contexto dada la importancia de describir el panorama de alternativas existentes de valorización de pulpa de café y elucidar las áreas de oportunidad. A partir de los trabajos revisados se encontró que la obtención de polifenoles, etanol y ensilado a partir de pulpa de café se han reportado como técnicamente viables. Así mismo se encontró que la elaboración de pellets combustibles se ha reportado como inviable por la calidad de estos, abriendo campo de investigación para buscar estrategias que permitan la obtención de pellets combustibles con mejor calidad. Por último, tanto la obtención de etanol como la de polifenoles no aprovechan el 100% de la biomasa, por lo que su implementación para la valorización de pulpa de café debería complementarse con una o más técnicas adicionales para procurar el máximo aprovechamiento de la pulpa de café, mientras que la producción de pellets combustibles y de ensilado no reportan porcentajes de eficiencia.

Palabras clave: BIO; Residuos de café; Valorización de café; Economía circular;

Abstract: Coffee pulp is the main component of coffee cherry fruit, comprising around 40% of its fresh weight. This biomass is a byproduct of coffee industry and generally it is thrown away in open fields making a negative environmental impact. Several valorization alternatives have been proposed and studied through the years, being polyphenol extraction, ethanol biosynthesis, fuel pellets making and silage the main proposed paths. Therefore, the aim of this work is to compile and analyze the scientific reports published in these regards, due to the importance of knowing the current state of coffee pulp valorization options as well as elucidate current opportunity areas. From reviewed documents reports of technical feasibility of polyphenols extraction, ethanol biosynthesis and silage from coffee pulp were found while for fuel pellets making, using solely coffee pulp as feedstock was reported as non-feasible due to low quality values therefore an open field for coffee pulp enhancing to obtain fuel pellets is open. Lastly, polyphenols extraction and ethanol biosynthesis does not make use of all biomass, hence coffee pulp should undergo one or more additional techniques to upcycle as much biomass as possible, while fuel pellets making and silage research papers do not report efficiency making impossible to know if these processes can valorize all biomass.

Keywords: BIO; Coffee waste; Coffee upcycling; Circular Economy.

1. Introducción

El café es una de las bebidas más importantes en todo el mundo. Al género *Coffea* pertenecen las dos especies más importantes del comercio del café:

Coffea arabica L. y *Coffea canéfora* Pierre, comúnmente conocidas como Arábica y Robusta; de estas especies proviene alrededor del 70% de la producción de café (Alves et al., 2011; Ferrão, 2009). Conforme el mercado del café se va haciendo cada vez más grande, una gran cantidad de desarrollo científico y tecnológico lo ha

acompañado. Lo anterior se ha traducido en la elaboración de nuevos cultivares, mejor adaptados, más productivos, resistentes a plagas y enfermedades, todo esto dando como resultado productos de mayor calidad [3].

Como puede observarse en la Figura 1, en la actualidad más de 70 países producen café. En 2023 se produjeron 168.2 millones de bultos de 60 kg, y se consumieron 173.1 millones de bultos. Existen cuatro regiones importantes para la producción de café: África, Sudamérica, Asia-Oceanía y El Caribe-América Central-México [4].

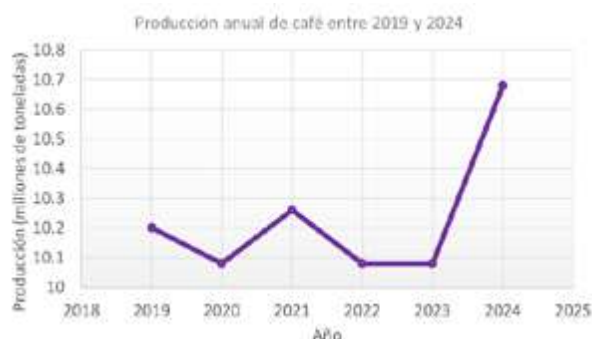


Figura 1. Producción anual del café entre 2019 y 2024, valor reportado en millones de toneladas.

Durante la producción del café se generan una gran cantidad de residuos, mismos que representan una importante fuente de contaminación (Fig. 2); lo anterior debido a su composición química, así como a los elevados volúmenes en los que son generados. Es importante que todos los participantes en la cadena productiva del café unan esfuerzos para dar una solución a la gran cantidad de residuos que se generan (Fig. 3). Este reto también representa una oportunidad económica debido a que muchos de los subproductos del proceso del café poseen compuestos de valor con potencial de aplicación farmacéutica, alimenticia, cosmética y de energías renovables [3].



Figura 2. Residuos de la industria del café. En orden: cascabello, papiro, pulpa, piel plateada y borra.



Figura 3. Vertedero de residuos de beneficiadero en Chiapas, México.

En este contexto destaca la pulpa del café, proveniente del llamado beneficio húmedo del café; ésta representa entre el 40 y el 50% del peso húmedo de la cereza del café [5], [6], [7]. La pulpa del café se genera en grandes cantidades (Figura 3); alrededor de dos toneladas de pulpa de café se generan por cada tonelada de café producido [8], [9]. Para 2008, la producción de pulpa de café en México se estimó en 707 millones de toneladas en peso seco [10].

La pulpa del café es un subproducto del proceso húmedo del café, que suele tener un nulo o pobre aprovechamiento. Esta biomasa es rica en compuestos bioactivos como los compuestos fenólicos, cafeína y fibra dietética [11], [12].

Aunque suele ser considerado un desperdicio o basura, la pulpa de café tiene un gran potencial. Este residuo puede ser aprovechado como sustrato para procesos microbiológicos como la fermentación. La pulpa del café presenta también propiedades antioxidantes debido a su contenido de compuestos fenólicos. La pulpa del café también puede incorporarse en alimento para animales, aunque su contenido de compuestos fenólicos limita el porcentaje de incorporación [3]. La composición química de la pulpa de café se presenta en la Tabla 1.

Tabla 1. Composición química de la pulpa de café de acuerdo con las fuentes consultadas

	[8] %	[13] %	[14] g/kg
Celulosa	63 ± 2.5	18.65	286
Hemicelulosa	2.3 ± 1	0.98	ND
Lignina	17.5 ± 2.2	12.20	ND
Lípidos	2.0 ± 2.6	ND	29
Cafeína	1.5 ± 1.0	0.68	18
Taninos	3.0 ± 5.0	2.33	7
Polifenoles totales	1.5 ± 1.5	ND	20
Ácido clorogénico	2.4 ± 1.0	ND	ND
Cenizas	ND	4.99	89
Proteína	11.5 ± 2.0	ND	80

Nitrógeno	ND	1.74	ND
Fibra dietética total	60.5 ± 2.9	54.15	ND

Debido a los altos volúmenes de café producido, y a las proyecciones que estiman que dicha producción continuará incrementando, es importante encontrar maneras de disponer de la pulpa de café, sin que esto represente un riesgo para el medio ambiente. Cabe mencionar que se generan dos kilogramos de pulpa de café por cada kilogramo de café producido. La pulpa de café es un residuo que contiene cafeína y taninos, los cuales representan un riesgo ambiental [15], [16]

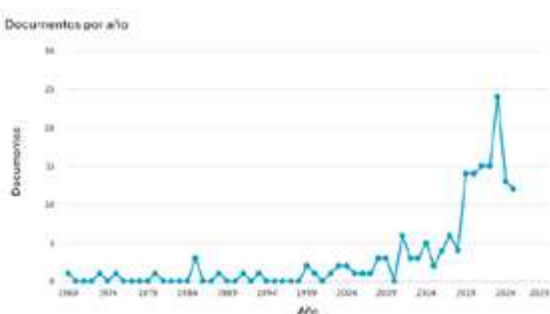


Figura 4. Documentos publicados por año sobre obtención de etanol, polifenoles, pellets combustibles o ensilado a partir de pulpa de café

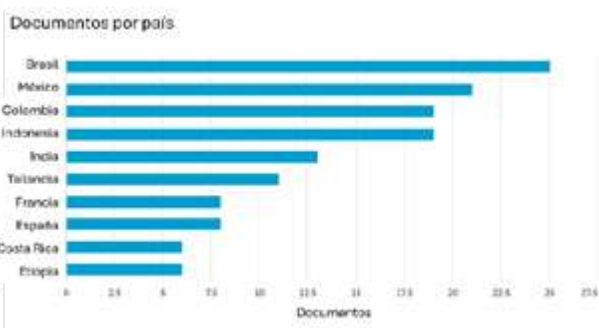


Figura 5. Principales países que publican artículos científicos relacionados con la pulpa de café y la obtención de etanol, polifenoles, pellets combustibles y ensilado.

Actualmente, se han reportado diversos procesos de valorización de la pulpa de café, entre los que destacan su fermentación para la obtención de etanol, compostaje, la extracción para la obtención de polifenoles y su densificación para obtener pellets combustibles (Fig 4). En este contexto destaca la participación de México, que tiene el segundo lugar entre los países que más realizan investigación de este tema. (Fig 5). Sin embargo, no existe una

revisión sistemática de la información existente, las revisiones en las que actualmente se integra la pulpa de café están limitadas al área de la producción de alimentos, dejando de lado sus otros potenciales usos o bien no están especializadas en la pulpa de café y lo incluyen en un conjunto más grande, el de los residuos del café.

En este contexto el objetivo de este trabajo es realizar una compilación de los trabajos de investigación reportados para la valorización de pulpa de café para la obtención de polifenoles, etanol, ensilado y pellets combustibles.

Es así como la importancia del presente trabajo yace en brindar un amplio panorama de las estrategias y alternativas de valorización que existen para la pulpa de café, así como las áreas de oportunidad que existen para continuar con la investigación.

2. Materiales y métodos

Se empleó el Sistema de búsqueda SCOPUS con la siguiente línea de búsqueda:

TITLE-ABS (Coffee AND pulp AND (pellet OR silage OR Ethanol OR Polyphenols))

Se obtuvieron un total de 164 documentos. De los documentos encontrados se procedió a realizar un análisis PRISMA como lo muestra la figura 4.

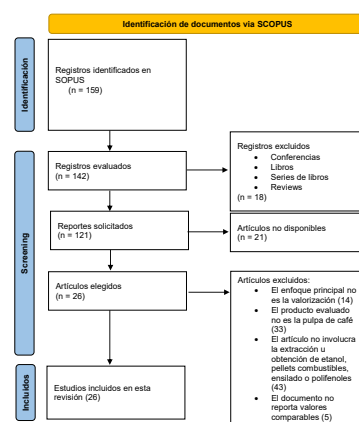


Figura 5. Diagrama de flujo del análisis PRISMA realizado en esta revisión sistemática.

A continuación, se detallan los criterios de rechazo.

- El enfoque principal no es la valorización: el objetivo del trabajo reportado no es arrojar evidencia experimental del proceso de valorización de pulpa de café. Puede ser que se dedique a plantear un esquema

logístico o bien que use datos de otros experimentos para desarrollar un proceso de optimización completamente computacional.

- El producto evaluado no es la pulpa de café: si bien el artículo menciona esta biomasa en algún punto del resumen o del título, en la metodología descrita el artículo no menciona haber trabajado con pulpa de café en ningún momento.
- El artículo no involucra la extracción u obtención de etanol, pellets combustibles, ensilado o polifenoles: si bien los menciona en algún momento del resumen o del título, el artículo científico no menciona haber realizado experimentalmente la obtención de alguno de estos productos.
- El artículo no reporta valores comparables: Específico de la extracción de polifenoles, se eligió comparar los artículos por medio del contenido total de polifenoles reportado a través del método de Folin Ciocalteu ya que es el más ampliamente reportado, si el artículo no realizó este método no puede compararse con los otros.

3. Resultados

Se recuperaron un total de 26 artículos reportados bajo las condiciones de búsqueda planteadas en la metodología. Dichos artículos se dividen de la siguiente manera:

- 6 corresponden a la biosíntesis de etanol
- 15 corresponden a la extracción de polifenoles
- 3 corresponden al ensilado
- 2 corresponden a la obtención de pellets combustibles

A continuación, se presenta la información detallada por estrategia de valorización.

3.1. Bioetanol

Se encontraron 6 artículos que reportaban la elaboración de etanol a partir de pulpa de café (tabla 1). Para todos los artículos revisados, el microorganismo empleado ha sido *saccharomyces cerevisiae*. Dentro de los estudios reportados el estudio con la peor eficiencia de conversión es el de [17] donde se empleó un sistema de organosolv como pretratamiento. Los pretratamientos reportados son, ácidos, alcalinos, organosolv, hidrólisis enzimática, molienda y prensado.

Tabla 1. Artículos reportados de conversión de pulpa de café en bioetanol.

Pretratamiento	Levadura	Concentración final de Etanol (g/l)	Eficiencia de conversión ($\frac{g_{\text{etanol}}}{g_{\text{glucosa}}}$)	Referencia
Alcalino seguido de Hidrólisis por Visczyme Cassava C	<i>S. cerevisiae</i> 30°C 72 h	11.28	0.37	[18]
Ácido	<i>S. cerevisiae</i> 30°C 24 h	7.35	-	[19]
Ácido Seguido de hidrólisis por <i>Aspergillus niger</i>	<i>S. Cerevisiae</i> 28°C 120 h	8.7	-	[20]
Alcalino Seguido de hidrólisis enzimática	<i>S. Cerevisiae</i> 30°C 48 h	11.99	0.4	[21]
Organosolv seguido de hidrólisis enzimática	<i>S. cerevisiae</i> 32°C 48 h	0.013	0.065	[17]
Molienda seguida de prensado	<i>S. cerevisiae</i>	18.3	0.42	[22]

La concentración final reportada va de 0.013 a 18.3 g/l mientras que la eficiencia de conversión va de 0.065 a 0.42 $\frac{g_{\text{etanol}}}{g_{\text{glucosa}}}$

3.2. Polifenoles

Se encontraron un total de 15 artículos publicados para la extracción de polifenoles, lo que lo vuelve el tema más estudiado de entre los cuatro investigados Tabla 2. Entre los métodos destaca en primer lugar la extracción sólido-líquido, que será abordada más adelante. En segundo lugar, queda el método USAE. Otros métodos también reportados, pero menos estudiados son, SC-CO₂, MAE, PEF y fermentación.

Tabla 2. Artículos revisados de extracción de polifenoles de pulpa de café

Método	Especificaciones operativas	Contenido total de polifenoles.	Ref.
USAE	-	164.9 mgGAE/L	[23]
ESL	Agua RSL 1:10 5.5 min 75 °C	12.4 gGAE/kg 128.3 mgGAE/l 9.7 g/kg	[23]
Extracción por fluido supercrítico	Dióxido de carbono asistido con etanol	0.76 mg GAE/ g	[24]
ESL	Agua t.a. 3h + 85 °C 15 min RSL 1:10	2.85 mg GAE /g	
ESL	Etanol 80% 24h RSL 1:10 t.a.	18 mg gAE/g	
Extracción por fluido supercrítico	Dióxido de carbono asistido con etanol	43.56 mgGAE/g	[25]
ESL	Agua RSL 1:24 65°C 120 min	75.96 mgGAE/g	
USAE	Glicol	9.29 mgGAE/g	[26]
ESL	RSL 1:22.22 25°C 24h Etanol 64.71%	7.19 mgGAE/g	
ESL	RSL 1:2-4 30 min HCl 1%	4.4 mgGAE/g	[27]
ESL	RSL 1:20 30 min 55.8°C 2.55 M NaOH	116.6 mgGAE/g	[28]
ESL	EtOH 90% RSL 1:20 60°C 30 min	3.84 mgGAE/g	[29]
USAE		41.16 mgGAE/g	[30]
Fermentación	<i>Penicilium purpurogenum</i>	170.31 mgGAE/g	[31]
+			
ESL	RSL 1:20 Acetona 80% 40°C 30 min		
Fermentación	<i>Actinomyces consortium</i>	1.2 mgGAE/ml	[32]
ESL	Etanol 80%	46.55 mgGAE/ml	[33]
USAE	Etanol 75%	30.75 a 39.26 mgGAE/L	[34]

	40 KHZ RSL 1:5 10 min		
Campo de pulsos eléctricos +		14.43 mg GAE/ g	[35]
MAE			
USAE		43.38 mg GAE/g	[36]
MAE		46.72 mg GAE/g	
ESL	Acetona 80% RSL 1:10 24h t.a.	1128.1 mg GAE /g	[37]
ESL	Etanol 80% RSL 1:10 24h t.a.	941.38 mgGAE/g	
ESL	Metanol 80% RSL 1:10 24h t.a.	1158.28 mg GAE/g	

Los solventes reportados son, agua, Etanol, NaOH, HCl, Metanol, Acetona y Glicol.

3.3. Ensilado

Se encontraron 3 artículos relacionados con la obtención de ensilado a partir de pulpa de café tal como se muestra en la tabla 3.

Tabla 3. Artículos reportados de la valorización de pulpa de café para la obtención de ensilado. Todos los valores están reportados en g/100g de muestra seca.

Método	PC	FDA	FDN	Cenizas
Fermentación en silo bolsa por 45 días [38]	13.05	37.97	49.85	6.97
Uso de microorganismos y 30 días de ensilado [39]	14	33.1	39.7	13.5
Ensilado a 120 días [40]	30.52	-	-	22.12

3.4. Pellets combustibles

Con respecto al aprovechamiento de pulpa de café para la elaboración de pellets combustibles dos artículos fueron encontrados (tabla 4). Por un lado [41] reportó la obtención de pellets hechos únicamente con pulpa de café. Por otra parte, [42] reporta la mezcla de pulpa de café con semillas de *Ricinus communis* y de *Jatropha curcas*.

Tabla 4. Artículos reportados de la valorización de pulpa de café para la obtención de pellets combustibles.

Materia prima	HHV (MJ/kg)	Cenizas (% m/m p.s.)	%H ₂ O (% m/m p.s.)	D (%)	Ref
100% pulpa de café	11.59	6.74	11.40	75.54	[41]
70% pulpa de café 30% <i>Jatropha curcas</i>	19	5.5	7.3	55	[42]
70% pulpa de café 30% <i>Ricinus communis</i>	19	7	7.8	55	[42]

4. Discusión

4.1. Bioetanol

Dentro de los estudios reportados el estudio con la peor eficiencia de conversión es el de [17] donde se empleó un sistema de organosolv como pretratamiento, el artículo en particular intenta producir etanol directamente de la fracción sólida de la Pulpa de café que es más abundante en compuestos lignocelulósicos, mismos que son de bajo aprovechamiento por las levaduras. Esto se ve reflejado en la baja concentración final de etanol.

Con respecto a los pretratamientos, a pesar de que los pretratamientos ácidos y alcalinos son los más abundantes y, en general son los más referidos en otras biomásas lignocelulósicas. Cabe destacar la molienda y el prensado que a pesar de ser más sencillas en su ejecución,

obtuvieron valores superiores de concentración final de etanol y de eficiencia de conversión, además de que no requieren de insumos químicos, lo que disminuye su impacto ambiental, así como su costo energético.

Por otro lado, también se reporta el uso de enzimas comerciales como pretratamiento de hidrólisis. Dicho pretratamiento tiene la desventaja de requerir condiciones específicas de acidez y temperatura para el correcto funcionamiento de la enzima, sin mencionar el costo de adquisición de la misma. En este sentido [20] intenta reemplazar el uso de una enzima por un microorganismo en fermentación, si bien se reporta como un método técnicamente viable, su valor es menor al reportado por [18] y [21] quienes sí emplearon una enzima en específico. Cabe mencionar que entra en discusión el costo beneficio de usar una enzima en comparación con un microorganismo, especialmente si la fermentación por el microorganismo se lleva a cabo en fermentación de estado sólido que es más menos demandante de recursos.

Por último, ninguno de los trabajos reporta la capacidad de convertir la totalidad de la pulpa de café en etanol, por lo que se intuye que una parte de la biomasa queda sin aprovechar volviéndose un tema que abordar y un área de oportunidad para la investigación.

4.2. Polifenoles

En general los reportes no destacan que un método sea mejor que otro, teniendo reportes de contenido de polifenoles totales muy variados.

En este apartado destaca el artículo de [37] que reporta los valores más altos de mg GAE /g de todos. Sin embargo, los valores reportados en este trabajo son de observar con detalle por superan casi por diez veces el valor reportado en los demás trabajos.

La extracción sólido-líquido es la más reportada de todas. Entre los reportes evaluados las modificaciones al método son: solvente empleado, temperatura, tiempo de residencia, relación soluto solvente y la presencia o ausencia de la agitación. Los solventes más empleados son agua y etanol 80%.

Debido a la influencia de los múltiples variables independientes anteriormente mencionadas, es posible obtener rendimientos semejantes de extracción de polifenoles empleando diferentes valores en las variables de operación. En este mismo

sentido los valores obtenidos por ESL son comparables con los obtenidos por otros trabajos empleando técnicas como extracción por fluido supercrítico, MAE o USAE, dichas técnicas requieren equipos más sofisticados, de mayor costo y con mayores complicaciones en la escalabilidad y al no presentar mejores rendimientos que el método ESL no se justifica su preferencia sobre este último.

En cuanto a los solventes empleados por ESL, es importante considerar que el uso de otros solventes además del agua tiene un implicaciones económicas por el costo de adquisición del solvente, implicaciones operacionales si se desea recuperar el mismo e implicaciones ambientales por la disposición e impacto ambiental del solvente.

Una de las desventajas más grandes del método ESL frente a otros es la gran demanda de agua. Por un lado el menor valor de RSL reportado es de 1:10, poniendo esto en perspectiva se requerirían 10 litros de agua por cada kilogramo de pulpa de café procesada. Por otro lado, los artículos reportan el uso de agua destilada, que es más costosa que el agua de llave. En este sentido hace falta realizar estudios realizando modificaciones que permitan el uso de solventes más económicos y accesibles como el agua de llave. Así mismo, realizar estudios de la recuperación y recirculación del solvente empleado en iteraciones del proceso también es un área de oportunidad, dicha información permitiría adoptar el método a escala industrial reduciendo el impacto ambiental del mismo. Desde una perspectiva ambiental, el siguiente paso para la extracción de polifenoles a partir del método de ESL, sería realizar nuevos trabajos de investigación que incorporen estudios de balance de energía y análisis de ciclo de vida.

En el apartado estadístico destaca el uso de los métodos un factor a la vez (OFAT por sus siglas en inglés) y método de superficie respuesta (RSM por sus siglas en inglés). En este sentido cabe destacar que el método OFAT corre el riesgo de caer en óptimos locales, cosa que es menos probable empleando el método RSM.

Al igual que la obtención de etanol, ninguno de los procesos de obtención de polifenoles reporta el aprovechamiento total de la biomasa, por lo que la valorización de la biomasa no aprovechada a partir de la extracción de polifenoles es un área de oportunidad para la investigación.

4.3. Producción de ensilado

Con respecto a los tres artículos relacionados con la

obtención de ensilado a partir de pulpa de café. Dados sus valores nutrimentales los autores de los artículos mencionan que su uso como complemento en la alimentación de animales de granja es altamente recomendada. Usar la pulpa de café ensilada como alimento también representa una ventaja económica ya que este producto generalmente es considerado un desecho, y el principal costo relacionado con la materia prima es el de su transporte.

Los artículos de este tópico no reportan porcentajes de eficiencia.

4.4. Pellets combustibles

Comparando los valores reportados por [41] con la norma ISO 17225-6 que se emplea para evaluar pellets combustibles elaborados con biomasa no leñosa, sus valores están por debajo de lo exigido incumpliendo en todas las propiedades reportadas. Se observa entonces que la pulpa de café como única materia prima para la elaboración de pellets combustibles es técnicamente inviable.

En el caso de [42] en ambos productos obtenidos el valor de poder calorífico mejoró, así como el valor de humedad logrando alcanzar los límites exigidos por la normativa de calidad. Sin embargo, la durabilidad empeora, este valor junto con el de contenido de cenizas siguen sin lograr alcanzar el límite exigido por las normas de calidad. Así mismo, al emplear otra materia prima para la elaboración de pellets combustibles surgen limitantes logísticas, con respecto a la abundancia y disponibilidad de los otros insumos, así como las potenciales complicaciones de captación y transporte de estas biomásas.

En este sentido existe la oportunidad de explorar otras estrategias para la obtención de pellets combustibles con mejores valores de calidad, como lo son el *blending*, la torrefacción y la pirólisis.

Por último, cabe mencionar que ninguno de los artículos reporta la eficiencia del proceso, lo que impide evaluar el balance de masas de este.

5. Conclusión

Con base en la literatura consultada se pueden destacar lo siguiente:

- La obtención de polifenoles a partir de pulpa de café es el tema más abordado en cuanto a la valorización de pulpa de café.

- Se ha reportado la obtención de polifenoles a partir de pulpa de café como técnicamente viable.
- Se ha reportado la biosíntesis de etanol a partir de pulpa de café como técnicamente viable.
- Se ha reportado el ensilado de pulpa de café como técnicamente viable.
- No se encontraron reportes de pulpa de café como una fuente viable para la obtención de pellets combustibles cuando se emplea como materia prima única.
- La valorización de la fracción no aprovechada durante la obtención de etanol es un área de oportunidad para el estudio científico.
- La valorización de la fracción no aprovechada durante la extracción de polifenoles es un área de oportunidad para el estudio científico.
- Estudios de la extracción de polifenoles con el método de ESL empleando agua de llave es un área de oportunidad.
- Realizar estudios de eficiencia de extracción de polifenoles por el método ESL con recirculación de solventes es un área de oportunidad.
- Desde el punto de vista ambiental, los estudios de extracción de polifenoles con balances de energía y análisis de ciclo de vida son también un área de oportunidad.
- Tanto los trabajos de investigación sobre ensilado como los de producción de pellets combustibles no reportan valores de eficiencia del proceso, incluir este valor en trabajos futuros ayudaría a complementar trabajos de esta índole.

Fuentes de financiamiento

Los autores agradecen a la Secretaría de Ciencias, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI) por los recursos otorgados bajo el programa de becas nacionales para estudios de posgrado. Agradecen también a la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Querétaro por la asignación de beca interna para estudios de posgrado. Así mismo agradecen a la SECIHTI en conjunción con el Laboratorio Nacional de Biocombustibles Sólidos (BIOENER) por los recursos otorgados bajo el programa de apoyos a laboratorios nacionales CONACYT.

Conflictos de interés

Los autores declaran que no existen conflictos de

interés.

Abreviaturas

Las siguientes abreviaturas se utilizan en este manuscrito:

USAE: Extracción asistida por ultrasonido, por sus siglas en inglés *ultrasonic assisted extraction*.

ESL: Extracción sólido líquido.

RSL: Relación sólido líquido.

MAE: Extracción asistida por microondas, por sus siglas en inglés *microwave assisted extraction*.

PC: Proteína cruda.

FDA: Fibra detergente ácida.

FDN: Fibra detergente neutra.

HHV: Poder calorífico superior.

6. Referencias bibliográficas

- [1] R. Alves, M. Oliveira, and S. Casal, "Coffee authenticity," in *Current topics on food authentication*, 2011, pp. 57–72.
- [2] J. E. M. Ferrão, "O café, a bebida negra dos sonhos claros," *Chaves Ferreira-Publicações S. A, Lisboa, Portugal*, 2009.
- [3] C. M. Galankis, Ed., *Handbook of Coffee Processing By-Products*. 2017.
- [4] International Coffee Organization, "COFFEE REPORT AND OUTLOOK," 2023.
- [5] M. Dias, M. M. Melo, R. F. Schwan, and C. F. Silva, "A new alternative use for coffee pulp from semi-dry process to β -glucosidase production by *Bacillus subtilis*," *Lett Appl Microbiol*, vol. 61, no. 6, pp. 588–595, Dec. 2015, doi: 10.1111/lam.12498.
- [6] P. Esquivel and V. M. Jiménez, "Functional properties of coffee and coffee by-products," *Food Research International*, vol. 46, no. 2, pp. 488–495, May 2012, doi: 10.1016/j.foodres.2011.05.028.
- [7] C. E. Hernandez, H. H. Chen, C. I. Chang, and T. C. Huang, "Direct lipase-catalyzed lipophilization of chlorogenic acid from coffee pulp in supercritical carbon dioxide," *Ind Crops Prod*, vol. 30, no. 3, pp. 359–365, Nov. 2009, doi: 10.1016/j.indcrop.2009.07.004.
- [8] P. S. Murthy and M. Madhava Naidu, "Sustainable management of coffee industry by-products and value addition - A review," *Resour Conserv Recycl*, vol. 66, pp. 45–58, Sep. 2012, doi: 10.1016/j.resconrec.2012.06.005.
- [9] S. Roussos *et al.*, "Biotechnological management of coffee pulp-isolation, screening, characterization, selection of caffeine-degrading fungi and natural microflora present in coffee pulp and husk," 1995.
- [10] M. T. Torres-Mancera *et al.*, "Biotransformation and improved enzymatic extraction of chlorogenic acid from coffee pulp by filamentous fungi," *Biotechnol Prog*, vol. 29, no. 2, pp. 337–345, Apr. 2013, doi: 10.1002/btpr.1696.
- [11] S. Hu, A. Gil-Ramírez, M. Martín-Trueba, V. Benítez, Y. Aguilera, and M. A. Martín-Cabrejas, "Valorization of coffee pulp as bioactive food ingredient by sustainable extraction methodologies," Jan. 01, 2023, *Elsevier B.V.* doi: 10.1016/j.crfs.2023.100475.
- [12] M. Hoseini, S. Cocco, C. Casucci, V. Cardelli, and G. Corti, "Coffee by-products derived resources. A review," May 01, 2021, *Elsevier Ltd.* doi: 10.1016/j.biombioe.2021.106009.
- [13] W. Penaloza, M. R. Molina, R. Gomez Brenes, and R. Bressani, "Solid-State Fermentation: an Alternative to Improve the Nutritive Value of Coffee Pulp," 1985. [Online]. Available: <https://journals.asm.org/journal/aem>
- [14] J. Ulloa Rojas, J. Verreth, J. van Weerd, and E. Huisman, "Effect of different chemical treatments on nutritional and antinutritional properties of coffee pulp," 2002.
- [15] B. F. Giannetti, Y. Ogura, S. H. Bonilla, and C. M. V. B. Almeida, "Accounting emergy flows to determine the best production model of a coffee plantation," *Energy Policy*, vol. 39, no. 11, pp. 7399–7407, Nov. 2011, doi: 10.1016/j.enpol.2011.09.005.
- [16] D. Salmones, G. Mata, and K. N. Waliszewski, "Comparative culturing of *Pleurotus* spp. on coffee pulp and wheat straw: Biomass production and substrate biodegradation," *Bioresour Technol*, vol. 96, no. 5, pp. 537–544, Mar. 2005, doi: 10.1016/j.biortech.2004.06.019.
- [17] A. H. Alabdallal *et al.*, "Bioethanol Production from Lignocellulosic Biomass Using *Aspergillus niger* and *Aspergillus flavus* Hydrolysis Enzymes through Immobilized *S. cerevisiae*," *Energies (Basel)*, vol. 16, no. 2, Jan. 2023, doi: 10.3390/en16020823.
- [18] D. V. Phuong, L. P. T. Quoc, P. Van Tan, and L. N. D. Duy, "Production of bioethanol from Robusta coffee pulp (*Coffea robusta* L.) in Vietnam," *Foods and Raw Materials*, vol. 7, no. 1, pp. 10–17, 2019, doi: 10.21603/2308-4057-2019-1-10-17.
- [19] M. Redi, A. Kefale, and A. Asfaw, "Potential of Bioethanol Production and Optimization Test from

- Agricultural Waste: The Case of Wet Coffee Processing Waste (Pulp) *INTERNATIONAL JOURNAL of RENEWABLE ENERGY RESEARCH* Ayele Kefale et al Potential of Bioethanol Production and Optimization Test from Agricultural Waste: The Case of Wet Coffee Processing Waste (Pulp)," 2012. [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/260310759>
- [20] H. Kousar, "Bioethanol Production Using *Aspergillus Niger* And *Saccharomyces Cerevisiae* From Coffee Pulp By Separate Hydrolysis And Fermentation Process," *INTERNATIONAL JOURNAL OF SCIENTIFIC & TECHNOLOGY RESEARCH*, vol. 9, p. 1, 2020, [Online]. Available: www.ijstr.org
- [21] E. G. T. Menezes *et al.*, "Optimization of alkaline pretreatment of coffee pulp for production of bioethanol," *Biotechnol Prog*, vol. 30, no. 2, pp. 451–462, 2014, doi: 10.1002/btpr.1856.
- [22] E. G. T. Menezes, J. R. Do Carmo, A. G. T. Menezes, J. G. L. F. Alves, C. J. Pimenta, and F. Queiroz, "Use of different extracts of coffee pulp for the production of bioethanol," *Appl Biochem Biotechnol*, vol. 169, no. 2, pp. 673–687, Jan. 2013, doi: 10.1007/s12010-012-0030-0.
- [23] J. A. Serna-Jiménez *et al.*, "Advanced extraction of caffeine and polyphenols from coffee pulp: Comparison of conventional and ultrasound-assisted methods," *LWT*, vol. 177, Mar. 2023, doi: 10.1016/j.lwt.2023.114571.
- [24] L. Q. Thai, C. Niwat, S. Qin, and N. Konsue, "Supercritical carbon dioxide and ethanol-assisted extraction of bioactive compounds from Bourbon, Catimor, and Caturra coffee pulp for maximized antioxidant and therapeutic properties," *Future Foods*, vol. 9, Jun. 2024, doi: 10.1016/j.fufo.2024.100381.
- [25] S. Hu *et al.*, "Tailored recovery of antioxidant fractions enriched in caffeine and phenolic compounds from coffee pulp using ethanol-modified supercritical carbon dioxide," *Food Research International*, vol. 200, Jan. 2025, doi: 10.1016/j.foodres.2024.115433.
- [26] H. Myo and N. Khat-udomkiri, "Optimization of ultrasound-assisted extraction of bioactive compounds from coffee pulp using propylene glycol as a solvent and their antioxidant activities," *Ultrason Sonochem*, vol. 89, Sep. 2022, doi: 10.1016/j.ultsonch.2022.106127.
- [27] S. R. Delgado, A. F. A. Arbelaez, and B. Rojano, "Antioxidant capacity, bioactive compounds in coffee pulp and implementation in the production of infusions," *Acta Sci Pol Technol Aliment*, vol. 18, no. 3, pp. 235–248, 2019, doi: 10.17306/J.AFS.2019.0663.
- [28] F. Correa-Mahecha, W. Murillo, J. E. Arturo-Calvache, D. M. Cuesta-Parra, M. A. B. Mayorga, and J. Sandoval, "Optimization of Liquid Polyphenol Extraction from Coffee Pulp," *Chem Eng Trans*, vol. 93, pp. 307–312, 2022, doi: 10.3303/CET2293052.
- [29] C. K. Pacheco-Martínez, G. Saucedo-Castañeda, L. V. Rodríguez-Durán, G. M. Trejo-Aguilar, and M. L. Pérez-Chabela, "THE POTENTIAL OF COFFEE (*COFFEA ARABICA* L.) PULP AND CACAO (*THEOBROMA CACAO* L.) HUSK AS A SOURCE OF PREBIOTICS, ANTIOXIDANTS, AND ANTIMICROBIAL COMPOUNDS," *Carpathian Journal of Food Science and Technology*, vol. 16, no. 3, pp. 79–89, 2024, doi: 10.34302/crpjfst/2024.16.3.7.
- [30] M. A. Q. Solano *et al.*, "Polyphenols from coffee (*Coffea arabica* L.) Shell and pulp extracted by ultrasound applying surface response methodology," *Carpathian Journal of Food Science and Technology*, vol. 2023, no. Specialissue, 2023, doi: 10.34302/SI/231.
- [31] L. R. P. García, C. R. Biasetto, A. R. Araujo, and V. L. del Bianchi, "Enhanced extraction of phenolic compounds from coffee industry's residues through solid state fermentation by *Penicillium purpurogenum*," *Food Science and Technology (Brazil)*, vol. 35, no. 4, pp. 704–711, Oct. 2015, doi: 10.1590/1678-457X.6834.
- [32] N. Kurniawati, A. Meryandini, and T. C. Sunarti, "Introduction of actinomycetes starter on coffee fruits fermentation to enhance quality of coffee pulp," 2016. [Online]. Available: <http://www.ejfa.me/>
- [33] J. H. On, B. M. Oh, H. H. Oh, D. Y. Jeong, and Y. S. Kim, "Effect of Solvent Fractionation and Lactic Acid Fermentation on Coffee Cherry Pulp Phenolic Compounds," *Journal of the Korean Society of Food Science and Nutrition*, vol. 52, no. 3, pp. 291–300, Mar. 2023, doi: 10.3746/jkfn.2023.52.3.291.
- [34] P. H. Le, L. T. T. Ho, D. H. T. Le, and V. Nguyen, "Purification of Coffee Polyphenols Extracted from Coffee Pulps (*Coffea arabica* L.) Using Aqueous Two-Phase System," *Molecules*, vol. 28, no. 15, Aug. 2023, doi: 10.3390/molecules28155922.
- [35] R. Macías-Garbett *et al.*, "Combined Pulsed Electric Field and Microwave-Assisted Extraction as a Green Method for the Recovery of Antioxidant Compounds with Electroactive Potential from

- Coffee Agro-Waste,” 2022, doi: 10.3390/plants.
- [36] T. M. K. Tran, T. O. Akanbi, T. Kirkman, M. H. Nguyen, and Q. Van Vuong, “Recovery of Phenolic Compounds and Antioxidants from Coffee Pulp (*Coffea canephora*) Waste Using Ultrasound and Microwave-Assisted Extraction,” *Processes*, vol. 10, no. 5, May 2022, doi: 10.3390/pr10051011.
- [37] M. Geremu, Y. B. Tola, and A. Sualeh, “Extraction and determination of total polyphenols and antioxidant capacity of red coffee (*Coffea arabica* L.) pulp of wet processing plants,” *Chemical and Biological Technologies in Agriculture*, vol. 3, no. 1, 2016, doi: 10.1186/s40538-016-0077-1.
- [38] D. F. Flórez-Delgado, “Effect of the fermentation time on the nutritional quality of *Coffea arabica* L. pulp silage,” *Ciencia Tecnología Agropecuaria*, vol. 21, no. 3, Jun. 2020, doi: 10.21930/RCTA.VOL21_NUM3_ART:1423.
- [39] K. Yonatan, D. Solomon, and T. Taye, “Chemical composition and in-vitro digestibility of coffee pulp ensiled with effective microorganism in Ethiopia,” *Livestock research for Rural Development*, vol. 23, no. 7, 2011.
- [40] A. Noriega Salazar, R. Silva Acuña, and M. García de Salcedo, “Revisión Utilización de la pulpa de café en la alimentación animal,” 2008.
- [41] R. Cubero-Abarca, R. Moya, J. Valaret, and M. Tomazello Filho, “USE OF COFFEE (*Coffea arabica*) PULP FOR THE PRODUCTION OF BRIQUETTES AND PELLETS FOR HEAT GENERATION Uso de pulpa de café (*Coffea arabica*) para a fabricação de briquetes e pellets para geração de calor,” 2014. [Online]. Available: <http://pelletics.com/>
- [42] E. Díaz-Jiménez and R. Moya, “The Effects of *Jatropha curcas* and *Ricinus communis* Seeds Addition on Coffee Pulp Waste Pellets as Fuel,” *Waste Biomass Valorization*, vol. 13, no. 6, pp. 3071–3084, Jun. 2022, doi: 10.1007/s12649-022-01701-4.

Indicadores generales de evaluación de proyectos de innovación de la UAQ en materia LGBTIQ+

General evaluation indicators for UAQ's LGBTIQ+ innovation projects

Tinoco-Navarro, Omar*

Doctorado en Innovación Tecnología y Hábitat

Universidad Autónoma de Querétaro

Querétaro, México

otinoco14@alumnos.uaq.mx; ORCID <https://orcid.org/0000-0001-8038-7003>

Resumen: Este trabajo tuvo como objetivo desarrollar los Indicadores Generales de Evaluación de Proyectos de Innovación en materia LGBTIQ+ de la Universidad Autónoma de Querétaro (UAQ). Se utilizaron 7 textos clave (5 internacionales, 1 latinoamericano y 1 nacional) versados en indicadores de inclusión LGBTIQ+. Se utilizó un método de cuatro fases: 1. Revisión de 5 textos clave elaborados por los organismos internacionales UNDP, UNHR, OCDE, UE. 2. Análisis comparativo de las categorías construidas a partir de los derechos LGBTIQ+. 3. Adaptación de los indicadores de inclusión al contexto universitario. Y 4. Validación conceptual y contextual con base en 2 textos clave elaborados por el organismo latinoamericano CIDH y el organismo mexicano INDESOL. El resultado fue el desarrollo de los Indicadores generales de evaluación de proyectos de innovación de la Universidad Autónoma de Querétaro en materia LGBTIQ+, agrupados en trece categorías que permiten la valoración integral del impacto de los proyectos de innovación universitaria en materia LGBTIQ+. Los Indicadores generales de evaluación de proyectos de innovación de la Universidad Autónoma de Querétaro en materia LGBTIQ+ representan una innovación ética, al redefinir la innovación universitaria como un proceso de inclusión y reparación institucional.

Palabras clave: INN, Indicadores, Evaluación, Proyecto, LGBTIQ+

Abstract: This study aimed to develop General Evaluation Indicators for LGBTIQ+ Innovation Projects at the Autonomous University of Querétaro (UAQ). Seven key texts (five international, one Latin American, and one national) on LGBTIQ+ inclusion indicators were used. A four-phase method was employed: 1. Review of five key texts developed by the international organizations UNDP, UNHR, OECD, and EU. 2. Comparative analysis of the categories constructed from LGBTIQ+ rights. 3. Adaptation of the inclusion indicators to the university context. 4. Conceptual and contextual validation based on two key texts developed by the Latin American organization CIDH and the Mexican organization INDESOL. The result was the development of General Evaluation Indicators for LGBTIQ+ Innovation Projects at the Autonomous University of Querétaro, grouped into twelve themes that allow for a comprehensive assessment of the impact of university innovation projects related to LGBTIQ+ issues. The General Indicators for the Evaluation of Innovation Projects of the Autonomous University of Querétaro in LGBTIQ+ represent an ethical innovation, by redefining university innovation as a process of inclusion and institutional repair.

Keywords: INN, Indicators, Evaluation, Project, LGBTIQ+

1. Introducción

Los marcos internacionales en materia de derechos humanos y políticas públicas han avanzado de manera significativa en la construcción de instrumentos que permitan medir la inclusión de la comunidad LGBTIQ+ en todos los ámbitos de la vida. Para lograr esta inclusión distintos Organismos han generado sistemas de indicadores de inclusión que pueden

ser comparables y adaptables a diferentes contextos. En América Latina, y de manera particular en México, se han desarrollado marcos analíticos que establecen los derechos LGBTIQ+ desde un enfoque situado, que permite reconocer los retos estructurales que enfrentan las instituciones públicas para incorporar a la comunidad LGBTIQ+ en sus políticas públicas y prácticas cotidianas. En este sentido destaca el desafío de trasladar los indicadores de inclusión internacionales, regionales y locales a las instituciones públicas de educación

superior de manera pertinente.

La Universidad Autónoma de Querétaro como institución pública comprometida con la sociedad, reconoce que la innovación no debe limitarse a los campos tecnológicos. Innovar también implica re imaginar el quehacer institucional, en especial los procesos de investigación que contribuyan a mejorar el hábitat y el habitar de la comunidad LGBTIQ+. En este sentido, el desarrollo de los Indicadores Generales de Evaluación de Proyectos de Innovación en materia LGBTIQ+ son una innovación en sí mismos, y constituyen una aportación dentro del sistema de educación superior pública mexicana, al situar los derechos de la comunidad LGBTIQ+ como indicadores para la evaluación de proyectos de innovación universitaria en materia LGBTIQ+. El desarrollo de Indicadores Generales de Evaluación de Proyectos de Innovación en materia LGBTIQ+ no solo son una herramienta para medir, sino también un instrumento para transformar la forma en que la universidad desarrolla sus proyectos de investigación.

En el contexto de la cuarta transformación de la vida pública de México, la Universidad Autónoma de Querétaro se enfrenta al reto de crear herramientas acordes con la ley general en materia de humanidades, ciencias, tecnologías e innovación y los Programas Nacionales Estratégicos (PRONACES) [1] y los Proyectos Nacionales de Investigación e Incidencia (PRONAI) de la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI) [2].

El desarrollo de Indicadores Generales de Evaluación de Proyectos de Innovación en materia LGBTIQ+ de la Universidad Autónoma de Querétaro responde a las necesidades generadas por los objetivos de los nuevos modelos de investigación mexicanos, pero también a los retos de la investigación en materia LGBTIQ+ que se está realizando en diferentes programas de posgrado de la Universidad Autónoma de Querétaro.

Estructura general del artículo.

El artículo está organizado en cinco secciones: En la primera sección Antecedentes se abordan los documentos internacionales,

regionales y nacionales que sustentaron el desarrollo de los Indicadores generales de evaluación de proyectos de innovación de la Universidad Autónoma de Querétaro en materia LGBTIQ+. En la segunda sección Método se describe el proceso seguido para el desarrollo de los Indicadores generales de evaluación de proyectos de innovación de la Universidad Autónoma de Querétaro en materia LGBTIQ+. En la tercera sección Resultados se presentan los Indicadores generales de evaluación de proyectos de innovación de la Universidad Autónoma de Querétaro en materia LGBTIQ+ organizados por: a) Alcance, b) Investigación y desarrollo del hábitat educativo, c) Generación de conocimiento, d) Desarrollo de planes de estudio, e) Inclusión universitaria, f) Libre asociación y libre expresión universitaria, g) Acceso a plazas universitarias y remuneración económica justa, h) Seguridad universitaria, i) Acceso a la justicia y respuesta institucional universitaria apropiada, j) Salud universitaria, k) Bienestar universitario, l) Percepción universitaria y m) I&D inclusiva. Estos indicadores operan como criterios de evaluación para observar de manera integral el impacto de los proyectos universitarios de innovación en materia LGBTIQ+ de la UAQ. En la cuarta sección Discusión se establece la pertinencia ética e institucional de los Indicadores generales de evaluación de proyectos de innovación de la Universidad Autónoma de Querétaro en materia LGBTIQ+. Y finalmente, en la quinta sección Conclusión se sintetizan los principales hallazgos, entre ellos el planteamiento de los Indicadores generales de evaluación de proyectos de innovación de la Universidad Autónoma de Querétaro en materia LGBTIQ+ como una herramienta replicable en otras instituciones públicas de educación superior.

Antecedentes

Durante las dos últimas décadas, el Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (UNDP), el Alto Comisionado de las Naciones Unidas para los Derechos Humanos (UNHR), la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (OCDE) y la Unión Europea (UE) han generado políticas públicas que establecen un marco analítico para diversos instrumentos de evaluación cuyo objetivo es medir la inclusión plena de la comunidad LGBTIQ+ en todos los aspectos de la vida. Entre los documentos internacionales más relevantes destacan:

1. A set of proposed indicators for the LGBTI inclusion index report on the pilot implementation [3].

2. A set of proposed indicators for the LGBTI inclusion index [4].

3. Born free and equal. Sexual orientation, gender identity and sex characteristics in international human right law [5].

4. Society at a Glance 2019. OECD social indicators [6].

5. Communication from the commission to the European parliament, the council, the European economic and social committee and the committee of the regions. Union of Equality: LGBTIQ+ Equality Strategy 2026-2030 [7].

En América Latina la Comisión Interamericana de Derechos Humanos (CIDH) y en México el Instituto Nacional de Desarrollo Social (INDESOL), han contribuido en la compaginación de las distintas estrategias de política pública y marcos analíticos internacionales con las estrategias de política pública latinoamericanas y mexicanas para establecer un marco de derechos LGBTIQ+. De entre varios documentos regionales y locales destacan:

6. Avances y desafíos hacia el reconocimiento de los derechos de las personas LGBTI en las Américas [8]

7. Derechos de las personas LGBTI en la política pública [9].

Ambos documentos señalan la necesidad de transferir la perspectiva de diversidad sexo-genérica en las instituciones públicas, incluyendo las educativas, donde persisten distintas brechas estructurales de acceso, representación, bienestar y generación de conocimiento.

8. Métodos

Para desarrollar los Indicadores generales de evaluación de proyectos de innovación de la Universidad Autónoma de Querétaro en materia LGBTIQ+ se utilizaron como referencia los siguientes documentos:

1. A set of proposed indicators for the LGBTI inclusion index report on the pilot implementation (UNDP, 2024).

2. A set of proposed indicators for the LGBTI inclusion index (UNDP, 2019).

3. Born free and equal. Sexual orientation, gender identity and sex characteristics in international human right law (UNHR, 2019).

4. Society at a Glance 2019. OECD social indicators (OECD, 2019).

5. Communication from the commission to the European parliament, the council, the European economic and social committee and the committee of the regions. Union of Equality: LGBTIQ+ Equality Strategy 2026-2030 (UE, 2025).

6. Avances y Desafíos hacia el reconocimiento de los derechos de las personas LGBTI en las Américas (CDIH, 2018).

7. Derechos de las personas LBGTI en la política pública (INDESOL, 2018).

El método utilizado tuvo 4 fases:

1. Revisión documental.

Se identificaron siete documentos clave, 5 documentos elaborados por organismos internacionales (UNDP, UNHR, OCDE, UE), 1 documento elaborado por un organismo latinoamericano (CIDH), y un documento elaborado por un organismo nacional (INDESOL). Estos documentos proporcionaron marcos de derechos y de política pública en materia de inclusión de la comunidad LGBTIQ+ en todos los aspectos de la vida.

2. Análisis comparativo.

A partir de los documentos A set of proposed indicators for the LGBTI inclusion index report on the pilot implementation (UNDP, 2024) y A set of proposed indicators for the LGBTI inclusion index (UNDP, 2019) se establecieron categorías comunes de evaluación: a) Alcance, b) Investigación y desarrollo del hábitat educativo, c) Generación de conocimiento, d) Desarrollo de planes de estudio, e) Inclusión universitaria, f) Libre asociación y libre expresión universitaria, g) Acceso a plazas universitarias y remuneración económica justa, h)

Seguridad universitaria, i) Acceso a la justicia y respuesta institucional universitaria apropiada, j) Salud universitaria, k) Bienestar universitario, l) Percepción universitaria y m) I&D inclusiva. Dichas categorías fueron contrastadas con las estrategias de Equality Strategy 2026-2030 (UE, 2025) y con indicadores sociales de Society at a Glance 2019. (OECD, 2019).

3. Adaptación al contexto universitario.

Con base en el análisis de los documentos seleccionados:

- A) Se identificaron los indicadores de inclusión más pertinentes para el ámbito universitario, considerando características particulares institucionales de la Universidad Autónoma de Querétaro.
- B) Se establecieron indicadores generales para evaluar la inclusión LGBTIQ+ en proyectos de innovación universitaria.

4. Validación conceptual y contextual.

Finalmente, los indicadores de inclusión fueron revisados desde el enfoque latinoamericanos con base en el documento Avances y Desafíos hacia el reconocimiento de los derechos de las personas LGBTI en las Américas (CDIH, 2018). Y a su vez desde el enfoque mexicano a partir del documento Avances y Derechos de las personas LBGTI en la política pública (INDESOL, 2018).

En conjunto, este proceso permitió construir una serie de Indicadores generales de evaluación de proyectos de innovación de la Universidad Autónoma de Querétaro en materia LGBTIQ+, aplicables, comparables y alineados a las metas internacionales y regionales y nacionales.

9. Resultados

A continuación, se presentan los Indicadores generales de evaluación de proyectos de innovación de la Universidad Autónoma de Querétaro en materia LGBTIQ+ divididos en 13 categorías:

- a) Alcance (Ver tabla 1).
- b) Investigación y desarrollo del hábitat educativo (Ver tabla 2).
- c) Generación de conocimiento (Ver tabla 3).
- d) Desarrollo de planes de estudio (Ver tabla 4).

- e) Inclusión universitaria (Ver tabla 5).
- f) Libre asociación y libre expresión universitaria (Ver tabla 6).
- g) Acceso a plazas universitarias y remuneración económica justa (Ver tabla 7).
- h) Seguridad universitaria (Ver tabla 8).
- i) Acceso a la justicia y respuesta institucional universitaria apropiada (Ver tabla 9).
- j) Salud universitaria (Ver tabla 10).
- k) Bienestar universitario (Ver tabla 11).
- l) Percepción universitaria (Ver tabla 12).
- m) I&D inclusiva (Ver tabla 13).

Tabla 1. Indicadores de Alcance.

#	Indicador	Valor
1	El proyecto de innovación está dirigido a estudiantes Lesbianas	1
2	El proyecto de innovación está dirigido a estudiantes Gays	1
3	El proyecto de innovación está dirigido a estudiantes Bisexuales	1
4	El proyecto de innovación está dirigido a estudiantes Transgénero	1
5	El proyecto de innovación está dirigido a estudiantes Intersexuales	1
6	El proyecto de innovación está dirigido a estudiantes Queer	1
7	El proyecto de innovación está dirigido a estudiantes +	1
8	El proyecto de innovación está dirigido a estudiantes LGBTIQ+	7

Tabla 2. Indicadores sobre I&D del hábitat educativo universitario.

#	Indicador	Valor
1	El proyecto de innovación comprende I&D del hábitat educativo universitario para estudiantes Lesbianas	1
2	El proyecto de innovación comprende I&D del hábitat educativo universitario para estudiantes Gays	1
3	El proyecto de innovación comprende I&D del hábitat educativo universitario para estudiantes Bisexuales	1
4	El proyecto de innovación comprende I&D del hábitat educativo universitario para estudiantes Transgénero	1
5	El proyecto de innovación está dirigido a estudiantes Intersexuales	1

6	El proyecto de innovación comprende I&D del hábitat educativo universitario para estudiantes Queer	1
7	El proyecto de innovación comprende I&D del hábitat educativo universitario para estudiantes +	1
8	El proyecto de innovación comprende I&D del hábitat educativo universitario para LGBTIQ+	7

Tabla 3. Indicadores de generación de conocimiento.

#	Indicador	Valor
1	El proyecto de innovación comprende I&D de conocimiento sobre estudiantes Lesbianas	1
2	El proyecto de innovación comprende I&D de conocimiento sobre estudiantes Gays	1
3	El proyecto de innovación comprende I&D de conocimiento sobre estudiantes Bisexuales	1
4	El proyecto de innovación comprende I&D de conocimiento sobre estudiantes Transgénero	1
5	El proyecto de innovación comprende I&D de conocimiento sobre estudiantes Intersexuales	1
6	El proyecto de innovación comprende I&D de conocimiento sobre estudiantes Queer	1
7	El proyecto de innovación comprende I&D de conocimiento sobre estudiantes +	1
8	El proyecto de innovación comprende I&D de conocimiento sobre LGBTIQ+	7

Tabla 4. Indicadores de desarrollo de planes de estudios.

#	Indicador	Valor
1	El proyecto de innovación comprende I&D de materias de género para un programa	2

2	El proyecto de innovación comprende la integración de materias de género a un programa educativo universitario específico	1
3	El proyecto de innovación comprende I&D de materias de género para programas educativos universitarios con tronco común	2
4	El proyecto de innovación comprende la integración de materias de género para programas educativos universitarios con tronco común	1

Tabla 5. Indicadores de inclusión en la vida universitaria.

#	Indicador	Valor
1	El proyecto de innovación comprende I&D de iniciativas para asegurar la inclusión de estudiantes Lesbianas en todos los aspectos de la vida universitaria	1
2	El proyecto de innovación comprende I&D de iniciativas para asegurar la inclusión de estudiantes Gays en todos los aspectos de la vida universitaria	1
3	El proyecto de innovación comprende I&D de iniciativas para asegurar la inclusión de estudiantes Bisexuales en todos los aspectos de la vida universitaria	1
4	El proyecto de innovación comprende I&D de iniciativas para asegurar la inclusión de estudiantes Transgénero en todos los aspectos de la vida universitaria	1
5	El proyecto de innovación comprende I&D de iniciativas para asegurar la inclusión de estudiantes Intersexuales en todos los aspectos de la vida universitaria	1
6	El proyecto de innovación comprende I&D de iniciativas para asegurar la inclusión de estudiantes Queer en todos los aspectos de la vida universitaria	1
7	El proyecto de innovación comprende I&D de iniciativas para asegurar la inclusión de estudiantes + en todos los aspectos de la vida universitaria	1

- 8 El proyecto de innovación comprende I&D de iniciativas para asegurar la inclusión de estudiantes LGBTIQ+ en todos los aspectos de la vida universitaria 7

Tabla 6. Indicadores de libre asociación y libre expresión universitaria.

#	Indicador	Valor
1	El proyecto de innovación comprende I&D de iniciativas para asegurar la libre asociación y libre expresión de estudiantes Lesbianas	1
2	El proyecto de innovación comprende I&D de iniciativas para asegurar la libre asociación y libre expresión de estudiantes Gays	1
3	El proyecto de innovación comprende I&D de iniciativas para asegurar la libre asociación y libre expresión de estudiantes Bisexuales	1
4	El proyecto de innovación comprende I&D de iniciativas para asegurar la libre asociación y libre expresión de estudiantes Transgénero	1
5	El proyecto de innovación comprende I&D de iniciativas para asegurar la libre asociación y libre expresión de estudiantes Intersexuales	1
6	El proyecto de innovación comprende I&D de iniciativas para asegurar la libre asociación y libre expresión de estudiantes Queer	1
7	El proyecto de innovación comprende I&D de iniciativas para asegurar la libre asociación y libre expresión de estudiantes +	1
8	El proyecto de innovación comprende I&D de iniciativas para asegurar la libre asociación y libre expresión de estudiantes LGBTIQ+	7

Tabla 7. Indicadores de acceso a plazas universitarias y remuneración económica justa.

#	Indicador	Valor
1	El proyecto de innovación	1

- comprende I&D de iniciativas para asegurar el acceso a plazas universitarias y remuneración económica justa de estudiantes egresadas Lesbianas 1
- 2 El proyecto de innovación comprende I&D de iniciativas para asegurar el acceso a plazas universitarias y remuneración económica justa de estudiantes egresados Gays 1
- 3 El proyecto de innovación comprende I&D de iniciativas para asegurar el acceso a plazas universitarias y remuneración económica justa de estudiantes egresados Bisexuales 1
- 4 El proyecto de innovación comprende I&D de iniciativas para asegurar el acceso a plazas universitarias y remuneración económica justa de estudiantes egresados Transgénero 1
- 5 El proyecto de innovación comprende I&D de iniciativas para asegurar el acceso a plazas universitarias y remuneración económica justa de estudiantes egresados Intersexuales 1
- 6 El proyecto de innovación comprende I&D de iniciativas para asegurar el acceso a plazas universitarias y remuneración económica justa de estudiantes egresados Queer 1
- 7 El proyecto de innovación comprende I&D de iniciativas para asegurar el acceso a plazas universitarias y remuneración económica justa de estudiantes egresados + 1
- 8 El proyecto de innovación comprende I&D de iniciativas para asegurar el acceso a plazas universitarias y remuneración económica justa de estudiantes egresados LGBTIQ+ 7

Tabla 8. Indicadores de seguridad universitaria.

#	Indicador	Valor
1	El proyecto de innovación comprende I&D de iniciativas para garantizar la integridad física y psicológica de estudiantes	1

Lesbianas dentro del espacio universitario			universitario		
2	El proyecto de innovación comprende I&D de iniciativas para garantizar la integridad física y psicológica de estudiantes Gays dentro del espacio universitario	1	2	El proyecto de innovación comprende I&D de iniciativas para asegurar el acceso a la justicia y respuesta institucional apropiada en casos de cualquier forma de violencia hacia estudiantes Gays dentro del espacio universitario	1
3	El proyecto de innovación comprende I&D de iniciativas para garantizar la integridad física y psicológica de estudiantes Bisexuales dentro del espacio universitario	1	3	El proyecto de innovación comprende I&D de iniciativas para asegurar el acceso a la justicia y respuesta institucional apropiada en casos de cualquier forma de violencia hacia estudiantes Bisexuales dentro del espacio universitario	1
4	El proyecto de innovación comprende I&D de iniciativas para garantizar la integridad física y psicológica de estudiantes Transgénero dentro del espacio universitario	1	4	El proyecto de innovación comprende I&D de iniciativas para asegurar el acceso a la justicia y respuesta institucional apropiada en casos de cualquier forma de violencia hacia estudiantes Transgénero dentro del espacio universitario	1
5	El proyecto de innovación comprende I&D de iniciativas para garantizar la integridad física y psicológica de estudiantes Intersexuales dentro del espacio universitario	1	5	El proyecto de innovación comprende I&D de iniciativas para asegurar el acceso a la justicia y respuesta institucional apropiada en casos de cualquier forma de violencia hacia estudiantes Intersexuales dentro del espacio universitario	1
6	El proyecto de innovación comprende I&D de iniciativas para garantizar la integridad física y psicológica de estudiantes Queer dentro del espacio universitario	1	6	El proyecto de innovación comprende I&D de iniciativas para asegurar el acceso a la justicia y respuesta institucional apropiada en casos de cualquier forma de violencia hacia estudiantes Queer dentro del espacio universitario	1
7	El proyecto de innovación comprende I&D de iniciativas para garantizar la integridad física y psicológica de estudiantes + dentro del espacio universitario	1	7	El proyecto de innovación comprende I&D de iniciativas para asegurar el acceso a la justicia y	1
8	El proyecto de innovación comprende I&D de iniciativas para garantizar la integridad física y psicológica de estudiantes LGBTIQ+ dentro del espacio universitario	7			

Tabla 9. Indicadores de acceso a la justicia y respuesta institucional universitaria.

#	Indicador	Valor
1	El proyecto de innovación comprende I&D de iniciativas para asegurar el acceso a la justicia y respuesta institucional apropiada en casos de cualquier forma de violencia hacia estudiantes Lesbianas dentro del espacio	1

	respuesta institucional apropiada en casos de cualquier forma de violencia hacia estudiantes + dentro del espacio universitario	
8	El proyecto de innovación comprende I&D de iniciativas para asegurar el acceso a la justicia y respuesta institucional apropiada en casos de cualquier forma de violencia hacia estudiantes LGBTIQ+ dentro del espacio universitario	7

	comprende I&D de iniciativas para garantizar el bienestar de estudiantes Lesbianas dentro del espacio universitario	
2	El proyecto de innovación comprende I&D de iniciativas para garantizar el bienestar de estudiantes Gays dentro del espacio universitario	1
3	El proyecto de innovación comprende I&D de iniciativas para garantizar el bienestar de estudiantes Bisexuales dentro del espacio universitario	1
4	El proyecto de innovación comprende I&D de iniciativas para garantizar el bienestar de estudiantes Transgénero dentro del espacio universitario	1
5	El proyecto de innovación comprende I&D de iniciativas para garantizar el bienestar de estudiantes Intersexuales dentro del espacio universitario	1
6	El proyecto de innovación comprende I&D de iniciativas para garantizar el bienestar de estudiantes Queer dentro del espacio universitario	1
7	El proyecto de innovación comprende I&D de iniciativas para garantizar el bienestar de estudiantes + dentro del espacio universitario	1
8	El proyecto de innovación comprende I&D de iniciativas para garantizar el bienestar de estudiantes LGBTIQ+ dentro del espacio universitario	7

Tabla 10. Indicadores de Salud universitaria.

#	Indicador	Valor
1	El proyecto de innovación comprende I&D de iniciativas para garantizar el acceso a la salud de estudiantes Lesbianas	1
2	El proyecto de innovación comprende I&D de iniciativas para garantizar el acceso a la salud de estudiantes Gays	1
3	El proyecto de innovación comprende I&D de iniciativas para garantizar el acceso a la salud de estudiantes Bisexuales	1
4	El proyecto de innovación comprende I&D de iniciativas para garantizar el acceso a la salud de estudiantes Transgénero	1
5	El proyecto de innovación comprende I&D de iniciativas para garantizar el acceso a la salud de estudiantes Intersexuales	1
6	El proyecto de innovación comprende I&D de iniciativas para garantizar el acceso a la salud de estudiantes Queer	1
7	El proyecto de innovación comprende I&D de iniciativas para garantizar el acceso a la salud de estudiantes +	1
8	El proyecto de innovación comprende I&D de iniciativas para garantizar el acceso a la salud de estudiantes LGBTIQ+	7

Tabla 11. Indicadores de bienestar universitario.

#	Indicador	Valor
1	El proyecto de innovación	1

Tabla 12. Indicadores de percepción universitaria.

#	Indicador	Valor
1	El proyecto de innovación comprende I&D de iniciativas para cambiar la percepción universitaria sobre estudiantes Lesbianas	1
2	El proyecto de innovación comprende I&D de iniciativas para cambiar la percepción universitaria sobre estudiantes Gays	1
3	El proyecto de innovación comprende I&D de iniciativas para cambiar la percepción universitaria sobre estudiantes Bisexuales	1

4	El proyecto de innovación comprende I&D de iniciativas para cambiar la percepción universitaria sobre estudiantes Transgénero	1
5	El proyecto de innovación comprende I&D de iniciativas para cambiar la percepción universitaria sobre estudiantes Intersexuales	1
6	El proyecto de innovación comprende I&D de iniciativas para cambiar la percepción universitaria sobre estudiantes Queer	1
7	El proyecto de innovación comprende I&D de iniciativas para cambiar la percepción universitaria sobre estudiantes +	1
8	El proyecto de innovación comprende I&D de iniciativas para cambiar la percepción universitaria sobre estudiantes LGBTIQ+	7

Tabla 13. Indicadores de I&D inclusiva.

#	Indicador	Valor
1	El proyecto de innovación comprende I&D con investigadores o estudiantes Lesbianas	1
2	El proyecto de innovación comprende I&D con investigadores o estudiantes Gays	1
3	El proyecto de innovación comprende I&D con investigadores o estudiantes Bisexuales	1
4	El proyecto de innovación comprende I&D con investigadores o estudiantes Transgénero	1
5	El proyecto de innovación comprende I&D con investigadores o estudiantes Intersexuales	1
6	El proyecto de innovación comprende I&D con investigadores o estudiantes Queer	1
7	El proyecto de innovación comprende I&D con investigadores o estudiantes	1
8	El proyecto de innovación comprende I&D con investigadores o estudiantes LGBTIQ+	7

10. Discusión

El desarrollo de los Indicadores Generales de Evaluación de Proyectos de Innovación en materia LGBTIQ+ en la Universidad Autónoma de Querétaro representa un paso decisivo hacia la manera en que la universidad produce conocimiento y genera políticas institucionales incluyendo a su comunidad LGBTIQ+. En el contexto de la cuarta transformación de la vida pública de México, este ejercicio no sólo responde a una demanda nacional, sino a una exigencia ética: El reconocimiento de la innovación universitaria en materia LGBTIQ+. Los indicadores desarrollados funcionan como una herramienta de planeación, evaluación y guía de acción universitaria para al bienestar de la comunidad LGBTIQ+ de la Universidad Autónoma de Querétaro.

La pertinencia de estos indicadores radica en la transformación de las maneras de hacer ciencia mexicana. Esta transformación en las formas de generar y aplicar conocimiento comienza cuando la Ley General en Materia de Humanidades, Ciencias, Tecnologías e Innovación, en los Programas Nacionales Estratégicos (PRONACES) y en los Proyectos Nacionales de Investigación e Incidencia (PRONAI) de la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI) colocan a la investigación al servicio del pueblo de México. Bajo este horizonte, la innovación universitaria en materia LGBTIQ+ debe articularse al servicio de sus estudiantes LGBTIQ+. En este sentido, el desarrollo de los Indicadores Generales de Evaluación de Proyectos de Innovación en materia LGBTIQ+ de la Universidad Autónoma de Querétaro constituye una forma de reparación ética al plantear que el conocimiento producido desde y para su comunidad LGBTIQ+ es necesario para la construcción de una institución que educa en la diversidad.

Los Indicadores Generales de Evaluación de Proyectos de Innovación en materia LGBTIQ+ de la Universidad Autónoma de Querétaro permitirán medir el alcance de sus proyectos de innovación en materia LGBTIQ+ a través de las siguientes categorías: a) Alcance, b) Investigación y desarrollo del hábitat educativo, c) Generación de conocimiento, d) Desarrollo de planes de estudio, e) Inclusión universitaria, f) Libre asociación y libre expresión universitaria, g) Acceso a plazas universitarias y remuneración económica justa, h) Seguridad universitaria, i) Acceso a la justicia y respuesta institucional universitaria apropiada, j) Salud universitaria, k) Bienestar universitario, l) Percepción universitaria y m) I&D inclusiva. Estas categorías

generales reflejan una comprensión integral de las dimensiones de inclusión de la comunidad LGBTIQ+ dentro del espacio universitario. La inclusión de la comunidad LGBTIQ+ enriquece a la universidad en la medida en que la universidad utiliza el conocimiento generado por la comunidad LGBTIQ+. Así, la innovación LGBTIQ+ no se concibe como una serie de categorías, sino como condiciones transversales para el ejercicio prospectivo de una universidad comprometida con su comunidad LGBTIQ+.

Los Indicadores Generales de Evaluación de Proyectos de Innovación en materia LGBTIQ+ de la Universidad Autónoma de Querétaro están dirigidos a la mejora de la vida universitaria, pero también ofrecen la posibilidad de medir la innovación universitaria desde otros criterios éticos. Es decir, los indicadores desarrollados siempre estarán en proceso de innovación, según las necesidades de la evolución o creación de los programas educativos de la UAQ o cambios sociales nacionales o locales. Esto dará parte a nuevos indicadores de inclusión en materia LGBTIQ+, contruidos desde todos los frentes universitarios.

La relevancia de un proyecto de innovación universitaria en materia LGBTIQ+ radica en el reconocimiento de las distintas tonalidades del género humano. Los Indicadores Generales de Evaluación de Proyectos de Innovación en materia LGBTIQ+ de la Universidad Autónoma de Querétaro reconfiguran el imaginario de la innovación, ya no se trata únicamente de crear nuevos productos o procesos, sino de transformar el habitar LGBTIQ+ dentro del espacio universitario.

Los Indicadores Generales de Evaluación de Proyectos de Innovación en materia LGBTIQ+ de la Universidad Autónoma de Querétaro devienen de un diálogo entre lo internacional, lo regional y lo local. Proviene de la adaptación de los indicadores de inclusión LGBTIQ+ internacionales al contexto latinoamericano y mexicano. Esta herramienta situada permite que la Universidad Autónoma de Querétaro, como institución pública innovadora genere proyectos de investigación acordes con la realidad de su comunidad LGBTIQ+.

Los Indicadores Generales de Evaluación de Proyectos de Innovación en materia LGBTIQ+ de la Universidad Autónoma de Querétaro invitan a que

la comunidad académica en su conjunto participe en la innovación en materia LGBTIQ+. La innovación en materia LGBTIQ+ no sólo se da en programas de género específicos, debe permear la investigación, docencia y extensión universitaria de todos los programas educativos de la universidad. Incorporar los Indicadores Generales de Evaluación de Proyectos de Innovación en materia LGBTIQ+ de la Universidad Autónoma de Querétaro en todos sus programas educativos implica reconocer que cada facultad puede generar innovación en materia LGBTIQ+. De esta manera la Universidad Autónoma de Querétaro será punta de lanza en la generación de conocimiento en materia LGBTIQ+.

Es necesario comentar que la innovación en materia LGBTIQ+ implica generar o redistribuir recursos. Por este motivo, los Indicadores Generales de Evaluación de Proyectos de Innovación en materia LGBTIQ+ de la Universidad Autónoma de Querétaro pueden ser también una herramienta institucional, permitiendo traducir demandas LGBTIQ+ en métricas de calidad reconocidas por la dirección universitaria.

Sin embargo, es necesario advertir de los riesgos del hacer institucional. Los Indicadores Generales de Evaluación de Proyectos de Innovación en materia LGBTIQ+ de la Universidad Autónoma de Querétaro pueden derivar en un procedimiento formal de llenado de casillas de un formulario de evaluación. Para evitarlo, Los Indicadores Generales de Evaluación de Proyectos de Innovación en materia LGBTIQ+ deben acompañarse de procesos de formación y monitoreo continuo que aseguren una apropiación ética.

11. Conclusión

Los Indicadores Generales de Evaluación de Proyectos de Innovación en materia LGBTIQ+ de la Universidad Autónoma de Querétaro constituyen un avance en la forma en que la educación superior pública mexicana genera conocimiento. La innovación desde la comunidad universitaria LGBTIQ+ proporciona otras maneras de mirar y abordar los proyectos de investigación.

La abstracción de los derechos LGBTIQ+ en prácticas universitarias concretas que pueden ser observadas, medidas y mejoradas es uno de los mayores retos que tiene este trabajo. Los Indicadores Generales de Evaluación de Proyectos de Innovación en materia LGBTIQ+ de la Universidad Autónoma de Querétaro constituyen un cambio de paradigma en la forma de comprender la innovación universitaria. Esta resignificación entrelaza los principios institucionales de

la Universidad Autónoma de Querétaro con los criterios de la Ley General en Materia de Humanidades, Ciencias, Tecnologías e Innovación y sienta las bases para la generación universitaria de conocimiento en materia LGBTIQ+.

En este contexto, la innovación en materia LGBTIQ+ conlleva una dimensión reparadora: integrar a los proyectos de investigación las perspectivas de la comunidad LGBTIQ+ que antes eran omitidas. En este sentido los Indicadores Generales de Evaluación de Proyectos de Innovación en materia LGBTIQ+ de la Universidad Autónoma de Querétaro son herramienta reparadora que permite el ejercicio prospectivo institucional: imaginar una universidad donde la comunidad LGBTIQ+ sea fuente innovadora para producir conocimiento.

Fuentes de financiamiento

Los autores agradecen al Consejo Nacional de Humanidades Ciencia y Tecnología (CONAHCYT), a la Universidad Autónoma de Querétaro (UAQ), a la Facultad de Ingeniería (FI-UAQ) y a la División de Investigación y Posgrado de la FI-UAQ por las becas otorgadas.

Conflictos de interés

Los autores declaran que no existen conflictos de interés.

Abreviaturas utilizadas:

LGBTIQ+: Lesbiana, Gay, Bisexual, Transgénero, Intersexual, Queer y Otros.

PRONACES: Programas Nacionales Estratégico. **PRONAI:** Proyectos Nacionales de Investigación e Incidencia.

SECIHTI: Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación.

UNDP: Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo.

UNHR: Naciones Unidas para los Derechos Humanos. **OCDE:** la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico.

UE: Unión Europea.

CIDH: Comisión Interamericana de Derechos Humanos.

INDESOL: Instituto Nacional de Desarrollo Social.

12. Referencias bibliográficas

- [1] Ley general en materia de humanidades, ciencias, tecnologías e innovación. (2023). Diario Oficial de la Federación 8 de mayo de 2023. México.
- [2] Lineamientos para la operación de los programas nacionales estratégicos. (2021). Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología. <https://www.siicyt.gob.mx/index.php/normatividad/conacyt-normatividad/programas-vigentes-normatividad/lineamientos/lineamientos-para-la-operacion-de-los-programas-nacionales-estrategicos/4963-lineamientos-para-la-operacion-de-los-programas-nacionales-estrategicos/file>
- [3] A set of proposed indicators for the LGBTI inclusion index report on the pilot implementation. UNDP. 2024.
- [4] A set of proposed indicators for the LGBTI inclusion index. UNDP. 2019.
- [5] Born free and equal. Sexual orientation, gender identity and sex characteristics in international human right law. UNHR. 2019.
- [6] Society at a Glance 2019. OECD social indicators. OECD 2019.
- [7] Communication from the commission to the European parliament, the council, the European economic and social committee and the committee of the regions. Union of Equality: LGBTIQ+ Equality Strategy 2026-2030. UE. 2025.
- [8] Avances y Desafíos hacia el reconocimiento de los derechos de las personas LGBTI en las Américas. CDIH 2018.
- [9] Derechos de las personas LBGTI en la política pública. INDESOL. 2018.

Articulaciones críticas entre teoría *queer*, espacialidad y enfoques interseccionales-decoloniales en la arquitectura

Critical Articulations between *Queer* Theory, Spatiality, and Intersectional-Decolonial Approaches in Architecture

Hernández Montes, Luis Daniel y Loredo Cansino, Reina

Maestría en Arquitectura, Facultad de Ingeniería

Universidad Autónoma de Querétaro

Querétaro, México

ld.hernandezmontes@gmail.com reina.loredo@uaq.mx

Resumen: El artículo presenta una revisión crítica, de tipo comparativo-conceptual, orientada a articular tres bloques teóricos: teoría *queer* y de género, estudios arquitectónicos y de la espacialidad, y enfoques interseccionales-decoloniales. El objetivo es analizar cómo estos marcos se relacionan y qué aportes ofrecen al pensamiento arquitectónico contemporáneo. La metodología consistió en la recopilación y sistematización de libros y artículos especializados, organizados en una matriz que permitió reconocer patrones, tensiones y vacíos. Los resultados muestran que los cruces entre los tres bloques configuran un campo de pensamiento emergente: el diálogo *queer*-espacialidad desplaza la atención de la forma al uso y a la corporalidad; el cruce espacialidad-decolonialidad visibiliza jerarquías epistémicas y plantea nuevas pedagogías del diseño; y las articulaciones triádicas consolidan criterios para prácticas situadas y éticas del habitar. Se evidencia además la creciente incidencia de las producciones latinoamericanas en la redefinición crítica de la disciplina. En conjunto, el estudio sugiere que la arquitectura puede repensarse como una práctica de mediación cultural que reconoce la diversidad identitaria y los afectos como dimensiones constitutivas del espacio.

Palabras clave: ARQ; Arquitectura; Teoría Queer; Espacialidad; Decolonialidad

Abstract: The article presents a critical review, based on a comparative-conceptual analysis, aimed at articulating three theoretical frameworks: queer and gender theory, architectural and spatial studies, and intersectional-decolonial approaches. The objective is to analyze how these frameworks relate to one another and what contributions they offer to contemporary architectural thought. The methodology consisted of collecting and systematizing specialized books and articles, organized into a matrix that enabled the identification of patterns, tensions, and gaps. The results show that the intersections between the three frameworks outline an emerging field of critical thought: the queer-spatiality dialogue shifts attention from form to use and embodiment; the spatiality-decolonial intersection makes epistemic hierarchies visible and proposes new pedagogies of design; and the triadic articulations consolidate criteria for situated and ethical practices of inhabiting. The analysis also highlights the growing influence of Latin American scholarship in redefining the discipline from more situated and inclusive perspectives. Overall, the study suggests that architecture can be reimagined as a practice of cultural mediation, one that recognizes identity diversity and affect as constitutive dimensions of space.

Keywords: ARQ; Arquitectura; Teoría Queer; Espacialidad; Decolonialidad

1. Introducción

La disciplina arquitectónica ha sido históricamente configurada desde paradigmas normativos y binarios que han privilegiado la funcionalidad productiva y el orden social

capitalista por encima de la diversidad de experiencias y corporalidades. Esta visión, arraigada en la modernidad, ha tendido a invisibilizar prácticas espaciales disidentes, reproduciendo jerarquías en el entorno construido [1], [2]. La arquitectura, en tanto disciplina y realidad material, se ha desarrollado bajo estas lógicas, generando un vacío en torno a la inclusión

de identidades disidentes y a la problematización de los binarismos que estructuran la vida cotidiana.

En años recientes, distintos campos del conocimiento han tensionado este marco restrictivo. La teoría *queer* y de género han abierto un horizonte crítico para comprender cómo las identidades no normativas desafían los límites disciplinares y resignifican el espacio [3], [4]. Paralelamente, los estudios arquitectónicos y de la espacialidad, particularmente aquellos seleccionados desde una postura crítica hacia la producción social del espacio, han puesto de relieve las apropiaciones, resignificaciones y desigualdades que lo atraviesan [1], [5]. Desde esta perspectiva, se establece un vínculo más claro con enfoques interseccionales y decoloniales, que cuestionan jerarquías epistémicas y lógicas coloniales presentes tanto en la producción de conocimiento como en la práctica proyectual [6], [7].

Sin embargo, estos marcos suelen analizarse de manera aislada. Existen estudios *queer* que problematizan normatividades espaciales [3], investigaciones decoloniales que abordan la ciudad y el territorio [6], y análisis espaciales que examinan procesos de apropiación y exclusión [5]. No obstante, son escasos los trabajos que buscan articularlos en un mismo plano de análisis, especialmente en México, donde la producción académica que cruza abiertamente estos tres enfoques sigue siendo limitada en comparación con lo que ocurre en países de Sudamérica, como Chile o Argentina [8].

En este contexto, la importancia de articular estos marcos radica en cuestionar la idea homogeneizante de la arquitectura contemporánea, especialmente aquella guiada por la lógica del consumo y el capital, donde los entornos habitables se han vuelto cada vez más estandarizados. La diversidad corporal y experiencial aparece entonces como una oportunidad para recuperar la heterogeneidad perdida en muchas ocasiones: observar cómo colectivos disidentes fuera de la norma habitan, adaptan o reconfiguran espacios puede revelar formas alternativas de pensar la identidad, la función y la forma en la arquitectura.

Estudiar estas prácticas permite imaginar una arquitectura que no solo responda a un modelo universal de habitante (blanco, heterosexual, con recursos y perteneciente a una familia nuclear), sino que acoja modos de vida múltiples, cambiantes y en tensión con lo que damos por hecho. En este sentido, los espacios *queer* y trans amplían la mirada hacia la diferencia, problematizando también el concepto mismo de identidad, mostrando que en el “no tener una identidad fija” también se

produce una forma de existencia espacial. La ambigüedad y la mezcla pueden ser formas productivas de conocimiento y, en este caso, de diseño.

La premisa que orienta este trabajo es que el cruce entre teoría *queer* y de género, estudios arquitectónicos y de la espacialidad, y enfoques interseccionales y decoloniales permite identificar tensiones y vacíos en la literatura, y empieza a abrir la disciplina hacia nuevas formas de proyectar y habitar más plurales y conscientes de la diversidad identitaria [7], [9].

Para alcanzar este propósito, el artículo se estructura en cuatro secciones. En primer lugar, se describe la metodología de la revisión crítica y el análisis comparativo-conceptual utilizado para organizar la literatura. En segundo lugar, se presentan los resultados de la revisión divididos en los tres bloques mencionados. Posteriormente, en la discusión, se analizan las articulaciones críticas entre los bloques, considerando tanto las relaciones en pares como la triangulación que los une, y se propone cómo estas articulaciones pueden dialogar con la arquitectura entendida como realidad material. Finalmente, en las conclusiones, se sintetizan los principales aportes de la revisión, sus limitaciones y las líneas futuras de investigación.

2. Materiales y métodos

Este artículo se elaboró a partir de una revisión crítica sistémica de literatura, entendida como un proceso flexible que permite explorar, seleccionar y articular distintos enfoques teóricos con el fin de generar nuevas lecturas sobre la disciplina arquitectónica. La revisión no se planteó como un levantamiento exhaustivo ni como un ejercicio de conteo, sino como un recorrido guiado por una postura crítica hacia las relaciones entre espacio, poder y diversidad.

La búsqueda de fuentes se realizó en distintas etapas. En primer lugar, se recurrió a bases de datos académicas y catálogos universitarios (Scopus, Google Scholar, SciELO, RedALyC, Latindex, CLACSO, TDX, DOAJ, y repositorios institucionales (UAQ/UNAM)) seleccionando textos que problematizan la producción del espacio desde perspectivas *queer*, interseccionales o decoloniales. Paralelamente, el proceso incluyó la revisión de referencias contenidas en los propios textos: al leer un libro o artículo, se exploraban sus bibliografías para localizar nuevas conexiones y autores relevantes. Esta práctica (que en muchos casos amplió el horizonte más allá de lo inicialmente previsto) permitió integrar tanto textos clásicos de referencia como aportaciones recientes (2020–2025), asegurando un balance entre

fundamentos conceptuales y debates actuales. A pesar de lo anterior, la revisión enfrenta limitaciones. La concentración de fuentes en bases de datos académicas deja fuera publicaciones independientes, manifiestos, etc. Esta omisión no solo es técnica, sino epistemológica, pues revela los mecanismos mediante los cuales los discursos son legitimados o invisibilizados

3. Resultados

El material recopilado se organizó en una matriz de sistematización donde cada texto fue clasificado dentro de tres bloques: teoría *queer* y de género, estudios arquitectónicos y de la espacialidad, y enfoques interseccionales y decoloniales. Esta clasificación no es rígida (varios textos habitan más de un bloque), pero permite presentar cada uno de forma introductoria para clarificar su objeto, sus preguntas y sus herramientas.

A diferencia de una revisión bibliográfica tradicional, esta matriz no se limitó a contar fuentes, sino que buscó reconocer los aportes conceptuales que cada bloque ofrece al pensamiento arquitectónico contemporáneo. Más que un registro numérico, el análisis intenta mostrar cómo estos conjuntos de textos desplazan los límites

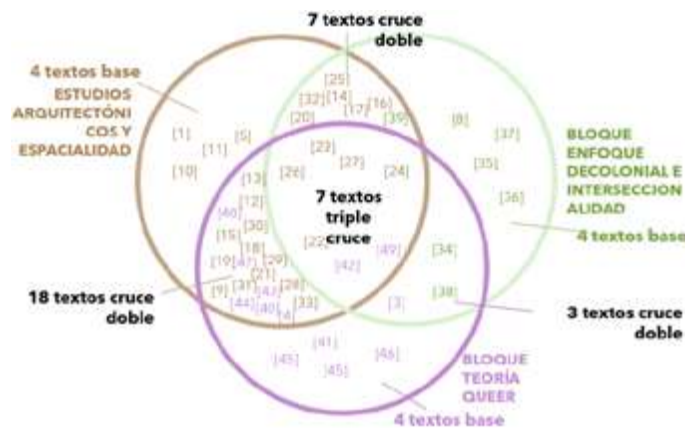


Figura 1. Diagrama de Venn que ilustra la interrelación entre los tres bloques teóricos. Elaboración propia.

disciplinarios, proponiendo nuevas maneras de leer la relación entre cuerpo, espacio y poder.

Se trata, en ese sentido, de un ejercicio comparativo y articulador más que confrontativo, orientado a reconocer tanto los patrones como los vacíos en la literatura. Esta lectura transversal abre caminos para una discusión crítica sobre la arquitectura y la espacialidad, entendidas como campos donde lo social y lo material se co-producen constantemente.

Tabla 1. División de textos por bloque y orientación teórica. Elaboración propia.

Bloque	Descripción y énfasis conceptual	Textos	Total
Estudios arquitectónicos y de la espacialidad	Exploran el espacio como producto social y como campo de disputa simbólica y material. Este bloque reúne teorías que entienden la espacialidad desde procesos de apropiación, producción y significación, y que evidencian cómo las configuraciones materiales sostienen o transforman las relaciones de poder.	[1],[5],[9],[10],[11],[12],[13],[14],[15],[16],[17],[18],[19],[20],[21],[22],[23],[24],[25],[26],[27],[28],[29],[30],[31],[32],[33]	27 Textos
Enfoques interseccionales y decoloniales	Cuestionan las jerarquías epistémicas y coloniales que estructuran tanto la disciplina como su enseñanza. Plantean la necesidad de repensar la arquitectura desde conocimientos situados, reconociendo cómo raza, género, clase y territorio configuran modos desiguales de habitar.	[6],[7],[8],[34],[35],[36],[37],[38],[39]	9 textos
Teoría queer y de género	Desestabiliza los límites normativos de la disciplina al incorporar la performatividad del cuerpo y los afectos como dimensiones críticas del espacio. Muestra cómo las identidades no normativas reorientan el uso y el significado de los lugares, visibilizando que toda espacialidad implica una política del cuerpo.	[3],[4],[40],[41],[42],[43],[44],[45],[46],[47],[48],[49]	12 textos
Total general			48 textos

La Tabla 1 sintetiza los principales aportes conceptuales de cada bloque, señalando su orientación teórica.

Por su parte, la Figura 1 un diagrama de Venn, ilustra gráficamente las zonas de intersección entre los tres marcos. Esta visualización permite comprender la naturaleza porosa del corpus y anticipa los cruces conceptuales que se desarrollarán más adelante.

A partir de esta organización, los siguientes apartados (3.1, 3.2 y 3.3) describen de manera individual cada bloque teórico, precisando sus fundamentos, alcances y aportes para la arquitectura. Posteriormente, en la sección de discusión, se analizan los puntos de encuentro y las articulaciones que emergen al ponerlos en diálogo.

3.1 Bloque teoría *queer* y de género

¿Qué es lo *queer* y qué es el género?

El término *queer* surge para cuestionar las categorías estables de identidad y las normas que determinan qué cuerpos, deseos y comportamientos se consideran legítimos. Más que una identidad, lo *queer* es una posición crítica frente a la normalización; un modo de pensar y vivir que desarma las fronteras entre lo masculino y lo femenino, lo público y lo privado, lo natural y lo construido. Por su parte, el género se entiende no como una esencia biológica, sino como una construcción social y performativa. Desde esta perspectiva, las disidencias de género (personas trans, no binarias o que simplemente no encajan en las categorías normativas) revelan la fragilidad de ese sistema y abren nuevas posibilidades para pensar el cuerpo y el espacio.

Qué mira.

La teoría *queer* y de género parte de que el cuerpo es performativo y, por tanto, produce espacio: los usos, gestos y trayectorias reiteradas cargan de sentido los lugares y pueden desestabilizar normas.

Cómo lo trabaja.

Traslada nociones como performatividad, orientación y visibilidad/ocultamiento al análisis espacial, enfocándose en los límites, umbrales e interfaces (lo íntimo/público, lo visible/velado). La performatividad, entendida según Butler [3] como el modo en que los actos, gestos y usos cotidianos producen aquello que aparentan expresar, permite reconocer que el cuerpo no solo

ocupa el espacio, sino que lo crea mediante sus repeticiones.

Por su parte, la noción de orientación, desarrollada por Ahmed [4], alude a la manera en que los cuerpos se dirigen y se disponen en el mundo, revelando qué lugares los acogen y cuáles los rechazan. Estar “orientado” hacia ciertos objetos, afectos o personas significa también estar desorientado respecto de otros, y esa diferencia se traduce en espacialidades de acceso o exclusión.

Finalmente, los afectos, lejos de entenderse como emociones individuales, se conciben como fuerzas relacionales que circulan entre cuerpos, materiales y ambientes, condicionando cómo se perciben y experimentan los lugares.

En conjunto, estas nociones permiten observar cómo la materialidad y la organización del espacio orientan o restringen cuerpos, trayectorias y formas de vida [47].

¿Para qué puede servir en una disciplina como la arquitectura?

La arquitectura puede leerse como un campo de orientaciones donde la materialidad, la escala y el programa reproducen o cuestionan las normas sociales que regulan el cuerpo. En el ámbito proyectual, estos conceptos invitan a diseñar dispositivos materiales, programáticos o simbólicos que no den por sentadas las formas de uso, sino que abran espacio a la ambigüedad, al encuentro y a lo diverso [49].

El espacio no posee una estética “*queer*” en sí mismo: se vuelve *queer* cuando interrumpe la norma, cuando desacomoda los patrones de habitar y de mirar. Pensar desde esta clave no implica crear una nueva categoría formal, sino asumir la inestabilidad y la diferencia como condiciones constitutivas del diseño.

3.2 Bloque Estudios arquitectónicos y de la espacialidad

¿Qué es la espacialidad?

En los estudios críticos de la arquitectura, la *espacialidad* no se refiere únicamente a la forma física o compositiva de los lugares, sino al conjunto de relaciones sociales, simbólicas y materiales que los producen. Pensar la espacialidad implica reconocer que el espacio no es un fondo neutro donde ocurre la vida, sino un campo de fuerzas, donde se inscriben y disputan significados, jerarquías y afectos. Autores como Lefebvre en [1] y Heidegger en [10], sentaron las bases de esta comprensión, mostrando que cada entorno construido refleja y refuerza el orden social que lo origina.

Qué mira.

Los estudios de la espacialidad observan cómo los espacios se producen y transforman a través de la acción y la interacción humanas. Analizan procesos de apropiación, uso y resignificación, y examinan cómo las configuraciones materiales pueden reproducir desigualdades o habilitar formas alternativas de convivencia.

Cómo lo trabaja.

Este enfoque recurre a conceptos como la producción del espacio, la apropiación y la relacionalidad para explicar que los lugares no existen de manera independiente, se construyen socialmente. Si bien desplaza la mirada más allá de la forma arquitectónica, reconoce que es precisamente en el objeto arquitectónico donde estas relaciones se materializan: en él se inscriben las rutinas cotidianas, las dinámicas de pertenencia y las formas de control o exclusión que configuran la vida social.

Analizar la espacialidad implicaría comprender cómo el espacio habitado traduce y condiciona prácticas y, al mismo tiempo, cómo el diseño arquitectónico puede potenciar o transformar esas dinámicas. De este modo, el interés no se separa del hacer arquitectónico, sino que lo amplía, al considerar que toda decisión formal o programática participa de una red más amplia de relaciones sociales y simbólicas.

3.3 Bloque enfoques interseccionales y decoloniales

¿Qué son la interseccionalidad y la decolonialidad?

La *interseccionalidad*, formulada por Kimberlé Crenshaw en [6], se concibe como una perspectiva analítica y una herramienta conceptual para comprender cómo distintas estructuras de opresión (género, raza, clase, sexualidad, corporalidad) no actúan de manera separada, sino que se entrecruzan y se refuerzan mutuamente. Así, cada experiencia está marcada por múltiples sistemas de poder que se superponen y producen formas específicas de exclusión o privilegio.

La *decolonialidad*, en cambio, se entiende como un enfoque epistemológico y político que busca cuestionar la manera en que se ha construido el conocimiento moderno y sus pretensiones de universalidad. Autores como Mignolo en [8] y Quijano en [35] proponen que la colonialidad no terminó con el colonialismo, sino que persiste en la organización del saber, la economía y la cultura. En

arquitectura, esto sería reconocer que gran parte del pensamiento disciplinar se ha desarrollado desde una perspectiva eurocéntrica, masculina y blanca, que ha marginado otras formas de pensar y habitar el espacio.

Ambos marcos, al entrelazarse, permiten leer la arquitectura y el territorio como espacios atravesados por jerarquías históricas y epistémicas, y abren la posibilidad de construir una práctica más plural, situada y consciente de sus condiciones de producción.

Qué mira.

Este bloque se centra en las formas en que el poder económico, político, racial y de género se inscribe en el espacio. Examina cómo la colonialidad del poder organiza el territorio, define centros y periferias, y determina quién tiene derecho a ocupar o transformar el entorno. También, en ciertos estudios cruzados, observa cómo las desigualdades estructurales se materializan en el acceso a la vivienda, los servicios o la representación simbólica dentro del paisaje urbano.

Cómo lo trabaja.

Recurre a herramientas conceptuales como la desobediencia epistémica [8], las epistemologías del Sur [37] y el diseño pluriversal [7], que proponen reconocer la validez de saberes no hegemónicos y situar la práctica arquitectónica desde contextos locales y experiencias comunitarias.

En lugar de asumir una teoría única, este enfoque busca descentrar el punto de vista disciplinar, incorporando formas diversas de construir, habitar y proyectar. Desde esta perspectiva, la arquitectura puede operar como una práctica de escucha, diálogo y co-diseño, capaz de traducir saberes subalternos y modos de vida no normativos en decisiones espaciales concretas.

¿Para qué sirve en arquitectura?

Estos enfoques invitan a cuestionar desde dónde se diseña y para quién se diseña. Incorporar una mirada interseccional y decolonial permite reconocer que los entornos construidos no son neutrales, sino que reflejan y pueden reproducir las desigualdades sociales. En la práctica proyectual, esto se traduce en la necesidad de generar procesos participativos, diseños relacionales y criterios de justicia espacial que atiendan la diversidad de cuerpos, saberes y territorios.

A nivel pedagógico, estos marcos abren la posibilidad de formar arquitectos más conscientes de su posición, capaces de identificar las estructuras históricas que condicionan su quehacer y de imaginar alternativas desde los márgenes.

3.4 Cruces y distribución del corpus

A partir de la sistematización del corpus, fue posible observar no solo la especificidad de cada bloque, sino también las zonas de contacto que emergen entre ellos. Estos cruces conceptuales revelan que los límites entre la teoría *queer*, la espacialidad y la decolonialidad son porosos, y que su articulación produce nuevas formas de lectura sobre la arquitectura. Identificar estos puntos de intersección permite dimensionar la riqueza y complejidad del campo, al mostrar cómo distintos enfoques convergen en torno a problemáticas comunes vinculadas al poder, la representación y el habitar.

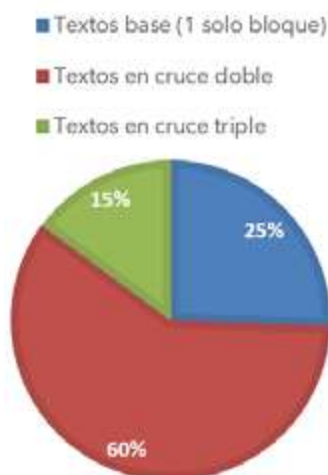


Figura 2. Distribución de los textos según tipo de cruce. El campo opera por articulaciones, no por bloques aislados. Elaboración Propia

La Figura 2 muestra la distribución del corpus según el grado de cruce entre bloques teóricos. Más de la mitad de los textos (59.6 %) articulan dos enfoques simultáneamente, mientras que un 14.9 % aborda explícitamente los tres. Esto confirma que los campos de la teoría *queer*, la espacialidad y la decolonialidad pueden entrelazarse sin tener que operar como áreas aisladas, lo que refuerza la pertinencia del análisis comparativo-conceptual realizado.

Esta tendencia sugiere que resulta metodológicamente más accesible establecer vínculos entre pares (por ejemplo, entre teoría *queer* y espacialidad, o entre decolonialidad e interseccionalidad) que construir un diálogo triádico plenamente integrado. Ello puede explicarse por la naturaleza fragmentaria del campo

y por las diferencias epistemológicas entre los marcos.

No obstante, el hecho de que existan textos que alcanzan el cruce triple demuestra la emergencia de un terreno común donde estas perspectivas comienzan a entrelazarse, consolidando la pertinencia del análisis comparativo-conceptual realizado.

La Figura 3 muestra la distribución regional de los textos analizados: el 44 % proviene del Sur Global (principalmente América Latina), mientras que el 56 % se origina en instituciones del Norte Global. Si bien esta proporción mantiene la hegemonía editorial y académica del Norte, evidencia también un desplazamiento paulatino en la geografía del pensamiento arquitectónico crítico. La presencia creciente de producciones latinoamericanas, y en menor medida africanas o asiáticas, señala que las reflexiones sobre género, cuerpo y espacio ya no se generan exclusivamente desde los centros académicos tradicionales, sino desde territorios históricamente relegados en la producción de conocimiento. Este reequilibrio, aunque aún incipiente, plantea un giro epistémico relevante: pensar la arquitectura desde el Sur no implica únicamente diversificar los casos de estudio, sino modificar las condiciones desde las que se interpreta el espacio, incorporando experiencias locales, memorias colectivas y prácticas comunitarias que cuestionan la universalidad de los paradigmas modernos. Así, la composición regional del corpus confirma que la crítica arquitectónica contemporánea se encuentra en un proceso de descentramiento, donde los márgenes comienzan a producir teoría y no solo a ilustrarla. A partir de este mapeo de cruces y procedencias, la sección siguiente examina sus implicaciones conceptuales y proyectuales.

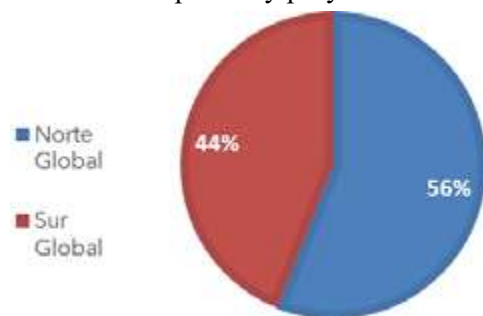


Figura 3. Distribución de los textos según región (Norte y Sur global). Evidencia descentramiento epistémico en curso. Elaboración propia.

4. Discusión

En la sección anterior se presentaron los tres bloques teóricos que estructuran el corpus de esta revisión. En cada uno se explicó su concepto central, las

herramientas con las que trabaja y su pertinencia dentro de la arquitectura.

A partir de ello, la presente discusión analiza qué sucede al poner en relación estos marcos, es decir, qué tensiones, convergencias y aportes emergen del cruce entre ellos. Estas articulaciones no pretenden construir una teoría unificada, sino revelar los puntos de encuentro que abren nuevas posibilidades para pensar y proyectar la arquitectura desde una mirada crítica, situada y plural.

La Tabla 2 sintetiza estos cruces por pares, destacando los conceptos articuladores más frecuentes que servirán como punto de partida para la interpretación crítica desarrollada en los apartados siguientes.

Tabla 2. Cruces por pares con conteo, referencias representativas y conceptos-puente. Elaboración propia.

Par de bloques	No de textos	Referencias	Conceptos-puente identificados
Teoría queer y de género ↔ Espacialidad/ arquitectura	18	[4], [9], [12], [13], [15], [18], [19], [21], [28], [29], [30], [31], [33], [20], [43], [44], [47],[48]	Performatividad del cuerpo; apropiación espacial; orientación/uso del espacio; resignificación; corporalidad situada
Teoría queer y de género ↔ Interseccional/ decolonial	3	[3], [34], [38]	Conocimiento situado; frontera; multiplicidad de ejes de opresión; colonialidad del género
Espacialidad/ arquitectura ↔ Interseccional/ decolonial	7	[14], [16],[17], [20], [25], [32], [39]	Colonialidad del espacio; lugar/marginalidad; pedagogía y contexto; jerarquías territoriales; pluriversalidad

4.1 Cruce Teoría *queer* y de género con Estudios arquitectónicos y de la espacialidad

Este cruce, el más nutrido del corpus con 18 textos según la, muestra cómo los estudios *queer*, al dialogar con la noción de espacialidad, desplazan la comprensión del espacio desde su forma hacia sus usos. Más que definir nuevas tipologías, estas perspectivas nos enseñan que el cuerpo, sus trayectorias y sus gestos cotidianos producen arquitecturas efímeras que cuestionan las normas disciplinares.

La *espacialidad queer* redefine y pone el foco en nociones como límite, privacidad y visibilidad. En este marco, la performatividad del cuerpo, planteada por Butler [3] y desarrollada en arquitectura por autoras como Bonnevier [12] o Betsky [40], permite entender que cada acto de uso es también un acto de rediseño, una reconfiguración constante del espacio. De este modo, la arquitectura ya no es concebida como objeto cerrado, se asume como proceso relacional y performativo, donde los cuerpos se vuelven agentes proyectuales que modifican la forma y el habitar.

Estas ideas se concretan en estudios que abordan la *queerificación* de espacios cotidianos como viviendas, baños o bares, mostrando cómo los cuerpos disidentes producen nuevas narrativas espaciales al reapropiar lo que se les niega [41 - 42] y [44]. En conjunto, este cruce revela que la arquitectura condiciona las prácticas del cuerpo, y puede ser transformada por ellas, abriendo un horizonte donde el diseño se concibe como un acto vivo y situado.

Operativamente, esto se traduce en criterios de proyecto que habilitan variación de usos (programas no fijados), umbrales modulables (entre lo íntimo/público) y dispositivos de visibilidad/ocultamiento que reconozcan trayectorias corporales no normativas.

4.2 Cruce Teoría *queer* y de género con enfoque Interseccional y Decolonial

Aunque menos numeroso (Tabla 2), este cruce constituye la base epistemológica del campo. Si bien la mayoría de los textos seleccionados no abordan directamente la arquitectura o el espacio construido, sí permiten comprender las raíces compartidas entre la teoría *queer*, la interseccionalidad y la decolonialidad, en tanto perspectivas críticas que cuestionan las jerarquías heredadas del pensamiento moderno y colonial.

La teoría *queer*, desde su origen, comparte con los enfoques decoloniales la crítica a las estructuras dicotómicas del conocimiento occidental (hombre/mujer, naturaleza/cultura, razón/emoción, cuerpo/mente) que organizan tanto las identidades como las prácticas sociales. Butler, en [3], y Crenshaw, en [6],

muestran cómo género, raza y clase actúan de manera entrelazada en la producción de subjetividades y desigualdades. Por su parte, Haraway, en [34], propone superar esas divisiones a través de lo híbrido y lo interdependiente, mientras que Mendoza en [38] lleva esta discusión al terreno del pensamiento situado latinoamericano, preguntándose si los sujetos subalternos pueden salvarnos desde sus propias epistemologías.

En conjunto, estos textos señalan que las normas de género y sexualidad son tecnologías de poder heredadas del colonialismo, que no solo organizan los cuerpos sino también las formas de conocer y habitar el mundo. La teoría *queer*, al entrelazarse con los marcos interseccional y decolonial, amplía su alcance político y epistémico, al reconocer que las luchas por la identidad no pueden desvincularse de las luchas contra la colonialidad y el racismo estructural.

Desde esta convergencia, lo *queer* adquiere una dimensión de desobediencia epistémica [8]: un gesto de resistencia frente a los sistemas de saber que dictan qué vidas, qué cuerpos y qué territorios merecen ser reconocidos. Esta forma de pensamiento se sitúa desde los márgenes y propone una metodología que valora el conocimiento encarnado, las memorias espaciales subalternas y las narrativas que surgen fuera de los centros de poder.

En arquitectura, este cruce no traduce aún los conceptos al espacio material, pero prepara el terreno para hacerlo. Al cuestionar quién produce el conocimiento arquitectónico y desde qué cuerpos o experiencias, abre la posibilidad de una práctica crítica que piense el diseño como un acto de traducción entre saberes marginados y formas materiales. Así, más que representar identidades disidentes, se trata de intervenir las condiciones epistemológicas y simbólicas que determinan quién puede habitar, cómo y desde dónde.

4.3 Cruce Estudios arquitectónicos y de la espacialidad con enfoque Interseccional y Decolonial

Este cruce muestra que las desigualdades espaciales no se expresan únicamente en la forma o en la distribución física, también en los modos de producir, habitar y legitimar el conocimiento arquitectónico. Más que una crítica abstracta, esta lectura se traduce en prácticas proyectuales y

pedagógicas que buscan dismantelar jerarquías de saber y abrir la disciplina a epistemologías situadas.

Autores como Mignolo en [8] y De Sousa Santos en [37] cuestionan la idea de una modernidad universal y proponen reconocer la multiplicidad de conocimientos localizados. En arquitectura, esto implica aceptar que las formas de construir, enseñar y habitar del Sur Global no son derivaciones periféricas del canon, sino saberes autónomos que pueden redefinir la práctica proyectual. Ejemplos como [17] que analiza las *Escuelas de Artes Plásticas* de Ricardo Porro en Cuba y cómo fueron leídas desde un canon eurocentrado, revelan que incluso las arquitecturas producidas desde la subalternidad pueden ser deslegitimadas cuando no responden a los parámetros del Norte Global. Esta observación interpela directamente al quehacer arquitectónico latinoamericano, obligándolo a reconocer su posición geopolítica en la producción de conocimiento.

De forma complementaria, en [14], Shields propone la noción de *topologías culturales*, entendiendo el espacio como una red de significados sociales donde se inscriben valores, memorias y prácticas. Esta lectura, al conectarse con los enfoques decoloniales, permite pensar cómo las relaciones de poder se materializan en la cultura y el territorio, y cómo pueden ser subvertidas mediante usos y apropiaciones alternativas. En sintonía, en la tesis de Padilla [25], se introduce la idea del *lugar como espacio moral*, subrayando que cada configuración espacial conlleva decisiones éticas que definen quién puede ocuparlo y bajo qué condiciones.

Otros aportes como [20] plantean una arquitectura que incorpore la interseccionalidad como marco operativo, es decir, no solo como análisis social, sino como principio de diseño que reconozca la diversidad de cuerpos y experiencias. En [32], por su parte, se propone el concepto de *Espacios de posibilidad radical*, donde el diseño se concibe como práctica que surge desde y para la interseccionalidad, abriendo un horizonte de transformación material y simbólica.

En conjunto, estos textos articulan una comprensión del espacio como construcción cultural y política. La espacialidad crítica reconoce que el entorno no solo refleja desigualdades, sino que las produce y puede reconfigurarlas. Por ello, el diseño, la enseñanza y la investigación se vuelven herramientas de redistribución epistémica, capaces de incorporar saberes locales, perspectivas feministas y experiencias subalternas

4.4 Cruce triádico

La articulación de los tres bloques amplía el horizonte crítico de la arquitectura: lo *queer* visibiliza las normas de género y sexualidad; lo interseccional-decolonial sitúa esas normas dentro de jerarquías

históricas y globales, y la espacialidad muestra su inscripción material.

Los siete textos triádicos (Tabla 2) comparten una vocación situada que desplaza el foco desde los objetos y tipologías hacia los regímenes, prácticas y materialidades donde género, colonialidad y espacio se co-constituyen.

Aunque sus aproximaciones son diversas, todos comparten la voluntad de pensar la arquitectura como práctica crítica, donde lo corporal, lo simbólico y lo territorial se entrelazan.

En el texto [27], se aborda el espacio doméstico como sistema de cuidados que desafía la cis-heteronormatividad y la familia nuclear. Desde Chile, propone una lectura interseccional y feminista que resignifica el habitar cotidiano como práctica política.

La tesis [22], amplía este horizonte al analizar cómo las experiencias de exclusión espacial producen nuevas formas de inclusión y redefinen la noción de lo público.

Por su parte, la tesis [23], materializa estas ideas en un proyecto arquitectónico que incorpora la corporalidad, la memoria y el deseo como motores de diseño, integrando así los tres enfoques desde una práctica situada en el Sur Global.

Otros textos, como [26] y [32], muestran cómo desde el Norte Global comienzan a emerger discursos que dialogan con la mirada del Sur: ambos proponen una ética del cuidado y una apertura hacia formas de habitar interdependientes, desafiando la neutralidad disciplinar.

En esa misma línea, el texto [42] de Betsky, revisita su obra de 1997 [40] reconociendo las limitaciones de su análisis original, centrado en la experiencia masculina gay, para incorporar ahora perspectivas interseccionales de raza, clase y género.

Finalmente [49] introduce la noción de “pensar desde los márgenes” como ejercicio de desplazamiento epistemológico, donde la crítica *queer* y decolonial convergen para repensar los modos de proyectar.

En conjunto, estos trabajos evidencian que la triada no busca integrar perspectivas de manera armónica, sino asumir sus fricciones como condición productiva del pensamiento arquitectónico.

En el contexto latinoamericano, esta articulación adquiere una relevancia particular al poner en diálogo marcos teóricos globales con realidades marcadas por desigualdad y violencia estructural.

5. Conclusiones

Esta revisión crítica permitió articular tres marcos que, si bien suelen estudiarse por separado, convergen en una preocupación común: la forma en que el espacio refleja, sostiene y puede transformar las estructuras de poder. La teoría *queer* y de género aporta herramientas para desnaturalizar la norma y pensar el cuerpo como agente espacial; los enfoques interseccionales y decoloniales amplían esa mirada al situar el espacio dentro de jerarquías históricas y globales; y los estudios de la espacialidad ofrecen las claves conceptuales para entender cómo estas desigualdades se inscriben materialmente en la arquitectura.

El análisis comparativo-conceptual de los textos mostró que los cruces entre estos marcos no solo enriquecen la reflexión teórica, sino que también trazan un campo emergente de pensamiento arquitectónico crítico. Los aportes provenientes del Sur Global, en especial de América Latina, revelan un desplazamiento hacia epistemologías situadas, donde la práctica arquitectónica se concibe como herramienta de resistencia y resignificación. Estas aproximaciones desafían los límites disciplinares tradicionales y plantean la posibilidad de una arquitectura que piense desde las diferencias, y no a pesar de ellas.

Metodológicamente, el uso de una matriz de sistematización permitió visualizar la densidad de los cruces conceptuales y reconocer a ciertos autores como puentes entre paradigmas. Al mismo tiempo, con las matrices conceptuales se corre el riesgo de cristalizar categorías que en la práctica son móviles y contingentes. Las fronteras entre enfoques no siempre son claras; en ocasiones se superponen o contradicen, lo que exige lecturas flexibles, no generalizables y atentas a la especificidad de cada caso. Este tipo de análisis evidencia que el conocimiento arquitectónico puede generarse no solo desde la práctica proyectual, sino también desde el cruce de discursos críticos y experiencias diversas.

En conjunto, los hallazgos sugieren que el pensamiento arquitectónico contemporáneo se encuentra en un punto de inflexión: abandonar la pretensión de universalidad para abrirse a una multiplicidad de modos de habitar. Comprender la arquitectura desde esta perspectiva implica reconocer que toda espacialidad es política, y que cada espacio (material o simbólico) encarna decisiones sobre quién puede ocuparlo y cómo. Desde esta conciencia, la arquitectura puede pensarse no solo como disciplina técnica, sino como práctica ética y cultural

comprometida con la diversidad identitaria y la justicia espacial.

A nivel docente, el estudio sugiere currículos y ejercicios de taller que incorporen indagaciones situadas (cuerpo-espacio, memorias locales, co-diseño). En el proceso proyectual, orienta protocolos de escucha y validación de saberes no hegemónicos, y métodos de iteración con usuarios/as diversos. En el proyecto, propone criterios: (a) flexibilidad programática (espacios con más de un modo válido de uso), (b) dispositivos de ambigüedad (límite, visibilidad/ocultamiento, reconfiguración temporal), y (c) diseño del cuidado (accesos, mantenimiento, seguridad afectiva) como parte del desempeño arquitectónico. Estos desplazamientos convierten la arquitectura en una práctica ética y situada, capaz de redistribuir agencia y sentido en el habitar.

Futuras líneas de investigación podrían profundizar en la dimensión proyectual de estas articulaciones, explorando cómo los criterios de diseño pueden incorporar nociones de performatividad, interdependencia y desobediencia epistémica dentro de los procesos de creación arquitectónica. Esta apertura invita a pensar la arquitectura no solo como una práctica de representación, sino como un ejercicio crítico de traducción entre cuerpos, saberes y espacios. En esa dirección, los principios derivados de los estudios *queer*, interseccionales y decoloniales pueden orientar nuevas metodologías proyectuales que cuestionen las jerarquías disciplinares y propicien modos de habitar más flexibles, éticos y expansivos.

Fuentes de financiamiento

Los autores agradecen a la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI) por el apoyo brindado para la realización de este trabajo.

Agradecimientos

Durante la preparación de este manuscrito, se utilizó la herramienta de ChatGPT (GPT-5) con el propósito de apoyo en la revisión de ortografía y coherencia textual. Los autores han revisado y editado el contenido generado y asumen plena responsabilidad por el contenido de esta publicación.

Conflictos de interés

Los autores declaran que no existen conflictos de interés.

Los financiadores no tuvieron participación en el diseño del estudio; en la recolección, análisis o interpretación de los datos; en la redacción del manuscrito; ni en la decisión de publicar los resultados.

6. Referencias bibliográficas

- [1] H. Lefebvre, *La producción del espacio*. Madrid: Capitán Swing, 2013 (orig. 1974).
- [2] P. Bourdieu, *La distinción*. Madrid: Taurus, 1988.
- [3] J. Butler, *Cuerpos que importan*. Buenos Aires: Paidós, 2002 (orig. 1993).
- [4] S. Ahmed, *What's the Use? On the Uses of Use*. Durham: Duke University Press, 2019.
- [5] T. Vidal and E. Pol, "La apropiación del espacio: una propuesta teórica para la psicología ambiental," *Revista de Psicología Social*, vol. 20, no. 1, pp. 5–20, 2005.
- [6] K. Crenshaw, "Mapping the Margins: Intersectionality, Identity Politics, and Violence against Women of Color," in *The Public Nature of Private Violence*, M. A. Fineman and R. Mykitiuk, Eds. New York: Routledge, 1994, pp. 93–118.
- [7] A. Escobar, *Designs for the Pluriverse: Radical Interdependence, Autonomy, and the Making of Worlds*. Durham: Duke University Press, 2018.
- [8] W. Mignolo, *Desobediencia epistémica: Retórica de la modernidad, lógica de la colonialidad y gramática de la descolonialidad*. Buenos Aires: Ediciones del Signo, 2010.
- [9] L. Kern, *Feminist City: A Field Guide*. Toronto: Between the Lines, 2019.
- [10] M. Heidegger, "Construir, habitar, pensar," en *Conferencias y artículos*, trad. E. Barjau. Barcelona: Ediciones del Serbal, 1994, pp. 121–139.
- [11] G. Bachelard, *La poétique de l'espace*. Paris: Presses Universitaires de France, 1957.
- [12] K. Bonnevier, *Behind Straight Curtains: Towards a Queer Feminist Theory of Architecture*. Gothenburg, Suecia: Acta Universitatis Gothoburgensis, 2007.
- [13] B. Benedicto, "Queer space in the ruins of dictatorship architecture," *Gender, Place & Culture*, vol. 21, no. 3, Duke University Press, EE.UU. 2014.
- [14] R. Shields, *Spatial Questions: Cultural Topologies and Social Spatialisations*. Inglaterra: Sage Publications, 2013.
- [15] F. Quesada López, *Arquitecturas del devenir: Ensayos sobre la performatividad del espacio*. Madrid, España: Ediciones Asimétricas, 2014.
- [16] J. Caballero Galván, "Los criterios de diseño arquitectónico de la vivienda moderna desde la

perspectiva de género”, México, *Debate Feminista*, vol. 51, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.df.2016.03.002>

[17] Y. Farrés Delgado, “Arquitectura y decolonialidad: algunas ideas sobre la Escuela de Artes Plásticas de Ricardo Porro,” *Aisthesis*, no. 60, Bogotá, Colombia, dic. 2016.

[18] S. Salazar Barrón, “La ciudad y el género: la producción urbana del espacio heterosexual,” *Bitácora Arquitectura*, no. 33, pp. 98–103, 2016.

[19] G. Barton y H. Harriss, “Gendered, Non-Gendered, Re-Gendered Tools for Spatial Production,” *Architecture and Culture*, vol. 5, no. 3, pp. 475–485, 2017. <https://doi.org/10.1080/20507828.2017.1383796>

[20] L. Bachman y C. Bachman, “Intersectionality, oppression, and opportunity in architecture: Claiming the social complex,” en *ARCC 2017: Architecture of Complexity*, sesión 1A, Houston, TX, 2017.

[21] T. Gough, “Trans-architecture,” *Footprint*, vol. 11, no. 2, 2017. <https://doi.org/10.7480/footprint.11.2.1901>

[22] D. K. Padilla Herrera, *Los espacios otros en las ciudades latinoamericanas: Redefinición de la inclusión desde la exclusión espacial*. Monterrey, México: Universidad Autónoma de Nuevo León, 2019.

[23] C. Bañados Bay-Schmith, *Rosa: espacio para el desarrollo de las artes y la identidad cuir*. Universidad de Chile, Facultad de Arquitectura y Urbanismo, 2020.

[24] B. Q. Son, “Twelve Tableaux: Tales of a Queer Architecture,” *Safe Space Zine*, no. 6, 2021.

[25] D. K. Padilla-Herrera, “¿El lugar como espacio moral? Reflexiones sobre los usos en arquitectura y el espacio público,” *Revista de Arquitectura (Bogotá)*, vol. 24, no. 1, pp. 24–32, 2022. <https://doi.org/10.14718/RevArq.2022.24.1.3244>

[26] M. Anderson y S. Saeidi, “A Manifesto for Kind Architecture,” *Safe Space Zine*, no. 6, Noruega 2021.

[27] F. Barthou, *Domesticidad subversiva: (re)pensar el espacio doméstico*. Santiago, Chile: Pontificia Universidad Católica de Chile, 2022.

[28] P. Brandolini Robertone, “Diseñando torcido / Designing askew: Aproximaciones queer a la arquitectura y el diseño,” en *Las políticas de la planta / The Politics of the Plan*, Eje 1, Argentina, 2022

[29] S. Marchant, “Vestir, revestir, travestir / Dressing, coating, cross-dressing,” *ARQ (Santiago)*, no. 112, Chile, 2022.

[30] M. Moreno, “Construir espacios urbanos desde las geografías de género y de las sexualidades,” *GeoGraphos*, vol. 14, Argentina, 2023. <https://doi.org/10.14198/GEOGRA2023.14.1.07>

[31] R. Acuña-Delgado, R. M. Guerrero-Valdebenito, M. Alarcón-Rodríguez y M. A. Delpino-Chamy, “Tensiones en las formas de habitar de disidencias sexuales y de género en el espacio público del centro urbano de Concepción,” *Revista RU*, vol. 26, no. 48, pp. 42–55, Chile, 2023. <https://doi.org/10.22320/07183607.2023.26.48.04>

[32] A. Ziaee, “Spaces of Radical Possibility: Designing for and from Intersectionality,” *Trends in Higher Education*, vol. 3, no. 4, pp. 1109–1120, 2024, doi:10.3390/higheredu3040065. <https://doi.org/10.3390/higheredu3040065>

[33] D. Maldonado, “Ciudades y pornoespacio. Reflexiones teóricas sobre urbanismo alternativo,” en *TRANSHUMANO. Consecuencias humanas de una revolución tecnológica*, Labýrinthos Editores, 2024.

[34] D. J. Haraway, “A Cyborg Manifesto: Science, Technology, and Socialist-Feminism in the Late Twentieth Century,” en *Simians, Cyborgs and Women: The Reinvention of Nature*. New York: Routledge, 1991.

[35] A. Quijano, “Colonialidad y modernidad/racionalidad,” en *Los conquistados: 1492 y la población indígena de las Américas*, H. Bonilla, Ed. Quito, Ecuador: FLACSO, 1992.

[36] R. Grosfoguel, “Transmodernity, Border Thinking, and Global Coloniality,” *Review (Fernand Braudel Center)*, vol. 29, no. 2, pp. 167–187, 2006.

[37] B. de Sousa Santos, *Introducción: las epistemologías del Sur*. Buenos Aires / Coimbra: CLACSO / Centro de Estudos Sociais, 2011.

[38] B. Mendoza, “Can the subaltern save us?,” *Tapuya: Latin American Science, Technology and Society*, vol. 1, no. 1, pp. 109–122, 2018. <https://doi.org/10.1080/25729861.2018.1551462>

[39] C. Ortiz, P. Tavlou, M. Siqueira y G. Testori, “Decolonising urban knowledge(s): An ordinary imperative in extraordinary times,” *City*, vol. 29, no. 2, pp. 1–17, 2025. <https://doi.org/10.1080/13604813.2025.2470540>

[40] A. Betsky, *Queer Space: Architecture and Same-Sex Desire*. New York, NY: William Morrow & Co., 1997.

[41] L. Crawford, *Transgender Architectonics: The Shape of Change in Modernist Space*. Londres, Inglaterra: Routledge, 2016.

- [42] A. Betsky, "Queer Space Revisited," *Footprint*, vol. 11, no. 2, pp. 61–68, 2017. doi: 10.7480/footprint.11.2.1899
- [43] A. Holder, "Five Points Toward a Queer Architecture; Or, Notes on 'Mario Banana No. 1'," *Log*, no. 41, EE. UU., 2017.
- [44] J. Sanders, "From Stud to Stalled! Architecture In Transition," *Log*, no. 41, pp. 145–154, EE. UU., 2017.
- [45] X. Kokoula, "Opening up Bodyspace: Perspectives from Posthuman and Feminist Theory," *Footprint*, vol. 11, no. 2, 2017.
- [46] S. Ahmed, *Queer Phenomenology: Orientations, Objects, Others*. Durham, NC: Duke University Press, 2006.
- [47] J. A. Díaz Hernández, "Cuerpos, signos y espacios: sobre la arquitectura panóptica de la segregación urinaria," *RELIES: Revista del Laboratorio Iberoamericano para el Estudio Sociohistórico de las Sexualidades*, no. 3, pp. 5–30, México, 2020.
- [48] D. R. Islas Vela, "La Geografía Queer o Geografía Contrasexual: de las corporeidades a la queerificación. El proceso de queerificación de la Zona Rosa en la Ciudad de México," en *Espacios, géneros y sexualidades. Reflexiones feministas de las diferencias espaciales*, P. Soto, Coord. México: Universidad Autónoma Metropolitana, 2020.
- [49] M. Cordier-Jouanne, "Queer(ing) Architecture: Architectural Thinking from the Margins," *Safe Space Zine*, no. 6, Noruega, 2021.

Aproximación metodológica para el diseño del hábitat desde la Sympoiesis Humana.

Towards a Methodological Framework for Habitat Design through Human Sympoiesis

Fortuna Martínez, Luis Rodrigo, Padilla Herrera, Diana Karina y Perez Coeto, Marysol Uribe.

Afiliación: Facultad de Arquitectura

Doctorado en Filosofía con Orientación en Arquitectura y Asuntos Urbanos.

Universidad Autónoma de Nuevo León

San Nicolas de los Garza, México

Correo electrónico de los autores

mc.rodrgo.fortuna@gmail.com, luis.fortunamtz@uanl.edu.mx, diana.padillahrr@uanl.com.mx, marysol.uribep@uanl.edu.mx.

Resumen: En las últimas décadas, el desarrollo urbano ha sido impulsado por factores económicos, lo que ha generado una constante fractura entre los individuos y su entorno, lo cual, ha promovido espacios que no responden a una habitabilidad integral y por ende, existe una falta de conexión real con los ecosistemas. Las metodologías vigentes (urbano-arquitectónicas y de objetos), aunque buscan la eficiencia, perpetúan esta desvinculación.

Considerando esta crisis, el presente proyecto se gesta desde una propuesta focalizada en el cambio de paradigma a partir del concepto de Sympoiesis Humana, el cual se entiende como un proceso de “hacer-con” y co-creación. Este concepto, que proviene de los trabajos de Donna Haraway, postula que la co-construcción ocurre bajo la estrecha relación de las entidades que habitan en el planeta (humanas y no humanas) a través de interacciones dinámicas. Dentro del propósito del presente trabajo es iniciar un proceso de hallazgos dentro de las metodologías existentes para lograr ver estos “vacíos” conceptuales que llegan a tomar al usuario como un dato, un recurso, y que esto imposibilita el poder pensar en la vinculación de los procesos de diseño a con el ecosistema. Esto implica el desarrollo de herramientas que permitan identificar y fomentar los procesos sympoieticos en el hábitat, considerando el “diseñar para” a un “hacer con”. Con esta perspectiva se espera establecer nuevos enfoques preventivos más que correctivos, considerando un cambio individual y colectivo para el fomento de una conexión profunda con el planeta.

Palabras clave: Sympoiesis Humana, Hábitat, Ecología humana, Participación social, Transdisciplina.

Abstract: In recent decades, urban development has been driven primarily by economic factors, resulting in a persistent fracture between individuals and their surroundings. This has led to the creation of spaces that fail to provide integral habitability and, consequently, a genuine connection with ecosystems. The prevailing methodologies (urban–architectural and object-based), while aiming for efficiency, continue to reinforce this disconnection.

Considering this crisis, the present project emerges from a proposal focused on a paradigm shift through the concept of **Human Sympoiesis**, understood as a process of “making-with” and co-creation. This concept, derived from the work of **Donna Haraway**, posits that co-construction occurs through the close relationships among all entities inhabiting the planet—both human and non-human—through dynamic interactions.

The purpose of this research is to outline the theoretical and epistemic/methodological foundations for the projectual co-creation of habitats that integrate the human and the non-human. This involves developing tools that enable the identification and promotion of sympoietic processes within habitat design, shifting from a paradigm of “designing for” to one of “making with.” From this perspective, the project seeks to establish new **preventive rather than corrective** approaches, fostering both individual and collective transformation toward a deeper connection with the planet.

Keywords: Human Sympoiesis, Habitat, Human Ecology, Social Participation, Transdisciplinarity.

1. Introducción

El presente avance en investigación tiene como objetivo generar reflexiones y esbozar una aproximación hacia posibilidades que ayuden a conectar con otras maneras de crear y diseñar nuestro hábitat. Estas posibilidades son marcadas dentro de un espectro ya explorado el cual es abonado por Donna Haraway [1], la cual, ha señalado que la posibilidad de seguir con el problema, aceptándolo y tomando las riendas de la situación es el camino pertinente en determinado momento a nivel planetario. Por ello, el borrador que se comienza a crear es a partir de la dinámica que proporciona el término “hacer-con”, sin embargo, para poder lograr estas intervenciones es preciso identificar que nos detiene y ata a seguir no solo construyendo de manera física nuestro hábitat, sino de qué modo podemos conceptualizar y ser más receptivos a con nuestro planeta.

Parte de estas inquietudes surgen con preguntas como: ¿Las metodologías actuales están conectando con nuestra relación con el ecosistema? Y si exploramos un poco más, ¿Qué criterios han sido señalados y no incluidos dentro de las metodologías previamente descritas? ¿Cuáles son estos vacíos o apartados que se visualizan, pero no conectan del todo? Las cuales dieron dirección a encontrar una muestra de metodologías que exhiban parte de las ataduras conceptuales y técnicas que pueden imposibilitar un poco no contemplar otros parámetros en la realización del hábitat y la vinculación con otras especies.

Es notorio que contemporáneamente la construcción del hábitat es cada vez más lejana de ser un proceso consciente y relacionado con el planeta y sobre todo con la multi-especie. Las conexiones con nuestro hábitat son vitales para nuestra supervivencia, la escala con la cual construimos y consumimos nos aparta de este orden natural, el cual nos vio crecer y desarrollarnos, no hemos pagado con una moneda justa la innovación y avance tecnológico [3]; es momento de retomar el camino hacia una vinculación más estrecha con nuestro planeta, tomando en cuenta quienes somos y dialogando con lo no humano, no solo para entenderlo, sino para construir juntos nuevos horizontes. Para ello, el presente artículo se estructura de la siguiente manera: primero, se describen los materiales y el método de análisis crítico; segundo, se presentan los resultados de la deconstrucción de cuatro metodologías dominantes; tercero, se discuten las implicaciones de estos hallazgos a la luz de la teoría crítica; y finalmente, se concluye con una propuesta de 'rectificación' metodológica.

2. Materiales y Métodos

La investigación se desarrolla bajo una metodología de Análisis Teórico-Crítico, adjuntando un proceso deconstructivo hermenéutico, ya que se desea revelar la ideología oculta en ellas. La selección de metodologías que construyen nuestro hábitat ya sea en el sector privado o público fueron en este caso seleccionadas por su nivel de participación en el ramo de la tecnología, de manera escalar poder ir revisando las causalidades que estas alternativas y otras disponibles con otro énfasis también puedan construir. De tal modo que la muestra inicial exhibe de manera muy puntual las metodologías que ubican al ser humano como un dato, una cuantificación y sobre todo una justificación dentro de un orden económico para poder realizar el objeto arquitectónico o espacial [2].

Los "materiales" seleccionados para este análisis crítico son las siguientes cuatro metodologías:

- **Diseño Paramétrico y Generativo** (Parametric and Generative Design)
- **Sintaxis Espacial** (Space Syntax)
- **Modelado de Información de Construcción** (Building Information Modeling - BIM)
- **Análisis Urbano Basado en Datos** (Data-Driven Urbanism)

3. Discusión

Nuestros entornos están en constante cambio, no solo crecen las ciudades a un ritmo vertiginoso, y quienes han consolidado ese crecimiento, no precisamente son los profesionistas, que actualmente inundan el mercado, es parte de un sistema el cual da cabida a quien sea dueño de tierra para poder maximizar los espacios con los cuales el humano interactúa y reside [18].

Si bien podemos ahondar en más preguntas, se comienza a explorar una dicotomía, la cual se proyecta en los problemas comunes que ya se tienen y las posibilidades que podríamos ingresar para lograr cambios pertinentes. Entonces, ¿A quién debemos atribuir un proceso de repensar en el cómo habitamos? ¿ha faltado trabajo en conjunto con raíz en lo educativo y lo público? Si bien podemos ir trazando rutas con cuestionamientos, es importante señalar que ya hay autoras que nos han mostrado parcialidades,

acercamientos y reflexiones para acceder poco a poco a soluciones que probablemente antes no se contemplaban, o en su defecto, estaban en otras disciplinas. Es aquí cuando se recurre al concepto de “seguir con el problema” de Donna Haraway [19] el cual habla acerca de las consideraciones que se podrían atender para *seguir enfrentando los problemas actuales*. Si bien se han desarrollado multiplicidad de soluciones, estas han sido para intentar abatir en su totalidad el problema raíz, y en algunos casos puede que sea pertinente, sin embargo, en otros, las salidas han sido diversas. Esto incluye los procesos del hábitat, el cómo vivimos o queremos vivir, y todas las percepciones impuestas que señalan modos de vida, actitudes y consumo dentro de directrices preestablecidas por un sistema, sistema que no considera la riqueza social del usuario, sino que le vectoriza, agrupa y utiliza para poder desencadenar nuevas vías de consumo desmedido.

Es de vital importancia que, al referir a los métodos citados y criticarlos desde una postura muy puntual sobre como plantean el desarrollo en la ciudad y la aplicación de la tecnología, no se está haciendo predilecta la idea de una conversión hacia lo rural, se persigue el modo con el cual puede vincularse otro tipo de desarrollo, cada vez más conectado con el ecosistema y utilizar a bien común estas y otras metodologías. Se tienen por ejemplo el diseño paramétrico, **la eficiencia es percibida como un orden**, Sintaxis Espacial, **El humano es calculado, gestionado y encausado sin interacciones espontaneas todo es anticipado y controlado para su máxima eficiencia**. La metodología BIM: **Los datos convergen y se materializan, crean desde lo económico y no desde lo humano**. Por último, el análisis Urbano basado en datos: **La ciudad es vista como un algoritmo que vigila, cuantifica y utiliza la circulación y el consumo para autoproducirse**. Al reflexionar y referir de manera crítica a cada una de las metodologías enunciadas se puede constatar que existe un vacío dentro de ellas, se toman la serie de pasos para realizar el proyecto, sin embargo, no se exhibe el alcance real, en este caso el análisis del usuario, por tal motivo, *se espera indagar en las conexiones necesarias para que estas metodologías y el uso de herramientas evolucione a pro del usuario*.

Cada desarrollo tecnológico impulsado mundialmente por diversos acontecimientos sociales, ideas y comercio, han catalizado muchos de los procesos con los cuales hoy en día se disfrutan; lo que no se ha percibido en su totalidad es el modo con el cual se ha hecho. Esta evolución dentro del hábitat ha sido generada con aristas que lucen distantes a nuestras conexiones con el medio ambiente. ¿Son los procesos actuales, parte del problema en función de nuestra poca cercanía y entendimiento con el ecosistema? Y no solo eso, ¿de qué manera se considera hoy en día al ecosistema dentro de los proyectos en creación de objetos urbano-arquitectónicos?

Pareciera que cada proyecto realizado es parte de un embellecimiento urbano estético, de tal modo que las ciudades compiten por la exacerbación en puntos de interés, los cuales, están enfocados en las personas, pero no les benefician en un cierto porcentaje. La ciudad está mutando, se está parchando, y se aísla a sí misma con cada nuevo edificio, colisiona, se hace más confusa su modo de vivir y sobre todo, su estudio.

De poder ubicar problemas relacionados con estas expansiones desmedidas, se ha identificado que parte de estas alteraciones y lejanías metodológicas han sido provenientes de discursos de poder político y control. Parte de esta **biopolítica** (la cual está inmersa en cierto porcentaje en cada metodología previamente descrita) y la gestión pública en la transmutación del humano a un dato, se puede observar claramente que los *sistemas que van creando los entornos* están evocados en la *administración de la vida misma* y van encarrilando esta misma administración hacia canaletas de consumo y estilo de vida, la cual está proliferando en las ciudades. Ahora los sistemas buscan *gestionar, optimizar y hacer productiva a la población*, comenzando con el individuo y mejorando su recaudación con los nichos sociales [20]. Es allí cuando se hace notoria la biopolítica, y es cuando el ser humano pasa a ser una base estadística para la autoconstrucción ficticia de deseos, los cuales se *venden como necesidades*. De citar un ejemplo claro el *Análisis urbano basado en datos*, arraigado estrechamente con los procesos biopolíticos de construcción en el espacio urbano facilitan esta “utilización del humano” y como ya se ha mencionado, adquiere un sentido totalmente apartado de las conexiones ecosistémicas que se necesitan el día de hoy.

Al determinar un origen del problema (ya que podrían ser varios), entendemos que la opresión directa que ejercen estos sistemas va hacia un “arte de gobernar”, el cual se enfoca en las conductas y patrones que surgen en el entorno de manera sutil. Este sistema utiliza tan bien los datos, que dirige a los ciudadanos a estos nichos del consumo; si bien, el sistema principal del capital hoy en día es algo que no podemos erradicar de inmediato, es pertinente hablar sobre cómo se podría jugar con él, por ello, el sistema predice que entornos son los más adecuados para poder direccionar a las personas hacia su fuente de consumo. Con esta vectorización el análisis que puede surgir de la “riqueza social” que está presente en cada asentamiento urbano, va excluyéndose poco a poco, de tal manera que lo “nuevo” brilla como este faro de luz de crecimiento y estilo que se “necesita adquirir”. Esta riqueza social, para su análisis es probable que no lleve tiempo, encontrar las conexiones que nos hacen tan distintos en una ciudad y el cómo la experimentamos, es lo que no se ajusta en tiempos con los sectores públicos y privados, de tal modo que los sistemas alimentados por datos proporcionan una “neutralidad falsa” a la hora de hacer proyectos dentro

de una categoría *social*. Entender eso es vital para la investigación, ya que diversas alternativas que puede tomar el Gobierno Federal a simple vista usan recursos que, desde disciplinas como la sociología, trabajo social e inclusive la antropología son mencionados, la cuestión que surge de esto es ¿son realmente aplicadas para la construcción del entorno habitable en la ciudad?

El termino hábitat, si bien proviene en raíz desde la biología, esta es definida por la RAE [21] como “lugar de condiciones apropiadas para que viva un organismo, especie o comunidad animal o vegetal”. Ahora bien, en una previa aproximación, se puede iniciar con la acepción que también genera la RAE con la cual adjunta al urbanismo para crear esta definición: **"Espacio construido en el que vive el hombre"**. Por tal motivo, la critica que se genera en esta investigación es hacia las modalidades con las que el sistema se desenvuelve y modifica el hábitat, operando en el simplismo de enfocarse en que es un “espacio construido”, un simple objeto o bien, un contenedor en el cual puedo ir modificando espacios según sea conveniente para el sistema.

En respuesta a estos enfoques cuantificables y ajenos al humano, **Henri Lefebvre** [22] argumenta que el *espacio no es un contenedor pasivo y al no serlo está menos definido por el espacio físico* (lo cual es una de las referencias que se toma desde la arquitectura y la planificación urbana) y es más un acto de “habitar” la cual, es una práctica social compleja. Esta *apropiación del espacio*, experimentada en primer lugar por quien reside allí, los llenan de diversos Significados, todo resultante de sus interacciones próximas, que, si bien son alteradas por los nuevos desarrollos, algunas resisten a estos cambios y se mantienen o se adaptan (la charla de vecinos en las banquetas), en el peor de los casos son desplazadas y extinguidas (tiendas de colonia). Se vuelve importante esclarecer esta definición dentro de la investigación para resaltar nuevamente las dimensiones del producto social, el cual incluye La **vivienda** (lo privado), El **espacio público** (lo colectivo), Las **infraestructuras** (servicios, movilidad), Las **relaciones sociales, económicas y culturales** que *producen y dan sentido* a ese espacio construido. Hemos transitado de una sociedad de disciplina, basada en el encierro (la fábrica, la escuela), a una **sociedad de control**, donde el control es abierto, continuo y se ejerce a través de los datos que generamos voluntariamente [23].

Muchos estudios sobre entender la ciudad se han desarrollado en siglos pasados, unos han puesto atención a las interacciones otros a las materialidades, otros a la relación de ambas. Como bien ya se ha mencionado, el punto de partida que se toma es la modificación de esta misma a partir del sistema, adjudicando la “transformación y apariencia de la ciudad” a un orden **económico**, el cual dicta la zonificación de cada parte en ella. Esta expansión de la

ciudad de manera desmedida y poco planificada hace que “se parche y aisle a sí misma” lo cual son síntomas de un **urbanismo neoliberal**, cuya lógica principal es tratar el espacio urbano no como un hogar o un bien común (valor de uso), sino como un activo financiero para la especulación (valor de cambio). Cuando se habla sobre *fragmentación urbana*, tanto el capital como lo político operan de manera conjunta para la reconfiguración de la ciudad como una frontera para la acumulación, identificando áreas para la “renovación”, excluyendo o marginando a comunidades existentes con lo que crean enclaves aislados de riqueza [24].

Este modelo que opera en la planificación “integral” se reemplaza rápidamente por el proyecto individualista. Cada nuevo desarrollo, ya sea edificio, corredor comercial, verticalidades o fraccionamientos de lujo, lo cual promueve esta alta estética en ciertas zonas, tiende a funcionar como un archipiélago en la ciudad, donde cada isla es una inversión individualista totalmente desconectada a con un tejido social y evidentemente ecológico que le rodea. Tomando de referencia las metodologías BIM y el Diseño paramétrico son parte importante del modelo, ya que promueven la gestión y ejecución a gran escala de proyectos urbano-arquitectónicos complejos, lo cual *asegura la viabilidad inversores*.

Con esta ciudad *parchada, aislada, llena de corredores encausados al consumo*, se hace evidente una perspectiva fresca que pueda ir modelando nuevas maneras de pensar y reclamar **el derecho a la ciudad** [25]. Los sistemas de poder y control que utiliza metodologías de diseño para optimizar el capital, tratando al humano como un dato y rompiendo la relación con el ecosistema deben ser intercambiadas para la unificación, dentro de lo posible, con nuestro ecosistema. Lo cual gesta lo siguiente: ¿Cuál será el alcance de estas reflexiones y sobre todo, en quien recae la tarea de tal participación para la creación de un hábitat más consciente?

4. Discusión

Nuestros entornos están en constante cambio, no solo crecen las ciudades a un ritmo vertiginoso, y quienes han consolidado ese crecimiento, no precisamente son los profesionistas, que actualmente inundan el mercado, es parte de un sistema el cual da cabida a quien sea dueño de tierra para poder maximizar los espacios con los cuales el humano interactúa y reside [18]. Si bien podemos ahondar en más preguntas, se comienza a explorar una *dicotomía*, la cual se proyecta en los problemas comunes que ya se tienen y las posibilidades que podríamos ingresar para lograr cambios pertinentes. Entonces, ¿A quién debemos atribuir un proceso de repensar en el cómo habitamos? ¿ha faltado trabajo en conjunto con raíz en lo educativo y lo público? Si bien

podemos ir trazando rutas con cuestionamientos, es importante señalar que ya hay autoras que nos han mostrado parcialidades, acercamientos y reflexiones para acceder poco a poco a soluciones que probablemente antes no se contemplaban, o en su defecto, estaban en otras disciplinas. Es aquí cuando se recurre al concepto de “seguir con el problema” de Donna Haraway [19] el cual habla acerca de las consideraciones que se podrían atender para *seguir enfrentando los problemas actuales*. Si bien se han desarrollado multiplicidad de soluciones, estas han sido para intentar abatir en su totalidad el problema raíz, y en algunos casos puede que sea pertinente, sin embargo, en otros, las salidas han sido diversas. Esto incluye los procesos del hábitat, el cómo vivimos o queremos vivir, y todas las percepciones impuestas que señalan modos de vida, actitudes y consumo dentro de directrices preestablecidas por un sistema, sistema que no considera la riqueza social del usuario, sino que le vectoriza, agrupa y utiliza para poder desencadenar nuevas vías de consumo desmedido.

Es de vital importancia que, al referir a los métodos citados y criticarlos desde una postura muy puntual sobre como plantean el desarrollo en la ciudad y la aplicación de la tecnología, no se está haciendo predilecta la idea de una conversión hacia lo rural, se persigue el modo con el cual puede vincularse otro tipo de desarrollo, cada vez más conectado con el ecosistema y utilizar a bien común estas y otras metodologías. Se tienen por ejemplo el diseño paramétrico, *la eficiencia es percibida como un orden*, Sintaxis Espacial, *El humano es calculado, gestionado y encausado sin interacciones espontaneas todo es anticipado y controlado para su máxima eficiencia*. La metodología BIM: *Los datos convergen y se materializan, crean desde lo económico y no desde lo humano*. Por último, el análisis Urbano basado en datos: *La ciudad es vista como un algoritmo que vigila, cuantifica y utiliza la circulación y el consumo para autoproducirse*. Al reflexionar y referir de manera crítica a cada una de las metodologías enunciadas se puede constatar que existe una vacío dentro de ellas, se toman la serie de pasos para realizar el proyecto, sin embargo, no se exhibe el alcance real, en este caso el análisis del usuario, por tal motivo, *se espera indagar en las conexiones necesarias para que estas metodologías y el uso de herramientas evolucione a pro del usuario*.

Cada desarrollo tecnológico impulsado mundialmente por diversos acontecimientos sociales, ideas y comercio, han catalizado muchos de los procesos con los cuales hoy en día se disfrutan; lo que no se ha percibido en su totalidad es el modo con el cual se ha hecho. Esta evolución dentro del hábitat ha sido generada con aristas que lucen distantes a nuestras conexiones con el medio ambiente. ¿Son los procesos actuales, parte del problema en función de nuestra

poca cercanía y entendimiento con el ecosistema? Y no solo eso, ¿de qué manera se considera hoy en día al ecosistema dentro de los proyectos en creación de objetos urbano-arquitectónicos? Pareciera que cada proyecto realizado es parte de un embellecimiento urbano estético, de tal modo que las ciudades compiten por la exacerbación en puntos de interés, los cuales, están enfocados en las personas, pero no les benefician en un cierto porcentaje. La ciudad está mutando, se está parchando, y se aísla a sí misma con cada nuevo edificio, colisiona, se hace más confusa su modo de vivir y sobre todo, su estudio. De poder ubicar problemas relacionados con estas expansiones desmedidas, se ha identificado que parte de estas alteraciones y lejanías metodológicas han sido provenientes de discursos de poder político y control (Fig. 1).

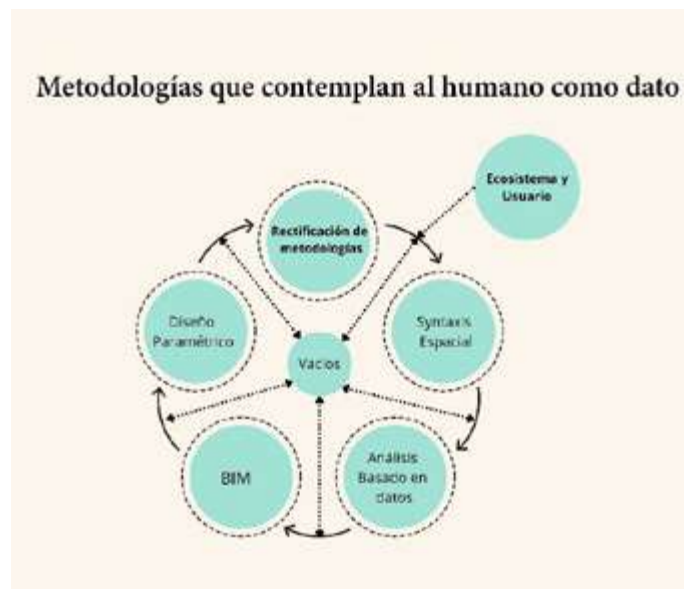


Figura 1. Visualización en los procesos y vacíos dentro de las metodologías analizadas y los ciclos con los cuales se debe rectificar. Elaboración propia.

Parte de esta *biopolítica* (la cual está inmersa en cierto porcentaje en cada metodología previamente descrita) y la gestión pública en la transmutación del humano a un dato, se puede observar claramente que los *sistemas que van creando los entornos* están evocados en la *administración de la vida misma* y van encarrilando esta misma administración hacia canaletas de consumo y estilo de vida, la cual está proliferando en las ciudades. Ahora los sistemas buscan *gestionar, optimizar y hacer productiva a la población*, comenzando con el individuo y mejorando su recaudación con los nichos sociales [20]. Es allí cuando se hace notoria la biopolítica, y es cuando el ser humano pasa a ser una base estadística para la autoconstrucción ficticia de deseos, los cuales se *venden como necesidades*. De citar un ejemplo claro el *Análisis urbano basado en datos*, arraigado estrechamente con los procesos biopolíticos de construcción en el espacio urbano facilitan esta “utilización del humano”

y como ya se ha mencionado, adquiere un sentido totalmente apartado de las conexiones ecosistémicas que se necesitan el día de hoy. Al determinar un origen del problema (ya que podrían ser varios), entendemos que la opresión directa que ejercen estos sistemas va hacia un “arte de gobernar”, el cual se enfoca en las conductas y patrones que surgen en el entorno de manera sutil. Este sistema utiliza tan bien los datos, que dirige a los ciudadanos a estos nichos del consumo; si bien, el sistema principal del capital hoy en día es algo que no podemos erradicar de inmediato, es pertinente hablar sobre cómo se podría jugar con él, por ello, el sistema predice que entornos son los más adecuados para poder direccionar a las personas hacia su fuente de consumo. Con esta vectorización el análisis que puede surgir de la “riqueza social” que está presente en cada asentamiento urbano, va excluyéndose poco a poco, de tal manera que lo “nuevo” brilla como este faro de luz de crecimiento y estilo que se “necesita adquirir”. Esta riqueza social, para su análisis es probable que no lleve tiempo, encontrar las conexiones que nos hacen tan distintos en una ciudad y el cómo la experimentamos, es lo que no se ajusta en tiempos con los sectores públicos y privados, de tal modo que los sistemas alimentados por datos proporcionan una “neutralidad falsa” a la hora de hacer proyectos dentro de una categoría *social*. Entender eso es vital para la investigación, ya que diversas alternativas que puede tomar el Gobierno Federal a simple vista usan recursos que, desde disciplinas como la sociología, trabajo social e inclusive la antropología son mencionados, la cuestión que surge de esto es ¿son realmente aplicadas para la construcción del entorno habitable en la ciudad?

El termino hábitat, si bien proviene en raíz desde la biología, esta es definida por la RAE [21] como “lugar de condiciones apropiadas para que viva un organismo, especie o comunidad animal o vegetal”. Ahora bien, en una previa aproximación, se puede iniciar con la acepción que también genera la RAE con la cual adjunta al urbanismo para crear esta definición: “*Espacio construido en el que vive el hombre*”. Por tal motivo, la crítica que se genera en esta investigación es hacia las modalidades con las que el sistema se desenvuelve y modifica el hábitat, operando en el simplismo de enfocarse en que es un “espacio construido”, un simple objeto o bien, un contenedor en el cual puedo ir modificando espacios según sea conveniente para el sistema. En respuesta a estos enfoques cuantificables y ajenos al humano, *Henri Lefebvre* [22] argumenta que el *espacio no es un contenedor pasivo y al no serlo está menos definido por el espacio físico* (lo cual es una de las referencias que se toma desde la arquitectura y la planificación urbana) y es más un acto de “habitar” la cual, es una práctica social compleja. Esta *apropiación del espacio*, experimentada en primer lugar por quien reside allí, los llenan de diversos

Significados, todo resultante de sus interacciones próximas, que, si bien son alteradas por los nuevos desarrollos, algunas resisten a estos cambios y se mantienen o se adaptan (la charla de vecinos en las banquetas), en el peor de los casos son desplazadas y extinguidas (tiendas de colonia). Se vuelve importante esclarecer esta definición dentro de la investigación para resaltar nuevamente las dimensiones del producto social, el cual incluye *La vivienda* (lo privado), *El espacio público* (lo colectivo), *Las infraestructuras* (servicios, movilidad), *Las relaciones sociales, económicas y culturales* que *producen y dan sentido* a ese espacio construido.

Hemos transitado de una sociedad de disciplina, basada en el encierro (la fábrica, la escuela), a una *sociedad de control*, donde el control es abierto, continuo y se ejerce a través de los datos que generamos voluntariamente [23]. Muchos estudios sobre entender la ciudad se han desarrollado en siglos pasados, unos han puesto atención a las interacciones otros a las materialidades, otros a la relación de ambas. Como bien ya se ha mencionado, el punto de partida que se toma es la modificación de esta misma a partir del sistema, adjudicando la “transformación y apariencia de la ciudad” a un orden *económico*, el cual dicta la zonificación de cada parte en ella. Esta expansión de la ciudad de manera desmedida y poco planificada hace que “se parche y aisle a sí misma” lo cual son síntomas de un *urbanismo neoliberal*, cuya lógica principal es tratar el espacio urbano no como un hogar o un bien común (valor de uso), sino como un activo financiero para la especulación (valor de cambio). Cuando se habla sobre *fragmentación urbana*, tanto el capital como lo político operan de manera conjunta para la reconfiguración de la ciudad como una frontera para la acumulación, identificando áreas para la “renovación”, excluyendo o marginando a comunidades existentes con lo que crean enclaves aislados de riqueza [24]. Este modelo que opera en la planificación “integral” se reemplaza rápidamente por el proyecto individualista. Cada nuevo desarrollo, ya sea edificio, corredor comercial, verticalidades o fraccionamientos de lujo, lo cual promueve esta alta estética en ciertas zonas, tiende a funcionar como un archipiélago en la ciudad, donde cada isla es una inversión individualista totalmente desconectada a con un tejido social y evidentemente ecológico que le rodea. Tomando de referencia las metodologías BIM y el Diseño paramétrico son parte importante del modelo, ya que promueven la gestión y ejecución a gran escala de proyectos urbano-arquitectónicos complejos, lo cual *asegura la viabilidad inversores*. Con esta ciudad *parchada, aislada, llena de corredores encausados al consumo*, se hace evidente una perspectiva fresca que pueda ir modelando nuevas maneras de pensar y reclamar *el derecho a la ciudad* [25]. Los sistemas de poder y control que utiliza

metodologías de diseño para optimizar el capital, tratando al humano como un dato y rompiendo la relación con el ecosistema deben ser intercambiadas para la unificación, dentro de lo posible, con nuestro ecosistema. Lo cual gesta lo siguiente: ¿Cuál será el alcance de estas reflexiones y sobre todo, en quien recae la tarea de tal participación para la creación de un hábitat más consciente?

5. Conclusiones

Las constantes modificaciones en el espacio urbano han sido promovidas por intereses biopolíticos, sin embargo, se ha identificado esta ceguera metodológica, con la cual se da por hecho que dichas alternativas que vinculan no sólo los procesos creativos y de conceptos, sino apartados técnicos y de documentación minimizan criterios que, al ser considerados con una participación más estrecha a con quien diseña, los resultados serían totalmente diferentes. Esta panorámica que se comienza a establecer nos aproxima a un entendimiento sobre la configuración posible del hábitat, dicha posibilidad radica en conexiones y maneras de integrar al ecosistema de modo más estrecho, no apartándolo, sino trabajando con él, por lo que la revisión de la muestra metodológica ayudo a identificar las relaciones que tiene actualmente las metodologías y su vínculo con el medio ambiente y el usuario.

Parte del crecimiento de las ciudades ha traído consecuencias a la salud pública, eso sin contar el desarrollo industrial con las que cuentan algunas ciudades en nuestro país, y la más notoria y reciente, la pandemia del 2020 que aquejo a todo el planeta. Estos puntos de infección han promovido que se ajusten prácticas para nuestro habitar, si bien muchos no las acataron hubo otros tantos que sí. Considerando al antropocentrismo y la configuración que ha ejercido, las ciudades están construidas para los humanos, encapsulamos lo natural, lo orillamos a los subsuelos o a periferias, los excluimos, y a pesar de esto, las ciudades responden no solo a nosotros como especie, sino a nuestros objetos, siendo uno de los principales, el auto. Las consideraciones de movilidad que se han realizado han configurado la flora y la fauna en nuestras ciudades, las cuales ya no son una parte de mitigación de calor, por dar un ejemplo, y que estas pasan ahora a ser parte de una Ladscape para redes sociales.

Se determinó en esta investigación que las metodologías citadas cuentan con “vacíos”, dicho término se considera como parte de que un parámetro se menciona, pero no se llena ni utiliza de manera pertinente para los propósitos que actualmente nos aquejan en el plano urbano. Si bien el problema ha sido identificado en que algunas de las metodologías sus niveles más altos en interacción son hacia

al sistema y no al humano y mucho menos al ecosistema, queda claro que se necesita una reinterpretación de las acciones que algunas metodologías toman. El origen es entender con lo que se ha trabajado, analizar como ya se hizo y determinar los alcances, detectar los vacíos y comenzar a trabajar en ello.

Para dicha configuración parte de la detección de:

- Metodologías que consideren al usuario, pero lo cuantifiquen como dato o estadística.
- Los alcances que persiguen las metodologías, exhibiendo el propósito y función.
- Las herramientas con las cuales opera, ya que estas pueden estar dirigidas hacia la cuantificación y no la exploración estrecha a con la persona.

Una vez detectado esto a modo general y en esta etapa de la investigación, los anexos posibles a incrementar van en función de los procesos que no se han llenado del todo. Al seguir con este llenado mas consciente en los procesos, la dinámica de promover una rectificación a algunas de las metodologías debe ser pertinente a su realización, no se obvian los procesos económicos actuales, sin embargo, las inversiones económicas deben ejecutarse como parte de los activos, y también deberían volcar su mirada a ser democráticas con el medio ambiente y con las personas.

Posteriormente, nuestro primer esbozo consiste en la construcción de reflexiones que coadyuven a integrar al ecosistema, las especies y a nosotros, en los procesos metodológicos para transformar el hábitat actual y pensar proactivamente en cómo será este hábitat en un futuro, por ejemplo:

- Coexistencia – humano y ecosistema (multiespecie)
- Ubicación espacial del ecosistema y el desarrollo humano.
- Reformulación en la participación y rol del humano como especie dentro de un ecosistema co creado.
- La academia como impulsor en las rectificaciones metodológicas.

Es importante visualizar estas posibilidades, no en el resultado, aún, sino en las aproximaciones que pueda esta rectificación hacer. Propuestas para una rectificación metodológica: se tendrían que establecer parámetros que ayuden a ejecutarla de una manera cercana al usuario y que los demás medios actúen como promotores de eficiencia sobre el análisis cercano al usuario y sus interacciones. Por tal motivo se puede señalar que:

- La rectificación metodológica se ajusta a partir de ubicar en un punto central al ecosistema, vinculando al usuario las especies y las dinámicas que se le puedan desprender.
- Los procesos tecnológicos pasarán ser un apoyo en la ejecución técnica del proyecto, no en la virtualización del usuario, sus dinámicas y la alteración del ecosistema.
- Los vacíos que existan en las metodologías existentes deberán ser consideradas como oportunidades para adjuntar procesos que vinculen al ecosistema sus especies y al humano.
- La cercanía a con otras disciplinas será crucial ya que se espera adjuntar propósitos humanos o ecológicos que permeen al desarrollo cultural y social de manera paulatina.

Para poder afrontar estas rectificaciones, es preciso recordar que el antropoceno ya no resulta funcional, cada una de las características previamente descritas, deberá funcionar en ecologías sociales que inciten a vincularnos y a gestar nuevas maneras no solo de construir sino también de pensar el hábitat. Determinar un sentido común es vital para esta rectificación, ya que, si solo se aíslan los conceptos para trabajarlos, no se tendrá el esperado resultado integral que busca adjuntar los procesos en una posible calidad de vida mas cercana al ecosistema y el uso pertinente del territorio, de sus objetos, materiales. El cambio radica en las oportunidades que no debemos dejar pasar, para con eso, transformar nuestras realidades en pro del ecosistema y la multiespecie.

Referencias bibliográficas

[1] Haraway, D. (2016). *Staying with the Trouble: Making Kin in the Chthulucene*. Duke University Press.

[2] Arquine. (2018, noviembre 26). *Arquitectura especulativa: Conversación con Hernán Díaz Alonso*. Recuperado de <https://arquine.com/arquitectura-especulativa-conversacion-con-herman-diaz-alonso/>

[3] Ichioka, S., & Pawlyn, M. (2021). *Flourish: Design Paradigms for Our Planetary Emergency*. Triarchy Press.

[4] Sassen, S. (2011). *Ciudad y globalización*. Quito: OLACCHI.

[5] Gómez Reséndiz, E., Aguillón Robles, J., & Guerrero Salinas, M. (2017). *Diseño Paramétrico hacia una Arquitectura Sostenible*. En *Seguimiento de la Inserción del Egresado en el Ejercicio de la Profesión* (pp. 237–242). Asociación de Instituciones de Enseñanza de la Arquitectura de la República Mexicana, A. C.

[6] Aguillón Robles, J., & Guerrero-Salinas, M. (2017). El

diseño paramétrico en la arquitectura contemporánea: Teoría, práctica y aplicación en el desarrollo de nuevos productos. Facultad del Hábitat, Universidad Autónoma de San Luis Potosí. Recuperado de https://www.academia.edu/38571536/EL_DISEÑO_PARAMETRICO_EN_LA_ARQUITECTURA_CONTEMPORANEA [academia.edu]

[7] Hillier, B., & Hanson, J. (1984). *The Social Logic of Space*. Cambridge University Press.

[8] Yepes Arias, L., & Salazar Martínez, S. M. (2020). *Criterios de intervención en el espacio público a través del urbanismo táctico para mejorar los parámetros de confort e incremento de las interacciones sociales. Aplicación en el Barrio Belén La Palma de Medellín* (Trabajo de grado). Universidad Pontificia Bolivariana. Recuperado de <https://repository.upb.edu.co/handle/20.500.11912/7476> [repository...upb.edu.co]

[9] Alvarez, A. A., & Ripoll-Meyer, M. V. (2020). *Propuesta para la implementación de la metodología BIM en una experiencia áulica orientada a la sustentabilidad edilicia*. *Hábitat Sustentable*, 10(1), 32–43. <https://doi.org/10.22320/07190700.2020.10.01.03>

[10] Zavala, D. (2024, 21 de febrero). *El Gobierno de México oficializa la metodología BIM en la obra pública*. *Obras*. <https://obras.expansion.mx/infraestructura/2024/02/21/gobierno-de-mexico-oficializa-metodologia-bim-obra-publica>

[11] Rodríguez Gamboa, F., Álvarez Romero, S., & Gómez, M. (2023). *Análisis de estrategias nacionales de implementación BIM, para la creación de un marco de referencia para la implementación de BIM en México*. *Revista Ingeniería de Construcción*, 38(3). <https://doi.org/10.7764/ric.00078.21>

[12] Townsend, A., & Zambrano-Barragán, P. (2019). *Tactical Urbanism: Reivindicando la participación y el uso de los espacios públicos*. En J. Hernández Araque (Ed.), *Urbanismo táctico: Reivindicando la participación y el uso de los espacios públicos* (pp. 1–25). ASTRÁGALO. *Cultura de la Arquitectura y de la Ciudad*, 30. <https://dx.doi.org/10.12795/astragalo.2022.i30.12> [pdfs.seman...cholar.org]

[13] Carmona Ruiz, A. (2022). *Urbanismo táctico: Reivindicando la participación y el uso de los espacios públicos*. *Astrágalo. Cultura de la Arquitectura y de la Ciudad*, (30), 1–25. <https://dx.doi.org/10.12795/astragalo.2022.i30.12> [pdfs.seman...cholar.org]

[14] Greenfield, A. (2013). *Against the smart city*. New York: Do projects.

[15] Mattern, S. (2017). *A city is not a computer*. *Places Journal*. Recuperado de <https://placesjournal.org/article/a-city-is-not-a-computer/>

[16] Zuboff, S. (2019). *The Age of Surveillance Capitalism: The Fight for a Human Future at the New Frontier of Power*.

PublicAffairs.

[17] Kitchin, R. (2014). The real-time city? Big data and smart urbanism. *GeoJournal*, 79(1), 1–14. <https://doi.org/10.1007/s10708-013-9479-9>

[18] **Brenner, N., & Theodore, N.** (Eds.). (2003). *Spaces of neoliberalism: Urban restructuring in North America and Western Europe*. Oxford: Blackwell Publishing.

[19] Haraway, D. (2016). *Staying with the Trouble: Making Kin in the Chthuluceno*. Duke University Press.

[20] Foucault, M. (2007). *Nacimiento de la biopolítica: Curso en el Collège de France (1978-1979)*. Fondo de Cultura Económica.

[21] Real Academia Española. (n.d.). Hábitat. En *Diccionario de la lengua española*. Consultado el 22 de octubre de 2025, de <https://dle.rae.es/h%C3%A1bitat>

[22] Lefebvre, H. (1974). *La producción del espacio*. Capitán Swing Libros. (Obra original publicada en 1974).

[23] Deleuze, G. (1992). Post-scriptum sur les sociétés de contrôle. En *Pourparlers* (pp. 240-247). Les Éditions de Minuit.

[24] Harvey, D. (2013). *Ciudades rebeldes: Del derecho a la ciudad a la revolución urbana*. Ediciones Akal.

[25] Lefebvre, H. (1968). *Le Droit à la ville*. Éditions Anthropos.

“Síntesis de Membrana de Quitosano /Quitosano-GMA por Electrohilado como soporte de Neomicina”

“Synthesis of Chitosan/Chitosan-GMA Membrane by Electrospinning as a Neomycin Support”

Luna-Solache, Luisa F., Guerra Balcázar, Minerva., Mora-Muñoz, Moroni y Pérez-Moreno, T.

División de Investigación y Posgrado, Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Querétaro

Carr. a Chichimequillas s/n Ejido Bolaños 76140, Santiago de Querétaro, Qro. México.

lunasolluisa@gmail.com, minbalca@yahoo.com.mx

Resumen: Los nanomateriales se presentan como alternativa para la regeneración tisular y la liberación controlada de fármaco. Dentro de estos materiales, las nanofibras se presentan como una alternativa para la regeneración, debido a sus propiedades como una alta tasa en la relación área superficial contra el volumen de material, sus excelentes propiedades mecánicas, y la versatilidad en la integración de materiales varios en su composición. Este trabajo explora la fabricación y caracterización de membranas formadas por nanofibras obtenidas por la técnica de electrohilado. Se utilizó quitosano, quitosano modificado con metacrilato de glicidilo (Q-GMA) y un núcleo de alcohol polivinílico (PVA) cargado con 0.5% p/p de neomicina. Se realizó la caracterización fisicoquímica y mecánica del material con el fin de evaluar sus propiedades para su posible aplicación en el tratamiento de heridas agudas y crónicas. A través de SEM se corroboró la formación de las nanofibras con diámetros de aproximadamente 120 nm y perlado al incorporarse el fármaco en la formulación. De igual forma la composición se analizó mediante la técnica de ATR-FTIR, donde se observó la correcta obtención del quitosano modificado, la presencia del PVA y de la neomicina en las nanofibras formadas. Las propiedades mecánicas del material, las cuales se sugiere que están fuertemente relacionadas con las morfologías y composición encontradas en la caracterización fisicoquímica, fueron congruentes con las condiciones utilizadas para su formación, y se encuentran dentro de los rangos requeridos para su futura aplicación. Todas estas características respaldan a las membranas formadas para su utilización como apósitos para el tratamiento de heridas.

Palabras clave: Electrohilado; Quitosano; Metacrilato de Glicidilo.

Abstract: Nanomaterials are presented as an alternative for tissue regeneration and controlled drug release. Among these materials, nanofibers are presented as an alternative for regeneration due to their properties such as a high surface area to volume ratio, excellent mechanical properties, and versatility in integrating various materials into their composition. This work explores the manufacture and characterization of membranes formed by nanofibers obtained by the electrospinning technique. Chitosan, chitosan modified with glycidyl methacrylate (Q-GMA), and a polyvinyl alcohol (PVA) core loaded with 0.5% w/w neomycin were used. The physicochemical and mechanical characterization of the material was performed in order to evaluate its properties for possible application in the treatment of acute and chronic wounds. SEM confirmed the formation of nanofibers with diameters of approximately 120 nm and pearling when the drug was incorporated into the formulation. Similarly, the composition was analyzed using the ATR-FTIR technique, which confirmed the correct production of the modified chitosan and the presence of PVA and neomycin in the nanofibers formed. The mechanical properties of the material, which are suggested to be strongly related to the morphologies and composition found in the physicochemical characterization, were consistent with the conditions used for its formation and are within the ranges required for its future application. All these characteristics support the membranes formed for use as dressings for wound treatment.

Keywords: Electrospinning; Chitosan; Glycidyl Methacrylate.

1. Introducción

La piel es el órgano más grande del cuerpo humano, actúa como barrera protectora frente a agentes químicos y biológicos. Sin embargo, su estructura puede alterarse por heridas o quemaduras, favoreciendo la colonización bacteriana que dificulta la cicatrización [1].

Los apósitos para heridas desempeñan un papel fundamental en la reparación y regeneración tisular, ya que no solo previene infecciones, sino que también contribuyen a la restauración de las capas de la piel. Estudios previos han demostrado que los apósitos elaborados a partir de polímeros naturales y sintéticos son capaces de crear un entorno protector, que permite a la vez la transferencia de compuestos activos. Se recomienda que el apósito genere un ambiente húmedo, debe ser semipermeable al agua, al oxígeno y ser biocompatible [1].

Los apósitos nanofibrosos para heridas a base de quitosano presenta propiedades que lo hacen adecuado para diversas aplicaciones biomédicas, incluyendo la cicatrización de heridas. Este biopolímero posee buena biocompatibilidad, biodegradabilidad, baja toxicidad y mecanismos controlados de liberación de fármacos [2] [3].

Entre las diversas técnicas para la fabricación de nanofibras se encuentra el electrohilado, una técnica versátil y económica que permite la producción de nanofibras con un alto ordenamiento, baja dispersión en la distribución del tamaño de sus diámetros, y morfologías varias, esto permite su utilización en una amplia gama de aplicaciones, desde la electrónica hasta en materiales médicos. El electrohilado es un proceso que utiliza un campo eléctrico para controlar la deposición de fibras de polímero sobre sustratos. La versatilidad de esta técnica nos permite la generación de nanofibras con un alto ordenamiento, baja dispersión en la distribución del tamaño de sus diámetros, y morfologías varias, esto permite su utilización en una amplia gama de aplicaciones, desde la electrónica hasta en materiales médicos [4].

En este trabajo se sintetizaron nanofibras de quitosano-metacrilato de glicidilo (GMA), alcohol polivinílico (PVA), y neomicina, fabricados mediante la técnica de electrohilado, para su potencial uso para el tratamiento de

heridas agudas y crónicas. En este estudio se modificaron las condiciones del proceso de electrohilado, utilizando un sistema coaxial, el cual consiste en la utilización de un sistema dual de alimentación de polímeros extruidos a través de una aguja con un diámetro externo y un sistema interno con el fin de fabricar fibras de un material recubierto por un segundo polímero. De igual forma se modificó el potencial aplicado para la formación de las nanofibras, así como las relaciones de los polímeros empleados para su fabricación. El biopolímero formado se pretende que posea propiedades antibacterianas, buena biocompatibilidad y de baja toxicidad, en donde la neomicina, se utiliza como un antibiótico de uso dermatológico [5]. El electrohilado se plantea como una técnica eficaz y económica para generar andamios fibrosos bioactivos que favorezcan la regeneración celular de la piel.

2. Materiales y métodos

Quitosano de medio peso molecular (CAS: 9012-76-4) de la marca Sigma-Aldrich, con un grado de desacetilación 75-85%; Metacrilato de glicidilo (CAS: 106-91-2), de la marca Sigma-Aldrich, con un grado de pureza del 97%; Sulfato de Neomicina (CAS: 1405-10-3) de la marca Sigma-Aldrich; Ácido acético (CAS: 64-19-7) de la marca J.T. Baker; y Alcohol de Polivinilo (CAS: 9002-89-5), de la marca Sigma-Aldrich.

2.1. Metodología

Se utilizó un sistema coaxial, el cual permite electrohilar simultáneamente diferentes polímeros generando fibras de núcleo cubierta. Para este método se prepararon dos soluciones por separado. Para la realización del Quitosano-Metacrilato de glicidilo se siguió la metodología de Nelly Flores [6].

Para la solución del núcleo a) se agregó alcohol polivinílico (PVA) al 10% en agua destilada a 135° C hasta formar una solución transparente y homogénea. Posteriormente, se adicionó 0.5% p/p de sulfato de neomicina y se colocó en la jeringa para el proceso de electrohilado. Para la solución de la cubierta b) se tomó 2% de Q-GMA y 1% de Q en ácido acético al 0.4 M y finalmente, se incorporó 1% de Tritón x-100, un surfactante no iónico para romper la tensión superficial "Fig1".

La solución también se preparó en una relación 1:4 manejando las condiciones anteriores.

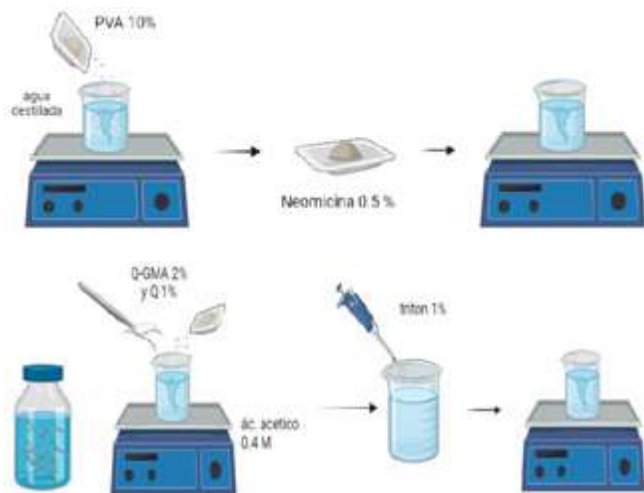


Figura 1: Preparación de muestras.

2.2. Parámetros de electrohilado

El electrohilado se utiliza como un proceso simple y eficiente para fabricar nanofibras a partir de dos o más tipos de polímeros.

El electrohilado se basa en una técnica de hilado donde la solución del polímero se mantiene por su tensión superficial en la punta del capilar que está sujeta a la diferencia de potencial creada entre la hilera y la superficie del ánodo (colector). Debido al campo eléctrico se dispara una carga en la superficie del líquido superando las fuerzas de tensión superficial. Finalmente, la solución del polímero se extruye desde la punta del cono de Taylor (capilar) al colector [7]. Dentro de este sistema de electrohilado

El electrohilado coaxial se llevó a cabo utilizando voltajes de 22 y 26 kV, con una tasa de inyección de 0.1, 0.3 y 0.6 mL/h con una distancia de 10 cm de la punta al colector.

2.3. Caracterización fisicoquímica

2.4. Espectroscopia Infrarrojo

La espectroscopia Infrarroja por transformada de Fourier (FTIR), se llevó a cabo por el Espectrómetro Perkin Elmer GX (modo Spectrum One), con un rango de 4000 a 400 cm^{-1} , de punta diamante, con la técnica de reflectancia totalmente atenuada (ATR), la cual nos permite realizar la medición con una pequeña cantidad de material, sin preparación previa.

2.5. Microscopia

La morfología de las muestras se realizó mediante el Microscopio Electrónico de Barrido (SEM), marca JEOL JSM-7610F con un voltaje de 5.0 kV, para su realización las muestras fueron recubiertas con una película de oro.

2.6. Pruebas mecánicas

Se evaluó la resistencia del compuesto soportando la membrana por un extremo y por otro se aumento el peso gradualmente hasta el punto de ruptura del material, considerando la Norma Mexicana NMX-E-005-CNCP-2004. Y por ultimo se llevo a cabo el índice de hinchamiento cortando la membrana en pequeñas piezas y se procedió a colocarlas en agua destilada a diferentes tiempos.

2.7. Acrónimos y Abreviaturas

Para un mejor entendimiento de los resultados y la discusión de nuestras membranas se utilizaron los siguientes acrónimos. Para las muestras sin fármaco: QGPA12 a 22 kV, QGPA12 a 26 Kv, QGPA14 a 22 kV, QGPA14 a 26 Kv. Asimismo, las soluciones con el fármaco de la neomicina fueron nombradas de la siguiente manera: QGPVAN12 a 22kV, QGPVAN12 a 26 Kv, QGPVAN14 a 22kV, QGPVAN14 a 26 Kv.

3. Resultados y Discusión

3.1. Espectroscopia Infrarroja

La espectroscopia infrarroja se emplea para evaluar la interacción entre los polímeros y la neomicina.

En la “Fig.2”, los espectros infrarrojos muestran la interacción entre los polímeros principales que son el PVA, Q-GMA, y nuestro fármaco.

El análisis del PVA, neomicina y Q-QGMA de la “Fig.1” se muestran las señales principales a 3365 y 3275 cm^{-1} correspondientes a los grupos -OH y -NH₂ [8]. A 2938 cm^{-1} corresponde el estiramiento del grupo CH₂ [9], en 1620 cm^{-1} se observa una señal del grupo NH característica del fármaco, la señal 2346 y 1652 cm^{-1} se asocia con las vibraciones del C=O en el grupo de la amida I, a la amida II en 1568 cm^{-1} correspondiente al C=C del QGMA [5]. Otro grupo situado a 1415 cm^{-1} correspondiente a las vibraciones de flexión del grupo CH₃ del PVA y el Q-QGMA[10]. La ultima señal de mayor intensidad se observa a 1075 cm^{-1} el cual es correspondiente a las vibraciones de estiramiento del éter C-O-C de la neomicina y el Q-QGMA[11], y la banda de absorción de 830 cm^{-1} asignada al estiramiento del anillo epoxi característico del GMA. Por otra parte, la señal de 1087 a 820 cm^{-1} se observa el grupo C-O el cual es característico del PVA [12].

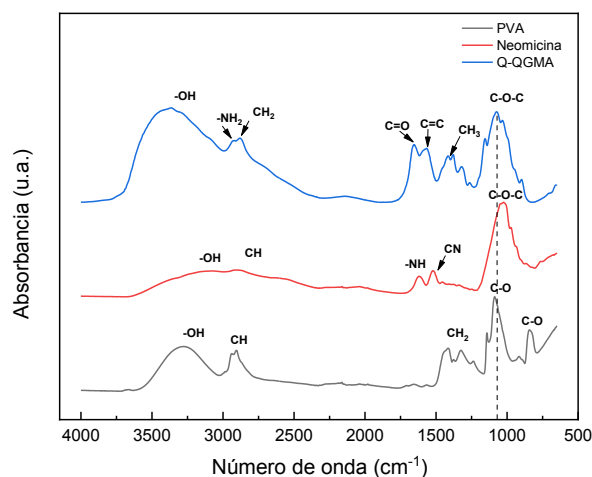


Figura 2: Espectroscopia Infrarroja de las membranas de a) PVA, b) Neomicina y c) Q-QGMA.

Del mismo modo en el espectro de la “Fig.3” se mostró la presencia de los grupos funcionales anteriormente mencionados, por otro lado con el fármaco la muestra de QGGPVAN14 a 22 kV mostró una tercer señal alrededor de los 2937 y 2871 cm^{-1} correspondiente al grupo $\text{C}=\text{O}$ característica de la neomicina, al igual que el pico a 1737 y 1725 cm^{-1} , asignadas a las vibraciones de tensión del grupo $\text{C}=\text{O}$ presentes en la molécula del GMA, del mismo modo se observó un corrimiento en la muestra de QGGPVAN12 a 22 kV la cual corresponde al grupo $\text{C}=\text{C}$, mientras que la señal característica del grupo $\text{C}-\text{O}-\text{C}$ mostro un desplazamiento hacia frecuencias más bajas, la para las muestras en relación 1:4 a los voltajes establecidos, esto nos indica una interacción mayor entre los polímeros utilizados.

Tabla 1. Resumen de las vibraciones experimentales para la espectroscopia infrarroja de las membranas de QGGPVA, QGGPVAN en relación 12 y 14 a voltajes de 22 y 26 Kv.

Vibraciones	Posición aproximada cm^{-1}	Frecuencia experimental
-OH y NH	3300- 3650	3365 y 3275
CH_2	2915- 2940	2938
$\text{C}=\text{O}$	1750 -1735 -1725	1737 y 1725
$\text{C}=\text{C}$	1475-1600	1568
CH_3	1350-1410	1415
$\text{C}-\text{O}-\text{C}$	1000-830	1087 y 820

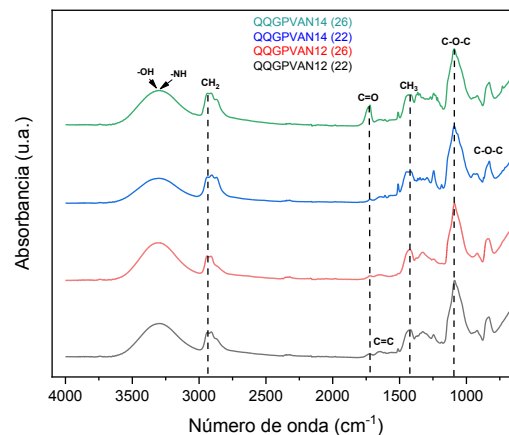
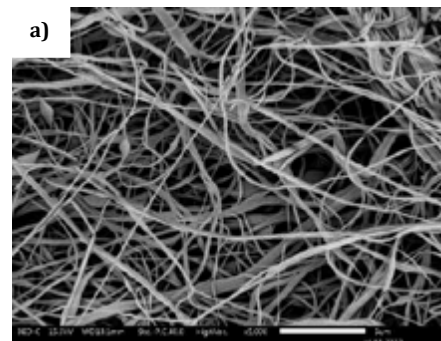


Figura 3: Espectroscopia infrarroja de las membranas con fármaco a) QGGPVAN12 a 22kV, b) QGGPVAN12 a 26 kV, c) QGGPVAN14 a 22kV y d) QGGPVAN14 a 26 Kv.

3.2. Microscopia

Las imágenes SEM se analizaron mediante el programa Image J para realizar una medición del promedio del diámetro de las fibras formadas.

La “Fig.4” muestra las micrografías SEM de las membranas de QGGPVA12 donde se obtuvieron una gran cantidad de fibras uniformes, con pequeños defectos de perla y menor presencia de impurezas, las fibras muestran tamaños menores de 119 ± 36 nm. Varios estudios demuestran que los enredados de las cadenas juegan un papel importante en la formación de fibras durante el electrohilado [13]. De igual manera, las membranas de QGGPVAN14 muestran una mayor cantidad fibras con una morfología irregular y ondulada [14], con un tamaño de partícula de 151 ± 32 nm, así como algunas esferas de la solución polimérica la cuál aparenta una apariencia igualmente rugosa, también se observó la presencia de puntos más pequeños color gris claro sobre las fibras la cual se atribuye a la presencia del fármaco.



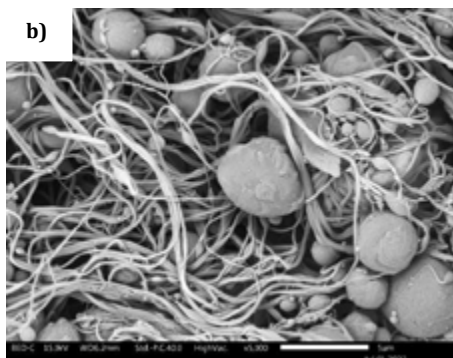


Figura 4: Micrografías SEM a) membrana de QGPGVAN12, b) QGPGVAN14, ambas con voltaje de 22kV.

3.3. Pruebas mecánicas

3.3.1 Tensión a la ruptura

Las pruebas de tensión a la ruptura se realizaron para evaluar el comportamiento a la resistencia a la tensión de las muestras de QGPGVA12, QGPGVA12, QGPGVA14, QGPGVA14, QGPGVAN12, QGPGVAN12, QGPGVAN14, QGPGVAN14, ambas con voltajes de 22 y 26 Kv.

En la “Fig.5” se observan valores elevados en las muestras de QGPGVA12 a 22 kV atribuibles a la mayor dispersión de las fibras generando una estructura compacta, obteniendo una tensión de 0.75 MPa. Sin embargo, las propiedades mecánicas del biomaterial formado se vieron desfavorecidas al realizar la adición del fármaco, alcanzando una tensión de 0.4 MPa, esto, aunado a la baja dispersión de datos, sugiere una alta correlación con la adición del fármaco, el cuál pudiéramos sugerir que genera una interferencia en las interacciones entre los materiales poliméricos y entre las nanofibras, viendo un efecto adverso en las propiedades mecánicas del material.

Para las muestras de QGPGVA14 a 22 kV se obtuvo una resistencia de 2.5 MPa, la cual es menor que la registrada en las membranas con relación 12. Esto podría deberse a que la mayoría de la membrana presento una mayor cantidad de esferas rugosas, impurezas y fibras irregulares, como se confirmó mediante SEM. Estas características morfológicas pudieron haber afectado la medición de la tensión, ya que las esferas o zonas defectuosas facilitan la ruptura del material.

Finalmente, al agregar un voltaje de 26 kV, se obtuvieron los valores más bajos de resistencia, lo cual podría estar relacionado con el voltaje aplicado ya que provoca inestabilidad en el chorro durante el electrohilado,

generando fibras defectuosas.

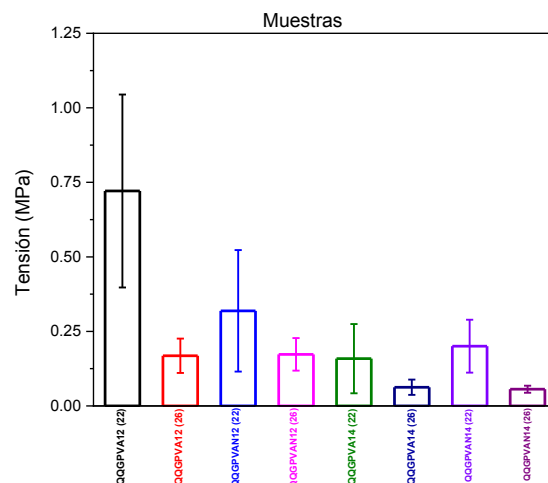


Figura 5. Representación grafica de la tensión a la ruptura de las membranas sin fármaco y con el fármaco de la neomicina ambas con relación 12 y 14 a los voltajes establecidos.

3.3.2 Hinchamiento

Se prosiguió a evaluar la capacidad de absorción de líquidos para determinar el hinchamiento a tiempos de (0, 30 min, 1, 2, 4 y 24 h) de las membranas de QGPGVAN12 y QGPGVAN14 a los voltajes establecidos.

La membrana de QGPGVAN14 a 26 kV presento el mayor hinchamiento, con un valor de 1600 % a los 30 min, disminuyendo ligeramente a las 24 horas, en comparación con la membrana de 22 kV la cual mostro una variación menor de 800 % en los primeros minutos. Por su parte el QGPGVAN12 a 22 kV mostro una variación menor, de 950 %, y de 500 % a 26 kV. Los resultados de las pruebas de hinchamiento indican que, aproximadamente a las 2 horas, las membranas alcanzan su máxima absorción de agua, mientras que alrededor de las 4 horas todas las muestras comienzan a disminuir su porcentaje de hinchamiento. Estudios previos informan que el quitosano disminuye la tasa de hinchamiento cuando se mezcla con el PVA; también el grado de reducción depende de factores como el peso de los componentes, el pH, la temperatura etc [15]. Los apósitos deben mantener un ambiente húmedo adecuado que favorezca la cicatrización, evitando al mismo tiempo la acumulación de exudados en la herida. Por ello, es importante que el porcentaje de hinchamiento del material se mantenga estable durante las primeras dos horas [3].

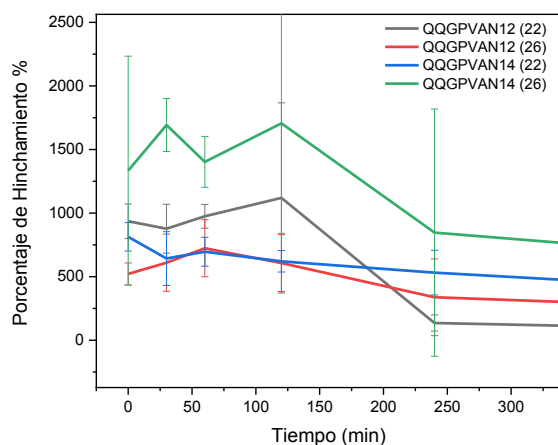


Figura 6. Porcentaje de Hinchamiento de las membranas de QGGPVAN en relación 12 y 14 a voltajes de 22 y 26 kV.

4. Conclusión

El Metacrilato de glicidilo (GMA) demostró ser adecuado para la funcionalización del quitosano, favoreciendo la interacción entre los compuestos, como se confirmó en FTIR. Las micrográficas SEM nos indicaron que la relación 12 generó fibras más homogéneas, con menores impurezas y tamaños que oscilan en los 120 nm, además de obtener una mejor resistencia a la tensión gracias a la morfología, mientras que la incorporación del fármaco modificó las características morfológicas y la uniformidad de las fibras. Las pruebas mecánicas también mostraron que al aumentar el voltaje y al adicionar el fármaco la resistencia de las membranas es afectada, probablemente por las interacciones entre polímeros y el fármaco.

En general, las membranas a base de Q-QGMA, PVA obtenidas mediante electrohilado coaxial presentan una buena estabilidad, uniformidad y potencial para aplicaciones biomédicas, siendo posible optimizar sus propiedades mediante ajustes en la composición y las condiciones de electrohilado.

Abreviaturas

Las siguientes abreviaturas se utilizan en este manuscrito:

PVA: Alcohol polivinílico

GMA: Metacrilato de glicidilo

Q: Quitosano

N: Neomicina

kV: kilovoltios

5. Referencias bibliográficas

- [1] H. J. Branicky, "Nanomaterials for Wound Healing and Infection Control," *J. Can. Dent. Assoc.*, vol. 58, no. 9, p. 688, 2019.
- [2] C. Thambiliyagodage, M. Jayanetti, A. Mendis, and G. Ekanayake, "Recent Advances in Chitosan-Based Applications—A Review," *Natl. Lib. Med.*, vol. 16(5):2073, 2023, [Online]. Available: doi: 10.3390/ma16052073.
- [3] S. Alven and B. A. Aderibigbe, "Chitosan-Based Scaffolds Incorporated with Silver Nanoparticles for the Treatment of Infected Wounds," *Pharmaceutics*, vol. 16, no. 3, pp. 1–28, 2024, doi: 10.3390/pharmaceutics16030327.
- [4] S. B. Qasim *et al.*, "Electrospinning of chitosan-based solutions for tissue engineering and regenerative medicine," *Int. J. Mol. Sci.*, vol. 19, no. 2, 2018, doi: 10.3390/ijms19020407.
- [5] V. M. Platon *et al.*, "Antioxidant-sealed chitosan nanofibers loaded with erythromycin: Tissue regeneration biomaterials with immune-modulating effects in a rat model," *Carbohydr. Polym.*, vol. 368, no. P2, p. 124247, 2025, doi: 10.1016/j.carbpol.2025.124247.
- [6] P. Taylor *et al.*, "Journal of Biomaterials Science, Characterization and degradation of functionalized chitosan with glycidyl methacrylate," no. July 2013, pp. 37–41, 2012.
- [7] J. Yoon, H. S. Yang, B. S. Lee, and W. R. Yu, "Recent Progress in Coaxial Electrospinning: New Parameters, Various Structures, and Wide Applications," *Adv. Mater.*, vol. 30, no. 42, pp. 1–23, 2018, doi: 10.1002/adma.201704765.
- [8] C. J. Zhou, Y. Li, S. W. Yao, and J. H. He, "Silkworm-based silk fibers by electrospinning," *Results Phys.*, vol. 15, no. February, pp. 0–4, 2019, doi: 10.1016/j.rinp.2019.102646.
- [9] S. Gomes, G. Rodrigues, G. Martins, C. Henriques, and J. C. Silva, "Evaluation of nanofibrous scaffolds obtained from blends of chitosan, gelatin and polycaprolactone for skin tissue engineering," *Int. J. Biol. Macromol.*, vol. 102, pp. 1174–1185, 2017, doi: 10.1016/j.ijbiomac.2017.05.004.
- [10] E. A. Elizalde-Peña *et al.*, "Synthesis and characterization of chitosan-g-glycidyl methacrylate with methyl methacrylate," *Eur. Polym. J.*, vol. 43, no. 9, pp. 3963–3969, 2007, doi: 10.1016/j.eurpolymj.2007.06.004.
- [11] N. Akhavan-Kharazian and H. Izadi-Vasafi, "Preparation and characterization of chitosan/gelatin/nanocrystalline cellulose/calcium peroxide films for potential wound dressing applications," *Int. J. Biol. Macromol.*, vol. 133, pp.

- 881–891, 2019, doi:
10.1016/j.ijbiomac.2019.04.159.
- [12] H. S. Mansur, C. M. Sadahira, A. N. Souza, and A. A. P. Mansur, “FTIR spectroscopy characterization of poly (vinyl alcohol) hydrogel with different hydrolysis degree and chemically crosslinked with glutaraldehyde,” *Mater. Sci. Eng. C*, vol. 28, no. 4, pp. 539–548, 2008, doi:
10.1016/j.msec.2007.10.088.
- [13] T. Zhong, W. Liu, and H. Liu, “Green electrospinning of chitin propionate to manufacture nanofiber mats,” *Carbohydr. Polym.*, vol. 273, no. June, p. 118593, 2021, doi:
10.1016/j.carbpol.2021.118593.
- [14] P. Korycka, A. Mirek, K. Kramek-Romanowska, M. Grzeczkwicz, and D. Lewinska, “Effect of electrospinning process variables on the size of polymer fibers and bead-on-string structures established with a 23 factorial design,” *Beilstein J. Nanotechnol.*, vol. 9, no. 1, pp. 2466–2478, 2018, doi: 10.3762/bjnano.9.231.
- [15] E. Ewaldz, J. Randrup, and B. Brettmann, “Solvent Effects on the Elasticity of Electrospinnable Polymer Solutions,” *ACS Polym. Au*, vol. 2, no. 2, pp. 108–117, 2022, doi:
10.1021/acspolymersau.1c00041.

Análisis de Factores Influyentes en la Comercialización de Videojuegos Mediante Técnicas de Aprendizaje Automático

Analysis of Factors Influencing Video Game Commercialization Using Machine Learning Techniques.

Jaramillo Caro del Castillo Julio, Sandoval Valencia Tania Elizabeth, Huerta Manzanilla Eric Leonardo,
Vergara Ayala Edwin Geovanny
Facultad de Ingeniería
Universidad Autónoma de Querétaro
Querétaro, México.

jjaramillo19@alumnos.uaq.mx; tania.sandoval@uaq.mx; eric.huerta@uaq.mx; edwin.vergara@uaq.mx

ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-0138-3360>; <https://orcid.org/0000-0002-2800-4797>; <https://orcid.org/0000-0002-2788-1990>;
<https://orcid.org/0000-0003-1383-8227>

Resumen: En este estudio se desarrolló un modelo predictivo basado en aprendizaje automático para determinar los factores del éxito comercial de videojuegos en diferentes regiones geográficas. Se analizaron variables como género, plataforma, desarrollador, distribuidor, calificación de la crítica y año de lanzamiento; evaluando el impacto en las ventas regionales mediante tres algoritmos: Regresión lineal, Random Forest y Support Vector Machine (SVM). Los resultados mostraron que el SVM tiene mejor rendimiento, con un R^2 de 0.4214 que permite identificar patrones regionales en preferencias de consumo. Se encontró que la influencia de la crítica especializada varía significativamente según la región, obteniendo una correlación de 0.28 en Norteamérica y un 0.15 en Japón. En cuestión de los géneros de videojuegos, los títulos de Acción, Deportes y Shooter dominan el mercado global, mientras que los de Aventura y Plataformas tienen ventas mayormente predecibles. Como parte del estudio de errores predictivos se identificó que los juegos con puntuaciones de crítica especializada entre 90-100 presentaron el mayor error contradiciendo la intuición de que los títulos mejor valorados serían más fáciles de predecir. Gracias a estos resultados se proporcionan las herramientas para optimizar decisiones estratégicas en desarrollo y comercialización de videojuegos, recomendando a estudios independientes enfocarse en mercados regionales específicos y considerar la elección del género de un videojuego por medio del comportamiento predecible del modelo, equilibrando así el potencial comercial y recursos disponibles. La limitación identificada del modelo fue la dificultad de predecir ventas superiores a 4 millones de unidades.

Palabras clave: Videojuegos; Aprendizaje Automático; Predicción de Ventas; Preferencias Regionales; Análisis de Mercado.

Abstract: In this study, a predictive model based on machine learning was developed to determine the factors of commercial success for video games across different geographical regions. Variables such as genre, platform, developer, publisher, critic rating, and release year were analyzed; evaluating their impact on regional sales through three algorithms: Linear Regression, Random Forest, and Support Vector Machine (SVM). Results showed that SVM performs best, with an R^2 of 0.4214, allowing for the identification of regional patterns in consumer preferences. The influence of specialized criticism was found to vary significantly by region, with a correlation of 0.28 in North America and 0.15 in Japan. Regarding video game genres, Action, Sports, and Shooter titles dominate the global market, while Adventure and Platform games have more predictable sales. As part of the predictive error study, games with specialized critic scores between 90-100 were identified as having the largest error, contradicting the intuition that higher-rated titles would be easier to predict. These results provide tools to optimize strategic decisions in video game development and marketing, recommending that independent studios focus on specific regional markets and consider the choice of video game genre through the predictable behavior of the model, thus balancing commercial potential and available resources. The identified limitation of the model was the difficulty in predicting sales exceeding 4 million units.

Keywords: Video Games; Machine Learning; Sales Prediction; Regional Preferences; Market Analysis.

Résumé: Dans cette étude, un modèle prédictif basé sur l'apprentissage automatique a été développé pour déterminer les facteurs de succès commercial des jeux vidéo dans différentes régions géographiques. Des variables telles que le genre, la plateforme, le développeur, l'éditeur, l'évaluation critique et l'année de sortie ont été analysées; évaluant leur impact sur les ventes régionales à travers trois algorithmes: Régression linéaire, Random Forest et Support Vector Machine (SVM). Les résultats ont montré que le SVM offre les meilleures performances, avec un R^2 de 0,4214, permettant

d'identifier des modèles régionaux dans les préférences des consommateurs. L'influence de la critique spécialisée s'est avérée varier considérablement selon la région, avec une corrélation de 0,28 en Amérique du Nord et de 0,15 au Japon. Concernant les genres de jeux vidéo, les titres d'Action, de Sport et de Tir dominent le marché mondial, tandis que les jeux d'Aventure et de Plateformes ont des ventes plus prévisibles. Dans le cadre de l'étude des erreurs prédictives, les jeux avec des scores de critique spécialisée entre 90-100 ont présenté la plus grande erreur, contredisant l'intuition selon laquelle les titres mieux notés seraient plus faciles à prédire. Grâce à ces résultats, des outils sont fournis pour optimiser les décisions stratégiques dans le développement et la commercialisation de jeux vidéo, recommandant aux studios indépendants de se concentrer sur des marchés régionaux spécifiques et de considérer le choix du genre d'un jeu vidéo à travers le comportement prévisible du modèle, équilibrant ainsi le potentiel commercial et les ressources disponibles. La limitation identifiée du modèle était la difficulté à prédire des ventes supérieures à 4 millions d'unités.

Mots-clés: Jeux Vidéo; Apprentissage Automatique; Prédiction des Ventes; Préférences Régionales; Analyse de Marché.

1. Introducción

La industria de los videojuegos ha tenido un crecimiento muy pocas veces visto en la industria de entretenimiento, siendo uno de los sectores más lucrativos mundialmente; tal como menciona [1] donde el mercado de videojuegos pasó de generar 62 mil millones de euros de 2012 a 121 mil millones para 2021. Gracias a este crecimiento se han tenido nuevos avances tecnológicos, variedad de plataformas, modelos de negocio, interés global de nuevas audiencias; no obstante, el videojuego depende de múltiples variables técnicas, de distribución, mercadotécnicas, culturales y artísticas.

El panorama que vive la industria de videojuegos ha reflejado ciertos patrones de consumo, como señala [1] por datos del European Investment Fund donde en el 2012 los juegos de consola lideraban el 45% mercado, pero en el 2019 el 51% ahora lo abarcaban los juegos móviles. No obstante, Sony® PlayStation, compañía dedicada a los juegos de sobremesa, adapto su modelo de negocio para crecer junto a los juegos móviles a partir de servicios de suscripciones y juegos como servicio [2]. Igualmente, varios géneros de videojuegos se encuentran en gran auge actualmente, tal como menciona [3] explicando que la realidad virtual busca ser un diferenciador en el sector, al igual que los eSports (competencias de videojuegos de deportes) que han tomado la misma relevancia que los deportes tradicionales, generado una audiencia mundial de 586 millones en 2020 y de 645 millones en 2022.

En el aspecto de la literatura académica sobre la industria de los videojuegos, ha crecido a lo largo de los años, pero continúa siendo fragmentada. Uno de los hallazgos principales de [4] es que identificó las cinco categorías principales que definen a este sector, siendo comercialización y distribución, ecosistemas

de productos, psicología de consumidor junto al marketing, gestión innovación, y por último, la sostenibilidad del negocio. Sin embargo, no existe un marco unificado basado en datos que explique los factores que determinan el éxito comercial de un videojuego en diferentes regiones en el mundo.

De acuerdo con la predicción de ventas, el aprendizaje automático en diversos estudios ha logrado avances importantes que pueden ser adaptados a esta industria. Como es el caso [5] donde evaluaron la predicción de ventas en el sector alimenticio, con apoyo del modelo Random Forest Regression logró mejoras de 1.83% en precisión reducción del 4.66% en error absoluto medio. En el estudio de la referencia [6] se aplicó Support Vector Machine (SVR) en predicción de ventas, mostrando mayor precisión a efectos temporales como campañas promocionales. Igualmente, se identificó con regresión logística binaria que la crítica especializada y la plataforma influyen positivamente la venta de videojuegos, alcanzando un 80.09% de precisión predictiva [7]. Mostrando así un progreso en las técnicas de aprendizaje automático, pero sin tener identificados los factores determinantes del éxito comercial de videojuegos en varias regiones.

La importancia de este estudio se fundamenta por medio de la complejidad y dinamismo que tiene la industria de los videojuegos, que requiere de herramientas analíticas para anticipar el comportamiento de su mercado; siendo una necesidad para desarrolladores independientes que, al contar con un modelo predictivo, podrían optimizar sus decisiones estratégicas para el diseño, desarrollo y comercialización de su producto. En este apartado, la referencia [8] señala que las decisiones de compra son influenciadas por conceptos digitales, como las reseñas de usuario y marketing. Sumado a esto, la literatura actual cuenta con vacíos en la interrelación de variables e impacto en análisis predictivos enfocados a ventas,

dependiendo de su región. Asimismo, el acceso a los datos más recientes de las ventas es complejo de obtener ya que es información confidencial de empresas grandes como pequeñas.

Bajo este contexto, el presente estudio tiene como objetivo desarrollar un modelo predictivo basado en aprendizaje automático que prediga el éxito comercial de un videojuego en diferentes regiones geográficas, mostrando un análisis de variables internas del producto. De manera específica, lo que se busca analizar variables clave de un videojuego como el género, la plataforma, desarrollador, distribuidor, calificación de crítica especializada, año de lanzamiento y ventas en diferentes regiones como América del Norte, Japón, Europa y otros. Los factores siendo evaluados por tres modelos diferentes de aprendizaje automático, la Regresión lineal, Random Forest y Support Vector Machine (SVR), que serán comparados por medio de las métricas de error absoluto medio (MAE) y el coeficiente de determinación (R^2).

El texto está estructurado de la siguiente forma después de esta introducción, donde se explica la metodología utilizada a través de código en lenguaje Python dentro de Google Colab, mencionando la recopilación y preparación de datos para ser evaluados en cada modelo; al igual que cómo se realiza el análisis del modelo con mejores resultados. Posteriormente, en los resultados se presentan los gráficos representativos de la información obtenida de la base de datos, al igual que los hallazgos principales del análisis comparativo y del modelo con mejores resultados; seguido de una discusión que destaca las implicaciones prácticas de los resultados. Finalmente, se ofrecen conclusiones y recomendaciones para desarrolladores independientes que buscan optimizar sus estrategias de desarrollo y comercialización.

2. Materiales y métodos

Este estudio se realizó por medio del conjunto de datos procedente de VGChartz que es una plataforma especializada en dar seguimiento al mercado global de videojuegos, siendo extraído y publicado en la plataforma de Kaggle [9]. El contenido de la base de datos contiene información sobre varios títulos de videojuegos comercializados a nivel mundial, destacando su plataforma, género, editorial, desarrolladores, puntuación de la crítica y los millones de ventas regionales, dividido en Norteamérica, Japón, Europa/PAL y otras regiones.

El procesamiento de los datos y el modelado fue realizado por medio de Python 3.8 en un entorno de computación en la nube de Google Colaboratory con 16 GB de RAM y aceleración de GPU cuando fue necesario. Sumado a esto, se utilizaron las bibliotecas pandas [10] y numpy [11], para la manipulación de datos; scikit-learn [12] para la implementación de algoritmos de aprendizaje automático; plotly [13] y dash [14] para visualizaciones interactivas; junto a matplotlib [15] y seaborn [16] para visualizaciones estáticas.

Previo al análisis de datos, se realizó un protocolo de limpieza para garantizar la calidad y consistencia de los datos. Primeramente, se descartaron metadatos como fechas de actualización e imágenes, siendo columnas que no proporcionaban información útil para el análisis. Igualmente, se realizaron tratamiento para valores faltantes en la data, en el caso de ventas regionales los valores nulos se interpretaron como ausencia de ventas y se reemplazaron con cero, debido a que ciertos juegos no se autoriza su venta en ciertas regiones; también, para las ventas totales se recalcularon a partir de la suma de regiones; además, si se contaba con ausencia de datos en variables críticas como plataforma, género, editorial, desarrollador o puntuación crítica, se eliminaba la fila.

Sumado a esto, existieron casos atípicos que dañaban la predicción del modelo, como es el caso de videojuegos sin ventas o aquellos con 10 millones de unidades vendidas, siendo el 1% superior de la distribución. Asimismo, se realizó una normalización de datos temporales y textos para tener caracteres estandarizados en las columnas; generando así que los lanzamientos posteriores a 2020 fueran descartados por tener limitaciones en su cobertura, homogeneidad y accesibilidad de datos. Por ende, el conjunto de datos posterior a la limpieza es de exactamente 3,760 registros completos, garantizando una estructura completa con variables consistentes que apoyan a tener resultados más precisos y comparables, sin comprometer la calidad del análisis.

Después de la limpieza de datos, se trabajó con el diseño de un dashboard como apoyo para la interpretación de base de datos. A partir de esta herramienta se pudieron explorar patrones y tendencias regionales en el mercado de videojuegos, facilitando los análisis comparativos con filtros interactivos segmentados acorde a la variable crítica seleccionada. La herramienta cuenta con módulos analíticos, como lo es el panel de métricas clave con el número total de juegos y ventas acumuladas por región; visualización de la distribución regional por medio de un gráfico circular interactivo; análisis temporal de evolución de ventas en territorio; gráfico sobre las preferencias de género por región; estudio de correlación entre

puntuaciones críticas y ventas totales; comparativa de preferencias de plataformas por territorio; por último, la identificación de títulos más exitosos del mercado.

La interactividad del dashboard fue lograda mediante un sistema de callbacks reactivos, que actualizan cada uno de los gráficos en respuesta a los filtros seleccionados, como puede ser el género, plataforma, distribuidor; al igual que enfocarlo a regiones específicas. La herramienta interactiva fue desplegada por ngrok para tener acceso remoto desde cualquier dispositivo con red, generando una URL pública temporal.

Para el desarrollo de los modelos predictivos, se realizó un procesamiento adicional sobre los datos, donde las fechas de lanzamiento se convirtieron en variables adicionales como años, mes, trimestre y días transcurridos desde el lanzamiento más antiguo de la data; logrando capturar aspectos cíclicos como tendencias lineales. Sumado a esto, se aplicó una transformación logarítmica a variables de ventas para corregir la asimetría positiva común en datos comerciales, generando que se estabilizará la varianza. Igualmente, se dividieron los datos en conjuntos de entrenamiento con el 70% y el de prueba con 30%, permitiendo garantizar reproducibilidad. En el caso de las variables numéricas de puntuación crítica y características temporales, fueron estandarizadas a media cero y desviación estándar unitaria debido a la imputación de valores faltantes. En el caso de las variables categóricas de plataforma, género, distribuidor, desarrollador, año, mes y trimestre; se transformaron por medio de código one-hot para el manejo de categorías desconocidas.

Se implementaron tres algoritmos de regresión para predecir la venta de videojuegos, el primero de ellos es la regresión lineal múltiple, que fue seleccionado por su interpretabilidad, eficiencia computacional y poder asumir relaciones entre predictores y variable objetivo. El segundo es el random forest regression, que tiene una alta capacidad de capturar relaciones no lineales y complejas; en su caso se tuvieron que optimizar hiperparámetros como número de árboles (50-200), profundidad máxima (10 o 20 niveles), características consideradas por división (60%-100%) y tamaño mínimo para bifurcación (2-10 muestras). Para el tercer modelo fue seleccionado el SVR, que se basa en las funciones de Kernel y tiene gran efectividad en espacios de altas dimensiones; teniendo que optimizar sus parámetros principales, como el factor de penalización C (0.1-100), margen de insensibilidad epsilon (0.01-0.5) y el coeficiente gamma (scale o auto). Para los modelos con búsqueda

de hiperparámetros, se utilizó la validación cruzada con tres particiones y el coeficiente de determinación (R^2) como métrica de optimización.

La evaluación de los resultados comenzó con la transformación inversa de las predicciones logarítmicas para recuperar la escala original de ventas. Además, se calcularon métricas que complementan el conjunto de prueba independiente, usando el coeficiente de determinación (R^2) para evaluar la proporción de la varianza; el error cuadrático medio (RMSE) para cuantificar los errores con penalización de desviaciones grande; por último, el error absoluto medio (MAE) como medida ante valores atípicos.

Para cada modelo se generaron diagramas de dispersión que comparaban los valores reales contra los predichos. Asimismo, fueron complementados con el análisis de residuos para detectar patrones sistemáticos en los errores. Una vez identificado el modelo con mejor rendimiento, se analizó segmentadamente el desempeño por categoría de ventas, siendo bajas mejores a 1 millón, medias de 1 a 5 millones, y altas de 5 a 10 millones; permitiendo identificar posibles sesgos o limitaciones en rangos del mercado.

Para el modelo seleccionado, se extrajeron y ordenaron los coeficientes por magnitud para identificar las variables más influyentes; al igual que se analizó el error por categorías principales de variables predictoras (género, plataforma, distribuidor, período temporal y puntuación crítica), permitiendo determinar en qué segmentos del mercado donde la predicción era más compleja. Con este análisis, se logró dar un modelo que comprende las limitaciones específicas y podemos extraer conclusiones sobre qué factores determinan el éxito comercial de videojuegos en variedad de mercados regionales.

3. Resultados

Por medio del dashboard interactivo, se obtuvieron variedad de datos que permiten explorar tendencias y patrones regionales en el mercado global de videojuegos, descubriendo patrones específicos según criterios temporales y comerciales.

La distribución que se aprecia en la Fig. 1, revela que Norteamérica domina el mercado global con más de la mitad de las ventas totales teniendo un 51.9%, continuando con Europa/PAL con un tercio del mercado de 32%. Las regiones restantes representan proporciones significativamente menores.

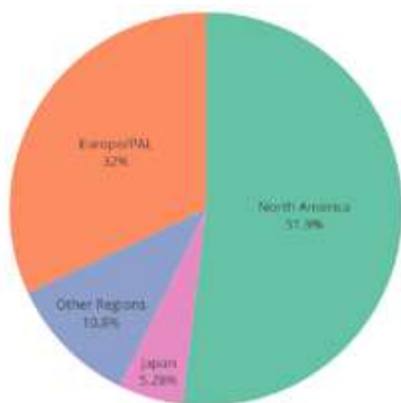


Figura 1: Distribución de ventas por región (1989-2020)

Con apoyo de la Fig. 2, se aprecia que la evolución temporal de las ventas tiene un patrón de crecimiento desde mediados de los años 90 hasta un pico alrededor del 2010, seguido de una caída considerable en 2012. Durante este periodo, Norteamérica alcanzó data cercana a los 140 millones de unidades vendidas anualmente, mientras que Europa registró aproximadamente 100 millones. Mientras que, Japón y otras regiones no lograron superar los 40 millones de unidades anuales.

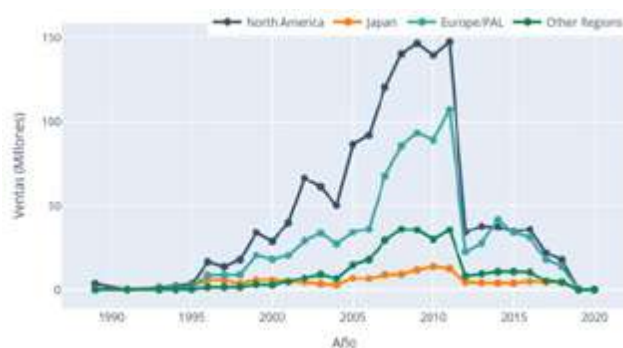


Figura 2: Evolución temporal de ventas por región (1990-2020)

A partir de la Fig. 3, podemos apreciar que los géneros con mayor popularidad son los de acción, deportes y Shooter; superando los 400 millones de unidades vendidas en el periodo analizado. Por otro lado, la distribución regional, muestra que dentro de cada género tiene patrones diferentes; en Norteamérica se mantiene dominante en todos los géneros, pero en el caso de Role-Playing y Fighting muestran una presencia significativa por parte Japón, a comparación de otras regiones.

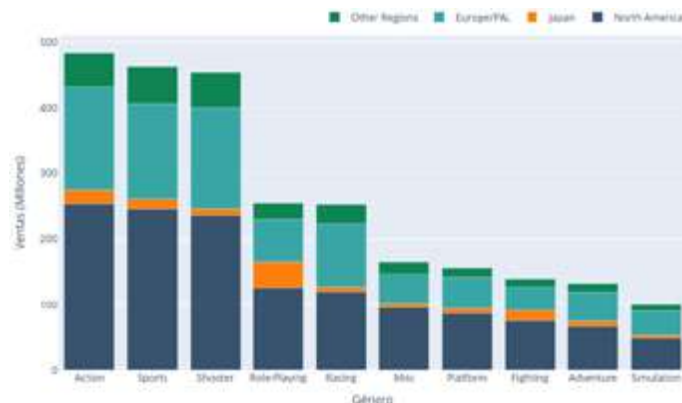


Figura 3: Preferencias de género por región

Tal como se aprecia en la Fig. 4, los resultados revelan una correlación positiva débil entre las puntuaciones críticas y el volumen de ventas para el mercado norteamericano, con un coeficiente de correlación de 0.28. Gracias a la dispersión de los datos se encuentra la relación que al tener de un 8-10 de puntuación de la crítica tienen mayor probabilidad de alcanzar ventas superiores a los 4 millones de unidades. No obstante, existe variabilidad con algunos títulos que tienen buenas calificaciones de crítica, pero registran ventas menores a los 2 millones.

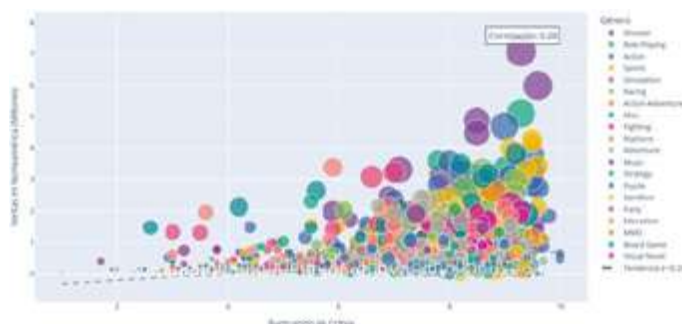


Figura 4: Relación entre puntuación de crítica y ventas en Norteamérica.

Realizando el mismo análisis, pero enfocado a la región de Japón, en la Fig. 5 tenemos resultados de la correlación más débil de todas las regiones, siendo de un valor de 0.15 entre las puntuaciones de la crítica y el volumen de ventas. Esto nos explica que la crítica no tiene el mayor impacto en las decisiones de compra del mercado japonés, a comparación de otras regiones. Igualmente, esto se ve reflejado en su volumen máximo de ventas donde es cercano a los 2 millones de unidades, pero su concentración está por debajo de los 0.5 millones, aunque tenga calificaciones altas.

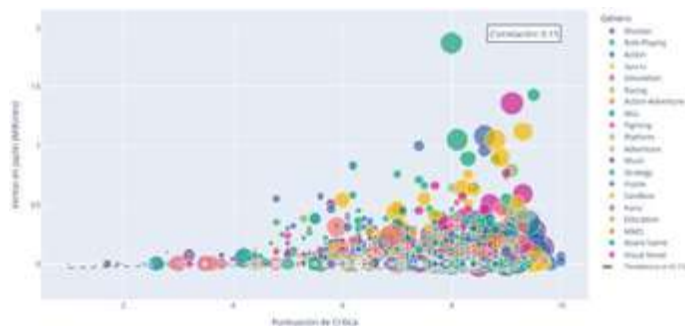


Figura 5: Relación entre puntuación de crítica y ventas en Japón.

En el caso de Europa/PAL, tuvo una correlación positiva de 0.25, similar a la de Norteamérica; teniendo una escala máxima de ventas de aproximadamente 7 millones de unidades, aunque el concentrado se encuentra debajo de los 2 millones.

Sobre el caso de las otras regiones, se tuvo una correlación de 0.25 con un volumen máximo de ventas de 3 millones y una concentración por debajo del millón de unidades vendidas.

Con el apoyo de la Fig.6, se encuentran ciertos patrones de regiones que tienen preferencias por cierta plataforma, como es el caso de Norteamérica que el Xbox domina las ventas de videojuegos en su consola superando los 300 millones de unidades, seguido de PlayStation. En el caso de Japón tiene una clara preferencia por Nintendo y Sony, aunque con ventas menores. Asimismo, en Europa y otras regiones tienen un equilibrio de preferencia entre Xbox y PlayStation.



Figura 6: Preferencias de plataformas por región.

Las diferencias regionales explicadas anteriormente, son primordiales para las estrategias de marketing y el desarrollo mismo de un videojuego a nivel global, teniendo un plan de acción para centrarse en una región o cómo abarcar el mayor mercado global. Con esta información, se complementa la realización de los tres algoritmos de regresión; permitiendo evaluar enfoques de predicción de ventas totales y revelando características significativas de precisión como de la capacidad de generalización.

Como se aprecia en el Cuadro 1 de las métricas de evaluación de los tres modelos, podemos ver que el SVM Regression tuvo el mejor rendimiento con un R^2 alto que explica una mayor proporción de variabilidad de los datos; además, tiene errores de predicción promedio bajos, de acuerdo con el RMSE y el MAE.

Cuadro 1: Métricas de evaluación comparativas de los modelos para la predicción de ventas de videojuegos.

Modelo	R^2	RMSE	MAE
Multiple Linear Regression	0.3735	0.8918	0.4963
Random Forest Regression	0.3473	0.9103	0.4576
SVM Regression	0.4214	0.8570	0.4207

Como resultado de la comparación de modelos, se obtuvo la Fig.7 donde se compara los valores reales y predichos de cada modelo; observando una mayor densidad en el rango de 0 a 2 millones de unidades vendidas. Aunque en los tres modelos, también se puede apreciar que los juegos que superan ventas de 4 millones están por debajo de la línea diagonal de la predicción perfecta. Siendo el modelo SVM con mejores resultados.

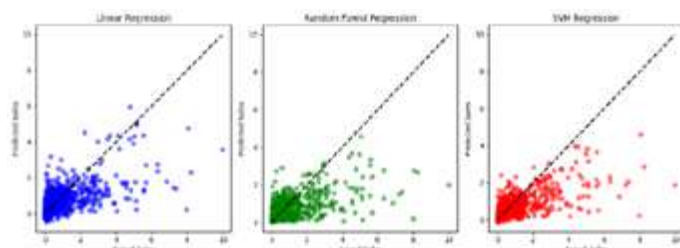


Figura 7: Comparación de valores reales versus predichos para los tres modelos de regresión.

De acuerdo con la Fig. 8 el comportamiento predictivo del modelo SV, tiene una línea de tendencia que sigue la ecuación (1) indicando la relación entre valores reales y predichos. Observando que el MAE de 0.42 millones de unidades, tiene una predicción que se mantiene entre 2 y 4 millones de unidades vendidas.

$$y = 0.35x + 30 \quad (1)$$

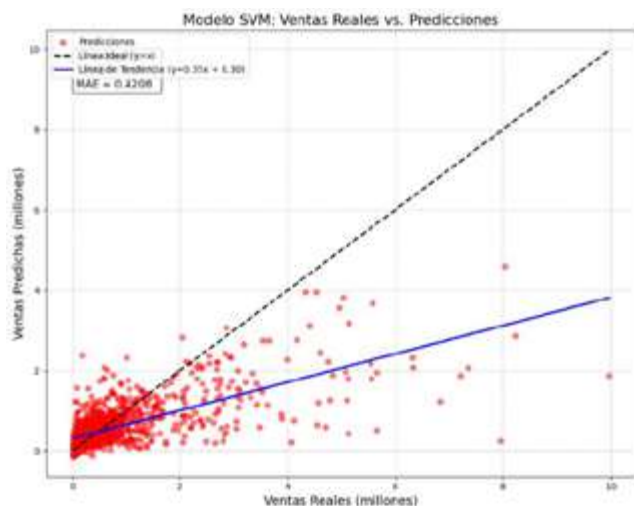


Figura 8: Ventas reales versus predicciones para el modelo SVM.

Para poder entender los residuos que obtiene el modelo SVM, se aprecia en la Fig. 9 donde el Gráfico Q-Q muestra las desviaciones de la normalidad, específicamente en los extremos superiores donde los puntos se alejan de línea de referencia. En el caso del gráfico sobre los residuos versus los valores reales, muestran una tendencia ascendente con una mayor dispersión al tener valores más altos en ventas.

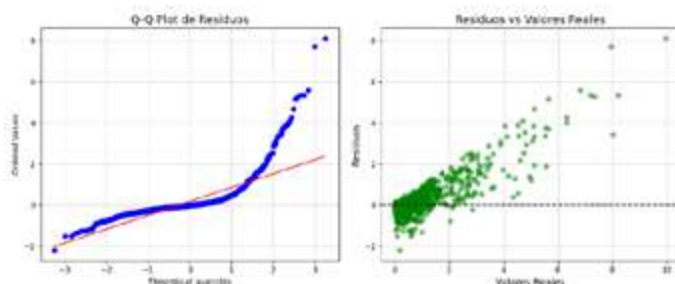


Figura 9: Análisis de residuos del modelo SVM. Gráfico Q-Q de residuos; Residuos vs. valores reales.

Para el análisis del MAE, la Fig. 9 muestra el error de predicción con el que se cuenta según la categoría de ventas, mostrando que en las ventas de 5 a 10 millones tienen mayor tendencia a predecir incorrectamente. Teniendo un mejor rendimiento en tipos de ventas medias de 1 a 5 millones.

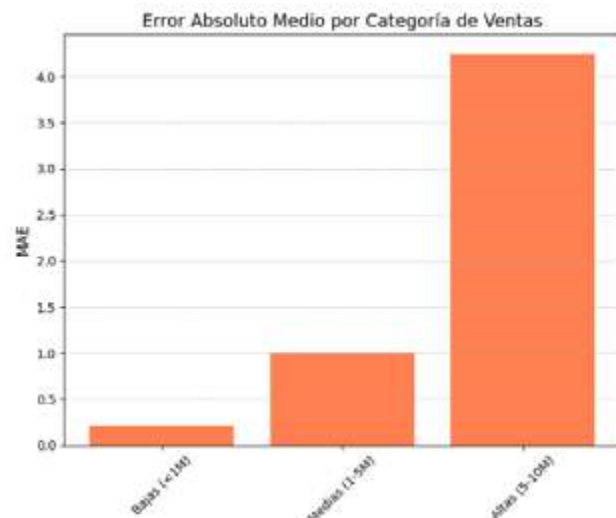


Figura 10: Error Absoluto Medio por categoría de ventas.

En el caso del análisis por género de videojuego de la Fig. 11 se aprecia que los juegos de Aventura y plataformas presentan el menor error de predicción y la categoría de luchas es la que mayor inestabilidad tiene en el modelo.

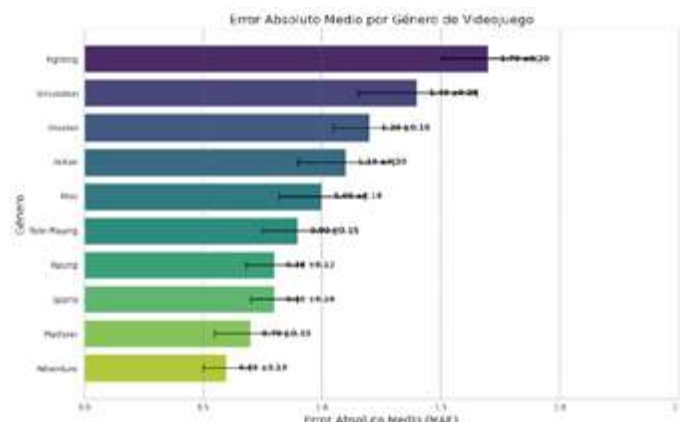


Figura 11: Error Absoluto Medio (MAE) por género de videojuego.

Uno de los factores importantes del análisis es la puntuación de la crítica y en la Fig. 12 se puede apreciar que los juegos con puntuaciones inferiores a 50 registraron un valor bajo de error de predicción, a comparación de los de 80 y superiores, que cuentan con cierta inestabilidad en el modelo.

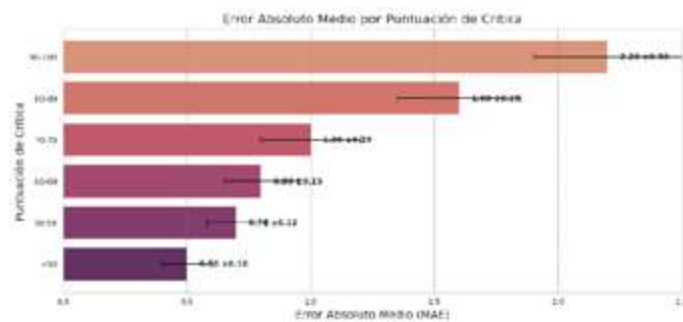


Figura 12: Error Absoluto Medio (MAE) por rango de puntuación crítica.

Finalmente, con el apoyo de la Fig 13. Tenemos las variables tienen el mayor MAE del modelo, siendo la puntuación de juegos con 90 o más y videojuegos desarrollados por Electronic Arts en la consola de PlayStation.

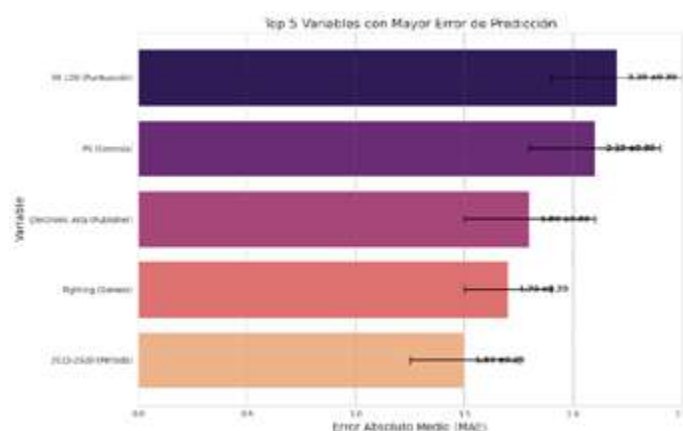


Figura 13: Top 5 Variables con Mayor Error de Predicción.

4. Discusión

4.1. Interpretación del Rendimiento de los Modelos Predictivos

Los resultados obtenidos muestran que el modelo SVM Regression superó los otros dos modelos con un R^2 de 0.4214 y un MAE de 0.4207 millones, tal como se observa en el cuadro 1; indicando que el 42% de variabilidad de ventas puede explicarse mediante los factores considerados en este estudio (plataforma, género, desarrollador, distribuidor, calificación crítica y año de lanzamiento). A pesar de ser un rendimiento modesto en términos absolutos, refleja la complejidad de predicción de ventas en la industria de videojuegos, donde factores no capturados en las variables influyen en el éxito comercial de un videojuego, tal como lo son los presupuestos de marketing, tendencias culturales o eventos externos.

La superioridad del modelo SVM sobre Random Forest ($R^2 = 0.3473$) y Regresión lineal ($R^2 = 0.3735$) se atribuye a su capacidad de saber manejar relaciones no lineales complejas entre variables analizadas [17]; sugiriendo que la naturaleza de las relaciones entre variables puede variar significativamente por los datos específicos analizados.

La ecuación de tendencia observada (1) de la Fig. 8 nos demuestra que tiene una tendencia sistemática del modelo a subestimar ventas altas y sobreestimar las bajas, teniendo un patrón sobre la distribución sesgadas de ventas en la industria, donde la mayoría de los títulos se mantiene en rangos moderados o bajos, y los pocos títulos que alcanzan ventas altas es debido a los grandes presupuestos de empresas como Xbox o PlayStation. Igualmente, en [18] identificaron dificultades para predecir con precisión los títulos de mayor éxito comercial debida a la naturaleza de distribución de datos en la industria de los videojuegos.

4.2. Análisis de los Patrones de Error Predictivo

Un hallazgo significativo del estudio es la dificultad sistemática que presentan los tres modelos en predecir ventas superiores a 4 millones de unidades, como se observa en la Fig. 7. Se aprecia un patrón en los gráficos de dispersión y en el análisis de residuos (Fig. 9), donde la distribución asimétrica de los residuos cuenta con una cola extendida hacia valores positivos, confirmando que los modelos tienden a subestimar las ventas de los títulos más exitosos en la industria de videojuegos, respondiendo a dinámicas diferentes por pertenecer a grandes corporaciones con mayor capital de inversión.

Los juegos con mayor éxito suelen ser beneficiados de efectos de red y popularidad alcanzando formas difícilmente predecibles por medio de variables internas del producto [19]. Generando fenómenos sociales y de mercado que sobrepasan las características inherentes del producto, explicando porque los modelos presentan limitaciones en ventas extraordinarias.

En el caso de los juegos con ventas entre 5 y 10 millones de unidades presentan el mayor error predictivo, de acuerdo con la Fig. 10. Esto nos explica que se tiene la presencia de efectos de red, viralidad o campañas de marketing que transforman títulos prometedores en fenómenos comerciales; siendo la disponibilidad de datos una de las limitaciones del estudio. Sumado a esto, en [20] confirman que la visibilidad y recepción de mercado son influenciadas por estrategias de marketing junto a contenido generado por usuarios, para incrementar radicalmente las ventas de un título específico.

4.3 Variabilidad Regional y Preferencias de Mercado

Igualmente, con el apoyo del dashboard podemos revelar patrones regionales que tienen un impacto en el objetivo de predecir el éxito comercial en diferentes regiones. Tal como se aprecia en la Fig. 1 donde el caso de Norteamérica con un 51.9% del mercado global junto a una correlación entre puntuaciones críticas y ventas entre regiones del 0.28, sugiere que los factores varían considerablemente según el mercado regional.

Siendo estos hallazgos alineados con [21] donde el mercado japonés históricamente tiene preferencias y tendencias distintivas con menor influencia externa. La baja correlación de 0.15 entre puntuación crítica y ventas, fundamenta que un ecosistema regional con valores culturales específicos influye más en las decisiones de compra que una calificación de la crítica [17].

En el caso de preferencias regionales por género y plataformas, se observa como las Fig. 3 y 6 que los juegos Role-Playing de Nintendo son mayormente aceptados en Japón, a comparación de Norteamérica con preferencias hacia el género de Acción en consolas de Xbox. Estos patrones explican porque las ventas de videojuegos al tener un modelo único global van a enfrentarse a variedad de limitaciones; caso contrario a un análisis regional donde se plantean objetivos específicos para cada región y extender el éxito comercial globalmente. Esto ha sido comprobado por [22] al identificar diferencias significativas en la recepción de plataformas y títulos en diferentes mercados, tomando como ejemplo a Nintendo que tiene mayor preferencia de público en Japón.

4.4 Factores Asociados con Mayor Error Predictivo

El análisis de variables asociadas con mayor error predictivo revela los patrones interesantes que apoyan al objetivo de identificar los factores determinantes de un videojuego para tener éxito comercial. Tal como se aprecia en la Fig. 13, los juegos con puntuaciones de 90 a 100 presentaron el MAE más elevado de (2.20 millones) contradice la intuición de que los juegos mejor valorados deberían ser más fácil de predecir. Esto puede deberse en el comportamiento comercial donde pueden ser juegos poco valorados por la crítica, pero sus ventas siguen creciendo por factores externos como política, cultura o marketing.

Lo anterior, se alinea con [8] ya que señala que las reseñas positivas, a pesar de ser importantes, no garantizan el éxito comercial si no conectan con las necesidades específicas de la comunidad de jugadores. Igualmente, existe una brecha creciente entre evaluaciones de críticos y usuario [22], explicando porque juegos mejor valorados por la crítica son impredecibles.

Respecto a las plataformas de videojuegos, PlayStation y el distribuidor Electronic Arts, mostraron errores predictivos elevados, tal como se ve en la Fig.13 posiblemente causado por la mayor variabilidad histórica en su catálogo. Mismo caso para el género de lucha con MAE de 1.70 millones que tiene dificultades predicción y funciona para tener prioridad en búsqueda de información de ciertas variables que requieren de mayor data para alimentar el modelo.

Tal como lo menciona [23], la mayor dificultad de predecir ventas es poder identificar las preferencias y habilidades valoradas para cada jugador dentro de distintos géneros. Siendo el comportamiento volátil de variedad de géneros el que genera mayor sensibilidad a factores externos, como tendencias competitivas o eventos eSports (competencias de videojuegos deportivos) [24].

4.5 Factores Determinantes para el Éxito Comercial según el Modelo SVM

El modelo SVM al ser el más efectivo con un R^2 de 0.4214, permitió identificar factores que son importantes para el éxito comercial de un videojuego, cumpliendo con el objetivo de identificar los siguientes factores determinantes para el éxito comercial de un videojuego.

4.5.1 Calificación crítica especializada

Los resultados muestran una clara correlación entre puntuaciones críticas y ventas, aunque varía según la región de acuerdo con las Fig. 4 y 5. Podemos apreciar que en Norteamérica tiene mayor influencia la crítica especializada en las decisiones de compra de los usuarios, a comparación de Japón que no es un factor influyente; siendo un factor que debe ajustarse según su mercado objetivo.

Esto fundamenta lo explicado en [7] que afirmó que la crítica especializada es un factor significativamente correlacionado con las ventas en Norteamérica. No obstante, los resultados de este estudio matizan que la influencia de la crítica varía considerablemente dependiendo de la región, ya sea por diferencias culturales o sociales que cambian la percepción del consumidor al tomar decisiones de compra [25]. Al igual que la diferente estructura de producción y operación de videojuegos que

tiene cada región, sirviendo como ejemplo Asia, al optar por un modelo basado en servicios que depende más de estrategias de diseño regionalizadas [17]. Adicionalmente, se reafirma con apoyo de la Fig. 12 que explica los videojuegos con puntuaciones inferiores a 50 o superiores a 80 con un comportamiento complejo de predecir, debido a factores externos de la industria.

4.5.2 Género del videojuego

Con apoyo de la Fig. 3 se muestra que los juegos de acción, deportes y shooter dominan el mercado global al superar los 400 millones de unidades vendidas; sin embargo, la Fig. 11 revela que los juegos de peleas y shooter tiene un error predictivo alto. A comparación de juegos de aventura y plataformas que presentan el menor MAE, siendo los patrones de venta más estables y predecibles.

Esta observación es alineada con lo que comenta [26] que identificaron los géneros de acción, deportes y estrategia como dominantes en el mercado desde 1990. Mostrando para un desarrollador independiente que el crear un juego de deportes o acción tiene mayor probabilidad de éxito a comparación de un juego de simulación; al igual que un juego shooter es considerado la nueva tendencia. Adicionalmente, la referencia [23] explica que los usuarios tienen expectativas y comportamientos según el género de videojuegos; siendo un ejemplo los videojuegos de plataformas que tienen audiencia más estable y definida, a comparación de los géneros shooter que se ven afectados por la tendencia o competencia directa entre usuarios.

4.5.3 Plataforma de lanzamiento

De acuerdo con la Fig. 6 se revela que existen varios patrones regionales respecto a las plataformas de lanzamiento. Los más dominantes son que Xbox predomina en Norteamérica, Nintendo en Japón y tanto Europa como las otras regiones mantienen un equilibrio entre PlayStation y Xbox. Siendo coherente con lo mencionado por [27] del éxito que tiene Nintendo en Japón, creciendo estrepitosamente por la consola Nintendo Switch. Adicionalmente, esta preferencia se puede explicar porque el mercado japonés tuvo un desarrollo autónomo en la industria de videojuegos, siendo Nintendo uno de los pioneros [21]; demostrando la menor influencia externa y lealtad nacional que tiene el público japonés.

La presencia de PlayStation igual entra como las plataformas más volátiles del estudio como se ve en la

Fig. 13, siendo algo considerar para un desarrollador independiente que considera tener un lanzamiento multiplataforma. Tal como lo menciona [2] que PlayStation continúa transformando su modelo de negocio a las tendencias, como lo son juegos con servicios de suscripción.

4.5.4 Distribuidor (Publisher)

En el caso del distribuidor, Electronic Arts es de las variables con mayor error predictivo de acuerdo con la Fig. 13, reflejando que la elección de un Publisher es fundamental para la estrategia que tenga el desarrollador y tener un correcto posicionamiento en el mercado. Un ejemplo de esto lo menciona [28] con el caso de CD Projekt al ser una empresa polaca que comenzó a ser reconocida y posteriormente surgió nueva competencia en la región, como Techland, Bloober Team, 11-bit studios y All in! Games, debido al éxito del mercado en la región. Siendo útil para ellos contar con este tipo de análisis para entender qué tipo de videojuegos son más llamativos para su público objetivo.

4.6 Implicaciones Temporales y Evolución del Mercado

La evolución temporal de ventas de acuerdo con la Fig. 2 revela un crecimiento de los años 90 hasta el 2010, sin embargo, tuvo una caída en 2012 que se mantuvo hasta el 2020. Después de esos años la data fue fragmentada por la transición de la industria a modelos de negocio digital, explicando porque del 2012 en adelante se registraban menores ventas. Tal como lo menciona la referencia [1] que el crecimiento de la industria llegó alcanzar 121 mil millones de euros en 2018, complementando que en estos años el 91% de los ingresos de la industria fueron a través de canales digitales [29].

4.7 Limitaciones del Estudio

El análisis actual cuenta con limitaciones respecto a la transición del mercado de videojuegos a lo digital, provocando que no abarque la totalidad de los datos actuales respecto a las ventas; sin embargo, el acceso a esta información es limitado y por el beneficio del modelo de predicción se priorizó calidad de data sobre cantidad de información.

Sumado a lo anterior, el modelo SVM cuenta con áreas de mejora respecto a la normalidad de los valores extremos con ventas muy bajas o demasiado altas. Considerando que el resultado del modelo fue de R^2 de 0.4214, cuenta con un 58% de variabilidad en ventas a causa de falta de variables; tal como lo menciona la referencia [30] donde los volúmenes de búsqueda y ventas semanales, no

mejorando la capacidad predictiva de su modelo. Por lo que se debe considerar la adición de métricas de engagement post-lanzamiento, presupuestos de marketing y cobertura mediática en redes, para que así futuros modelos no dependan de factores externos a los datos.

4.8 Implicaciones Prácticas y Recomendaciones

Los resultados obtenidos generan varias implicaciones prácticas que alinean con los objetivos del estudio. Empezando por la necesidad de estrategias de marketing y desarrollo enfocadas al mercado objetivo, donde estudios independientes deben priorizar que región abarcarán en lugar de buscar vender mundialmente, especialmente cuando se tiene un presupuesto limitado [31]. Un ejemplo es lo mencionado por la referencia [32] sobre adaptar elementos culturales al videojuego para fortalecer la conexión con audiencias locales, aumentando su adopción y rentabilidad; en el caso del mercado japonés se puede considerar desarrollar un juego de género RPG o de plataformas.

La variabilidad del error predictivo entre categorías (géneros, plataformas, distribuidor) indica que algunos segmentos del mercado son más estables y predecibles que otros. Siendo una opción segura el desarrollar un videojuego de aventura o plataforma con patrones de venta consistentes; tal como lo que se menciona [33] donde los modelos factoriales robustos ayudan a identificar segmentos de mercado con comportamientos más predecibles, siendo un menor riesgo para estudios pequeños. En la referencia [34] recomienda utilizar métodos híbridos de selección de características para identificar oportunidades de nicho donde la competencia sea menor. Un ejemplo con los resultados es realizar un videojuego de recursos limitados con género de aventura para PC dirigido al mercado europeo, teniendo así un equilibrio de potencial comercial y recursos necesarios; en lugar de competir contra el mercado saturado de shooters para consolas en Norteamérica.

4.9 Futuras Líneas de Investigación

Basados en los resultados y las limitaciones identificadas, se tienen varias direcciones para futuras contribuciones al estudio. Empezando por la incorporación de métricas de engagement post-lanzamiento para desarrollar modelos predictivos más completos que reflejen la realidad actual del mercado. Sumado a esto, es recomendable desarrollar un modelo específico para cada región geográfica

considerando los patrones de consumo identificados en este estudio; no obstante, se debe conseguir información de calidad. Finalmente, el incorporar variables externas como presupuestos de marketing, cobertura mediática y métricas de redes sociales, podrían explicar la variabilidad no capturada por las cuestiones internas del producto y los eventos externos, como lo es fue pandemia del COVID-19 que transformo radicalmente los patrones de consumo [35].

5. Conclusión

El presente estudio ha desarrollado con éxito un modelo predictivo basado en aprendizaje automático capaz de anticipar el éxito comercial de videojuegos en diferentes regiones geográficas; a través del análisis comparativo de tres algoritmos (Regresión Lineal, Random Forest y Support Vector Machine), donde se identifico el modelo SVM con el mejor rendimiento predictivo, con un R^2 de 0.4214 y un MAE de 0.4207 millones de unidades. El resultado a pesar de ser modesto en términos generales representa un avance significativo en la comprensión de factores que determinan las ventas de videojuegos en diferentes regiones del mundo.

Con el análisis de las variables internas del producto, se identificaron patrones regionales distintivos para el desarrollo y comercialización; siendo Norteamérica la más dominante con un 51.%, seguido de Europa con un 32%, contrastando con el mercado japonés que además tiene diferentes preferencias respecto al género de videojuegos como sus plataformas. Las diferencias las podemos apreciar en la correlación entre las puntuaciones de la crítica y las ventas, variando según la región, teniendo un 0.28 en Norteamérica y un 0.15 en Japón; mostrando que la influencia de la crítica especializada no es homogénea a nivel global.

Otro hallazgo fue la identificación de los géneros dominantes en el mercado global, siendo los juegos de acción, deportes y shooter; aunque, los que presentaron patrones de venta predecibles fueron aventuras y plataformas. Por otro lado, los juegos con una crítica de calificación de 90 a 100 mostraron un mayor error predictivo, sugiriendo que el comportamiento comercial de títulos de alta calidad es influenciado por factores no capturados en las variables del estudio.

La principal limitación que identificó fue que el modelo presenta una dificultad de predecir ventas superiores a 4 millones de unidades, siendo los juegos más exitosos en la industria los que responden a dinámicas mayormente variables; señalando así la necesidad de en futuros estudios en abarcar métricas de popularidad y

marketing.

Desde la perspectiva práctica, el estudio ofrece a los desarrolladores y distribuidores una herramienta valiosa para optimizar decisiones estratégicas, en cuestiones de diseño, localización y marketing. Por medio de los patrones regionales se permite adaptar al público objetivo; mientras que el análisis de error predictivo apoya en las acciones a realizar para diferentes segmentos del mercado. El desarrollador puede decidir si quiere tomar un camino arriesgado con un género de videojuego impredecible, pero con posibilidad de altas ventas; o caso contrario, abarcar un género altamente predecible, pero con ventas promedio adaptado a los recursos y preferencias seleccionados por la estrategia.

Aunque no existe un modelo que pueda predecir con absoluta certeza el éxito comercial en una industria tan dinámica y compleja, como lo es la de los videojuegos. El enfoque de este estudio representa un avance significativo hacia la toma de decisiones informada y basada en datos; principalmente para estudios independientes y de menor presupuesto.

Inteligencia Artificial

Durante la preparación de este estudio, los autores utilizaron Claud 3.7 Sonnet (Anthropic) y ChatGPT 4.0 (OpenAI) con el propósito de asistir en la estructuración del texto junto al apoyo en análisis estadístico y en la interpretación de resultados. Estas herramientas fueron empleadas específicamente para mejorar la claridad en la presentación de los hallazgos, optimizar coherencia argumentativa y ajustar lenguaje técnico. Los autores hemos revisado exhaustivamente, editado y validado todo el contenido generado contra los datos originales del estudio, y asumimos plena responsabilidad por la precisión, veracidad y originalidad de esta publicación.

6. Referencias bibliográficas

- [1] M. Angelova, "Perspectives of Video Games Market Development as a Part of Creative Business", en 2019 II International Conference on High Technology for Sustainable Development (HiTech), Sofia, Bulgaria: IEEE, oct. 2019, pp. 1–4. doi: 10.1109/HiTech48507.2019.9128120.
- [2] F. Lantano, A. M. Petruzzelli, y U. Panniello, "Business model innovation in video-game consoles to face the threats of mobile gaming: Evidence from the case of Sony PlayStation", *Technological Forecasting and Social Change*, vol. 174, p. 121210, ene. 2022, doi: 10.1016/j.techfore.2021.121210.
- [3] Y. Liang, "Analysis of the Video Gaming Industry", presentado en 2022 2nd International Conference on Enterprise Management and Economic Development (ICEMED 2022), Dalian, China, 2022. doi: 10.2991/aebmr.k.220603.185.
- [4] E. Goh, O. Al-Tabbaa, y Z. Khan, "Unravelling the complexity of the Video Game Industry: An integrative framework and future research directions", *Telematics and Informatics Reports*, vol. 12, p. 100100, dic. 2023, doi: 10.1016/j.teler.2023.100100.
- [5] H. Naik, K. Yashwanth, S. P. y N. Jayapandian, "Machine Learning based Food Sales Prediction using Random Forest Regression", en 2022 6th International Conference on Electronics, Communication and Aerospace Technology, Coimbatore, India: IEEE, dic. 2022, pp. 998–1004. doi: 10.1109/ICECA55336.2022.10009277.
- [6] Y. Zhang, "Sales Forecasting of Promotion Activities Based on the Cross-Industry Standard Process for Data Mining of E-commerce Promotional Information and Support Vector Regression", pp. 212–225, 2021, doi: <https://doi.org/10.3966/199115992021023201018>.
- [7] M. Song, "Research on Influencing Factors of Video Game Sales using Binary Logistic Regression", *HSET*, vol. 107, pp. 65–70, ago. 2024, doi: 10.54097/dz307b45.
- [8] X. Tong, "Positioning game review as a crucial element of game user feedback in the ongoing development of independent video games", *Computers in Human Behavior Reports*, vol. 3, p. 100077, ene. 2021, doi: 10.1016/j.chbr.2021.100077.
- [9] Bayne Brannen y Asaniczka, "Video Game Sales 2024". Kaggle. doi: 10.34740/KAGGLE/DSV/7507070.
- [10] W. McKinney, "pandas: a foundational Python library for data analysis and statistics," *Python for High Performance and Scientific Computing*, vol. 14, 2011. [Online]. Available: <https://pandas.pydata.org/>
- [11] C. R. Harris et al., "Array programming with NumPy," *Nature*, vol. 585, no. 7825, pp. 357–362, 2020. [Online]. Available: <https://numpy.org/>
- [12] F. Pedregosa et al., "Scikit-learn: Machine Learning in Python," *Journal of Machine Learning Research*, vol. 12, pp. 2825–2830, 2011. [Online]. Available: <https://scikit-learn.org/>
- [13] Plotly Technologies Inc., "Collaborative data science," Plotly Technologies Inc., Montreal, QC, 2015. [Online]. Available: <https://plotly.com/>
- [14] Plotly Technologies Inc., "Dash by Plotly," 2016. [Online]. Available: <https://dash.plotly.com/>
- [15] J. D. Hunter, "Matplotlib: A 2D graphics environment," *Computing in Science & Engineering*, vol. 9, no. 3, pp. 90–95, 2007. [Online]. Available: <https://matplotlib.org/>
- [16] M. Waskom, "seaborn: statistical data visualization," *Journal of Open Source Software*, vol. 6, no. 60, p. 3021,

2021. [Online]. Available: <https://seaborn.pydata.org/>
- [17] L. Chen, "The Rise of the East Asian Gaming Industry: A Value-Added Chain Among the East Asian Game Companies During 2000–2010", *Global Media and China*, vol. 7, núm. 1, pp. 24–42, mar. 2022, doi: 10.1177/20594364221074422.
- [18] J. Pfau, M. Debus, J. Juul, E. Lundedal Hammar, A. Canossa, y M. Seif El-Nasr, "Predicting Success Factors of Video Game Titles and Companies", en *Entertainment Computing – ICEC 2022*, vol. 13477, B. Göbl, E. Van Der Spek, J. Baalsrud Hauge, y R. McCall, Eds., en *Lecture Notes in Computer Science*, vol. 13477, Cham: Springer International Publishing, 2022, pp. 269–282. doi: 10.1007/978-3-031-20212-4_22.
- [19] E. Goh, O. Al-Tabbaa, y Z. Khan, "Unravelling the complexity of the Video Game Industry: An integrative framework and future research directions", *Telematics and Informatics Reports*, vol. 12, p. 100100, dic. 2023, doi: 10.1016/j.teler.2023.100100.
- [20] K. Nam y H. Kim, "The determinants of mobile game success in South Korea", *Telecommunications Policy*, vol. 44, núm. 2, p. 101855, mar. 2020, doi: 10.1016/j.telpol.2019.101855.
- [21] Y. Koyama, *History of the Japanese Video Game Industry*, vol. 35. en *Translational Systems Sciences*, vol. 35. Singapore: Springer Nature Singapore, 2023. doi: 10.1007/978-981-99-1342-8.
- [22] W. M. Volckmann, "Consumer and critic reception of video game platforms: Trends from 2002–2022", *Entertainment Computing*, vol. 48, p. 100599, ene. 2024, doi: 10.1016/j.entcom.2023.100599.
- [23] A. J. Toth, E. Conroy, y M. J. Campbell, "Beyond action video games: Differences in gameplay and ability preferences among gaming genres", *Entertainment Computing*, vol. 38, p. 100408, may 2021, doi: 10.1016/j.entcom.2021.100408.
- [24] Y. Liang, "Analysis of the Video Gaming Industry", presentado en 2022 2nd International Conference on Enterprise Management and Economic Development (ICEMED 2022), Dalian, China, 2022. doi: 10.2991/aebmr.k.220603.185.
- [25] E. Yilmaz, S. Yel, y M. D. Griffiths, "Comparison of children's social problem-solving skills who play videogames and traditional games: A cross-cultural study", *Computers & Education*, vol. 187, p. 104548, oct. 2022, doi: 10.1016/j.compedu.2022.104548.
- [26] A. Faisal y M. Peltoniemi, "Establishing Video Game Genres Using Data-Driven Modeling and Product Databases", *Games and Culture*, vol. 13, núm. 1, pp. 20–43, ene. 2018, doi: 10.1177/1555412015601541.
- [27] C. Fernandez-Robin, D. Yañez, M. I. Müller, y S. McCoy, "Behavior of Current Consumers of Nintendo Video Game Consoles", en *Social Computing and Social Media*, vol. 14025, A. Coman y S. Vasilache, Eds., en *Lecture Notes in Computer Science*, vol. 14025, Cham: Springer Nature Switzerland, 2023, pp. 489–505. doi: 10.1007/978-3-031-35915-6_35.
- [28] J. Niemczyk, K. Borowski, y M. Nobel, "Strategy Approaches in the Video Game Industry. The Case Study of South Korea, the USA and Poland", *Informatyka Ekonomiczna*, vol. 2022, núm. 4, pp. 29–55, 2022, doi: 10.15611/ie.2022.1.04.
- [29] S. Kelly, V. Klézl, J. Israilidis, N. Malone, y S. Butler, "Digital Supply Chain Management in the Videogames Industry: A Systematic Literature Review", *Comput Game J*, vol. 10, núm. 1–4, pp. 19–40, jun. 2021, doi: 10.1007/s40869-020-00118-0.
- [30] J. Ruohonen y S. Hyrynsalmi, "Evaluating the use of internet search volumes for time series modeling of sales in the video game industry", *Electron Markets*, vol. 27, núm. 4, pp. 351–370, nov. 2017, doi: 10.1007/s12525-016-0244-z.
- [31] J. Y. Kim y S. H. Kang, "Windows of Opportunity, Capability and Catch-Up: The Chinese Game Industry", *Journal of Contemporary Asia*, vol. 51, núm. 1, pp. 132–156, ene. 2021, doi: 10.1080/00472336.2019.1656761.
- [32] X. Zeiler y S. Mukherjee, "Video Game Development in India: A Cultural and Creative Industry Embracing Regional Cultural Heritage(s)", *Games and Culture*, vol. 17, núm. 4, pp. 509–527, jun. 2022, doi: 10.1177/15554120211045143.
- [33] J. Fan, K. Wang, Y. Zhong, y Z. Zhu, "Robust High-Dimensional Factor Models with Applications to Statistical Machine Learning", *Statist. Sci.*, vol. 36, núm. 2, may 2021, doi: 10.1214/20-ST5785.
- [34] J. Li, Y. Zheng, H. Hu, J. Lu, y C. Zhan, "Predicting Video Game Sales Based on Machine Learning and Hybrid Feature Selection Method", en 2021 16th International Conference on Intelligent Systems and Knowledge Engineering (ISKE), Chengdu, China: IEEE, nov. 2021, pp. 497–502. doi: 10.1109/ISKE54062.2021.9755343.
- [35] D. Şener, T. Yalçın, y O. Gulseven, "The Impact of COVID-19 on the Video Game Industry", *SSRN Journal*, 2021, doi: 10.2139/ssrn.3766147.

Articulaciones críticas entre teoría *queer*, espacialidad y enfoques interseccionales-decoloniales en la arquitectura

Critical Articulations between *Queer* Theory, Spatiality, and Intersectional-Decolonial Approaches in Architecture

Hernández Montes, Luis Daniel y Loredo Cansino, Reina

Maestría en Arquitectura, Facultad de Ingeniería

Universidad Autónoma de Querétaro

Querétaro, México

ld.hernandezmontes@gmail.com reina.loredo@uaq.mx

Resumen: El artículo presenta una revisión crítica, de tipo comparativo-conceptual, orientada a articular tres bloques teóricos: teoría *queer* y de género, estudios arquitectónicos y de la espacialidad, y enfoques interseccionales-decoloniales. El objetivo es analizar cómo estos marcos se relacionan y qué aportes ofrecen al pensamiento arquitectónico contemporáneo. La metodología consistió en la recopilación y sistematización de libros y artículos especializados, organizados en una matriz que permitió reconocer patrones, tensiones y vacíos. Los resultados muestran que los cruces entre los tres bloques configuran un campo de pensamiento emergente: el diálogo *queer*-espacialidad desplaza la atención de la forma al uso y a la corporalidad; el cruce espacialidad-decolonialidad visibiliza jerarquías epistémicas y plantea nuevas pedagogías del diseño; y las articulaciones triádicas consolidan criterios para prácticas situadas y éticas del habitar. Se evidencia además la creciente incidencia de las producciones latinoamericanas en la redefinición crítica de la disciplina. En conjunto, el estudio sugiere que la arquitectura puede repensarse como una práctica de mediación cultural que reconoce la diversidad identitaria y los afectos como dimensiones constitutivas del espacio.

Palabras clave: ARQ; Arquitectura; Teoría Queer; Espacialidad; Decolonialidad

Abstract: The article presents a critical review, based on a comparative-conceptual analysis, aimed at articulating three theoretical frameworks: queer and gender theory, architectural and spatial studies, and intersectional-decolonial approaches. The objective is to analyze how these frameworks relate to one another and what contributions they offer to contemporary architectural thought. The methodology consisted of collecting and systematizing specialized books and articles, organized into a matrix that enabled the identification of patterns, tensions, and gaps. The results show that the intersections between the three frameworks outline an emerging field of critical thought: the queer-spatiality dialogue shifts attention from form to use and embodiment; the spatiality-decolonial intersection makes epistemic hierarchies visible and proposes new pedagogies of design; and the triadic articulations consolidate criteria for situated and ethical practices of inhabiting. The analysis also highlights the growing influence of Latin American scholarship in redefining the discipline from more situated and inclusive perspectives. Overall, the study suggests that architecture can be reimagined as a practice of cultural mediation, one that recognizes identity diversity and affect as constitutive dimensions of space.

Keywords: ARQ; Arquitectura; Teoría Queer; Espacialidad; Decolonialidad

1. Introducción

La disciplina arquitectónica ha sido históricamente configurada desde paradigmas normativos y binarios que han privilegiado la funcionalidad productiva y el orden social

capitalista por encima de la diversidad de experiencias y corporalidades. Esta visión, arraigada en la modernidad, ha tendido a invisibilizar prácticas espaciales disidentes, reproduciendo jerarquías en el entorno construido [1], [2]. La arquitectura, en tanto disciplina y realidad material, se ha desarrollado bajo estas lógicas, generando un vacío en torno a la inclusión

de identidades disidentes y a la problematización de los binarismos que estructuran la vida cotidiana.

En años recientes, distintos campos del conocimiento han tensionado este marco restrictivo. La teoría *queer* y de género han abierto un horizonte crítico para comprender cómo las identidades no normativas desafían los límites disciplinares y resignifican el espacio [3], [4]. Paralelamente, los estudios arquitectónicos y de la espacialidad, particularmente aquellos seleccionados desde una postura crítica hacia la producción social del espacio, han puesto de relieve las apropiaciones, resignificaciones y desigualdades que lo atraviesan [1], [5]. Desde esta perspectiva, se establece un vínculo más claro con enfoques interseccionales y decoloniales, que cuestionan jerarquías epistémicas y lógicas coloniales presentes tanto en la producción de conocimiento como en la práctica proyectual [6], [7].

Sin embargo, estos marcos suelen analizarse de manera aislada. Existen estudios *queer* que problematizan normatividades espaciales [3], investigaciones decoloniales que abordan la ciudad y el territorio [6], y análisis espaciales que examinan procesos de apropiación y exclusión [5]. No obstante, son escasos los trabajos que buscan articularlos en un mismo plano de análisis, especialmente en México, donde la producción académica que cruza abiertamente estos tres enfoques sigue siendo limitada en comparación con lo que ocurre en países de Sudamérica, como Chile o Argentina [8].

En este contexto, la importancia de articular estos marcos radica en cuestionar la idea homogeneizante de la arquitectura contemporánea, especialmente aquella guiada por la lógica del consumo y el capital, donde los entornos habitables se han vuelto cada vez más estandarizados. La diversidad corporal y experiencial aparece entonces como una oportunidad para recuperar la heterogeneidad perdida en muchas ocasiones: observar cómo colectivos disidentes fuera de la norma habitan, adaptan o reconfiguran espacios puede revelar formas alternativas de pensar la identidad, la función y la forma en la arquitectura.

Estudiar estas prácticas permite imaginar una arquitectura que no solo responda a un modelo universal de habitante (blanco, heterosexual, con recursos y perteneciente a una familia nuclear), sino que acoja modos de vida múltiples, cambiantes y en tensión con lo que damos por hecho. En este sentido, los espacios *queer* y trans amplían la mirada hacia la diferencia, problematizando también el concepto mismo de identidad, mostrando que en el “no tener una identidad fija” también se

produce una forma de existencia espacial. La ambigüedad y la mezcla pueden ser formas productivas de conocimiento y, en este caso, de diseño.

La premisa que orienta este trabajo es que el cruce entre teoría *queer* y de género, estudios arquitectónicos y de la espacialidad, y enfoques interseccionales y decoloniales permite identificar tensiones y vacíos en la literatura, y empieza a abrir la disciplina hacia nuevas formas de proyectar y habitar más plurales y conscientes de la diversidad identitaria [7], [9].

Para alcanzar este propósito, el artículo se estructura en cuatro secciones. En primer lugar, se describe la metodología de la revisión crítica y el análisis comparativo-conceptual utilizado para organizar la literatura. En segundo lugar, se presentan los resultados de la revisión divididos en los tres bloques mencionados. Posteriormente, en la discusión, se analizan las articulaciones críticas entre los bloques, considerando tanto las relaciones en pares como la triangulación que los une, y se propone cómo estas articulaciones pueden dialogar con la arquitectura entendida como realidad material. Finalmente, en las conclusiones, se sintetizan los principales aportes de la revisión, sus limitaciones y las líneas futuras de investigación.

2. Materiales y métodos

Este artículo se elaboró a partir de una revisión crítica sistémica de literatura, entendida como un proceso flexible que permite explorar, seleccionar y articular distintos enfoques teóricos con el fin de generar nuevas lecturas sobre la disciplina arquitectónica. La revisión no se planteó como un levantamiento exhaustivo ni como un ejercicio de conteo, sino como un recorrido guiado por una postura crítica hacia las relaciones entre espacio, poder y diversidad.

La búsqueda de fuentes se realizó en distintas etapas. En primer lugar, se recurrió a bases de datos académicas y catálogos universitarios (Scopus, Google Scholar, SciELO, RedALyC, Latindex, CLACSO, TDX, DOAJ, y repositorios institucionales (UAQ/UNAM)) seleccionando textos que problematizan la producción del espacio desde perspectivas *queer*, interseccionales o decoloniales. Paralelamente, el proceso incluyó la revisión de referencias contenidas en los propios textos: al leer un libro o artículo, se exploraban sus bibliografías para localizar nuevas conexiones y autores relevantes. Esta práctica (que en muchos casos amplió el horizonte más allá de lo inicialmente previsto) permitió integrar tanto textos clásicos de referencia como aportaciones recientes (2020–2025), asegurando un balance entre

fundamentos conceptuales y debates actuales. A pesar de lo anterior, la revisión enfrenta limitaciones. La concentración de fuentes en bases de datos académicas deja fuera publicaciones independientes, manifiestos, etc. Esta omisión no solo es técnica, sino epistemológica, pues revela los mecanismos mediante los cuales los discursos son legitimados o invisibilizados

3. Resultados

El material recopilado se organizó en una matriz de sistematización donde cada texto fue clasificado dentro de tres bloques: teoría *queer* y de género, estudios arquitectónicos y de la espacialidad, y enfoques interseccionales y decoloniales. Esta clasificación no es rígida (varios textos habitan más de un bloque), pero permite presentar cada uno de forma introductoria para clarificar su objeto, sus preguntas y sus herramientas.

A diferencia de una revisión bibliográfica tradicional, esta matriz no se limitó a contar fuentes, sino que buscó reconocer los aportes conceptuales que cada bloque ofrece al pensamiento arquitectónico contemporáneo. Más que un registro numérico, el análisis intenta mostrar cómo estos conjuntos de textos desplazan los límites

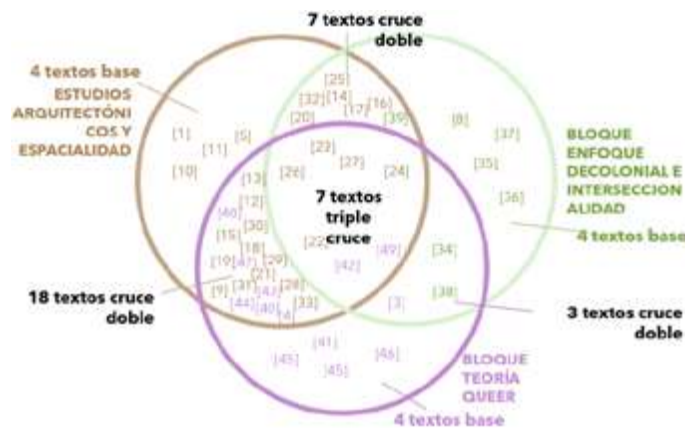


Figura 1. Diagrama de Venn que ilustra la interrelación entre los tres bloques teóricos. Elaboración propia.

disciplinares, proponiendo nuevas maneras de leer la relación entre cuerpo, espacio y poder.

Se trata, en ese sentido, de un ejercicio comparativo y articulador más que confrontativo, orientado a reconocer tanto los patrones como los vacíos en la literatura. Esta lectura transversal abre caminos para una discusión crítica sobre la arquitectura y la espacialidad, entendidas como campos donde lo social y lo material se co-producen constantemente.

Tabla 1. División de textos por bloque y orientación teórica. Elaboración propia.

Bloque	Descripción y énfasis conceptual	Textos	Total
Estudios arquitectónicos y de la espacialidad	Exploran el espacio como producto social y como campo de disputa simbólica y material. Este bloque reúne teorías que entienden la espacialidad desde procesos de apropiación, producción y significación, y que evidencian cómo las configuraciones materiales sostienen o transforman las relaciones de poder.	[1],[5],[9],[10],[11],[12],[13],[14],[15],[16],[17],[18],[19],[20],[21],[22],[23],[24],[25],[26],[27],[28],[29],[30],[31],[32],[33]	27 Textos
Enfoques interseccionales y decoloniales	Cuestionan las jerarquías epistémicas y coloniales que estructuran tanto la disciplina como su enseñanza. Plantean la necesidad de repensar la arquitectura desde conocimientos situados, reconociendo cómo raza, género, clase y territorio configuran modos desiguales de habitar.	[6],[7],[8],[34],[35],[36],[37],[38],[39]	9 textos
Teoría queer y de género	Desestabiliza los límites normativos de la disciplina al incorporar la performatividad del cuerpo y los afectos como dimensiones críticas del espacio. Muestra cómo las identidades no normativas reorientan el uso y el significado de los lugares, visibilizando que toda espacialidad implica una política del cuerpo.	[3],[4],[40],[41],[42],[43],[44],[45],[46],[47],[48],[49]	12 textos
Total general			48 textos

La Tabla 1 sintetiza los principales aportes conceptuales de cada bloque, señalando su orientación teórica.

Por su parte, la Figura 1 un diagrama de Venn, ilustra gráficamente las zonas de intersección entre los tres marcos. Esta visualización permite comprender la naturaleza porosa del corpus y anticipa los cruces conceptuales que se desarrollarán más adelante.

A partir de esta organización, los siguientes apartados (3.1, 3.2 y 3.3) describen de manera individual cada bloque teórico, precisando sus fundamentos, alcances y aportes para la arquitectura. Posteriormente, en la sección de discusión, se analizan los puntos de encuentro y las articulaciones que emergen al ponerlos en diálogo.

3.1 Bloque teoría *queer* y de género

¿Qué es lo *queer* y qué es el género?

El término *queer* surge para cuestionar las categorías estables de identidad y las normas que determinan qué cuerpos, deseos y comportamientos se consideran legítimos. Más que una identidad, lo *queer* es una posición crítica frente a la normalización; un modo de pensar y vivir que desarma las fronteras entre lo masculino y lo femenino, lo público y lo privado, lo natural y lo construido. Por su parte, el género se entiende no como una esencia biológica, sino como una construcción social y performativa. Desde esta perspectiva, las disidencias de género (personas trans, no binarias o que simplemente no encajan en las categorías normativas) revelan la fragilidad de ese sistema y abren nuevas posibilidades para pensar el cuerpo y el espacio.

Qué mira.

La teoría *queer* y de género parte de que el cuerpo es performativo y, por tanto, produce espacio: los usos, gestos y trayectorias reiteradas cargan de sentido los lugares y pueden desestabilizar normas.

Cómo lo trabaja.

Traslada nociones como performatividad, orientación y visibilidad/ocultamiento al análisis espacial, enfocándose en los límites, umbrales e interfaces (lo íntimo/público, lo visible/velado). La performatividad, entendida según Butler [3] como el modo en que los actos, gestos y usos cotidianos producen aquello que aparentan expresar, permite reconocer que el cuerpo no solo

ocupa el espacio, sino que lo crea mediante sus repeticiones.

Por su parte, la noción de orientación, desarrollada por Ahmed [4], alude a la manera en que los cuerpos se dirigen y se disponen en el mundo, revelando qué lugares los acogen y cuáles los rechazan. Estar “orientado” hacia ciertos objetos, afectos o personas significa también estar desorientado respecto de otros, y esa diferencia se traduce en espacialidades de acceso o exclusión.

Finalmente, los afectos, lejos de entenderse como emociones individuales, se conciben como fuerzas relacionales que circulan entre cuerpos, materiales y ambientes, condicionando cómo se perciben y experimentan los lugares.

En conjunto, estas nociones permiten observar cómo la materialidad y la organización del espacio orientan o restringen cuerpos, trayectorias y formas de vida [47].

¿Para qué puede servir en una disciplina como la arquitectura?

La arquitectura puede leerse como un campo de orientaciones donde la materialidad, la escala y el programa reproducen o cuestionan las normas sociales que regulan el cuerpo. En el ámbito proyectual, estos conceptos invitan a diseñar dispositivos materiales, programáticos o simbólicos que no den por sentadas las formas de uso, sino que abran espacio a la ambigüedad, al encuentro y a lo diverso [49].

El espacio no posee una estética “*queer*” en sí mismo: se vuelve *queer* cuando interrumpe la norma, cuando desacomoda los patrones de habitar y de mirar. Pensar desde esta clave no implica crear una nueva categoría formal, sino asumir la inestabilidad y la diferencia como condiciones constitutivas del diseño.

3.2 Bloque Estudios arquitectónicos y de la espacialidad

¿Qué es la espacialidad?

En los estudios críticos de la arquitectura, la *espacialidad* no se refiere únicamente a la forma física o compositiva de los lugares, sino al conjunto de relaciones sociales, simbólicas y materiales que los producen. Pensar la espacialidad implica reconocer que el espacio no es un fondo neutro donde ocurre la vida, sino un campo de fuerzas, donde se inscriben y disputan significados, jerarquías y afectos. Autores como Lefebvre en [1] y Heidegger en [10], sentaron las bases de esta comprensión, mostrando que cada entorno construido refleja y refuerza el orden social que lo origina.

Qué mira.

Los estudios de la espacialidad observan cómo los espacios se producen y transforman a través de la acción y la interacción humanas. Analizan procesos de apropiación, uso y resignificación, y examinan cómo las configuraciones materiales pueden reproducir desigualdades o habilitar formas alternativas de convivencia.

Cómo lo trabaja.

Este enfoque recurre a conceptos como la producción del espacio, la apropiación y la relacionalidad para explicar que los lugares no existen de manera independiente, se construyen socialmente. Si bien desplaza la mirada más allá de la forma arquitectónica, reconoce que es precisamente en el objeto arquitectónico donde estas relaciones se materializan: en él se inscriben las rutinas cotidianas, las dinámicas de pertenencia y las formas de control o exclusión que configuran la vida social.

Analizar la espacialidad implicaría comprender cómo el espacio habitado traduce y condiciona prácticas y, al mismo tiempo, cómo el diseño arquitectónico puede potenciar o transformar esas dinámicas. De este modo, el interés no se separa del hacer arquitectónico, sino que lo amplía, al considerar que toda decisión formal o programática participa de una red más amplia de relaciones sociales y simbólicas.

3.3 Bloque enfoques interseccionales y decoloniales

¿Qué son la interseccionalidad y la decolonialidad?

La *interseccionalidad*, formulada por Kimberlé Crenshaw en [6], se concibe como una perspectiva analítica y una herramienta conceptual para comprender cómo distintas estructuras de opresión (género, raza, clase, sexualidad, corporalidad) no actúan de manera separada, sino que se entrecruzan y se refuerzan mutuamente. Así, cada experiencia está marcada por múltiples sistemas de poder que se superponen y producen formas específicas de exclusión o privilegio.

La *decolonialidad*, en cambio, se entiende como un enfoque epistemológico y político que busca cuestionar la manera en que se ha construido el conocimiento moderno y sus pretensiones de universalidad. Autores como Mignolo en [8] y Quijano en [35] proponen que la colonialidad no terminó con el colonialismo, sino que persiste en la organización del saber, la economía y la cultura. En

arquitectura, esto sería reconocer que gran parte del pensamiento disciplinar se ha desarrollado desde una perspectiva eurocéntrica, masculina y blanca, que ha marginado otras formas de pensar y habitar el espacio.

Ambos marcos, al entrelazarse, permiten leer la arquitectura y el territorio como espacios atravesados por jerarquías históricas y epistémicas, y abren la posibilidad de construir una práctica más plural, situada y consciente de sus condiciones de producción.

Qué mira.

Este bloque se centra en las formas en que el poder económico, político, racial y de género se inscribe en el espacio. Examina cómo la colonialidad del poder organiza el territorio, define centros y periferias, y determina quién tiene derecho a ocupar o transformar el entorno. También, en ciertos estudios cruzados, observa cómo las desigualdades estructurales se materializan en el acceso a la vivienda, los servicios o la representación simbólica dentro del paisaje urbano.

Cómo lo trabaja.

Recurre a herramientas conceptuales como la desobediencia epistémica [8], las epistemologías del Sur [37] y el diseño pluriversal [7], que proponen reconocer la validez de saberes no hegemónicos y situar la práctica arquitectónica desde contextos locales y experiencias comunitarias.

En lugar de asumir una teoría única, este enfoque busca descentrar el punto de vista disciplinar, incorporando formas diversas de construir, habitar y proyectar. Desde esta perspectiva, la arquitectura puede operar como una práctica de escucha, diálogo y co-diseño, capaz de traducir saberes subalternos y modos de vida no normativos en decisiones espaciales concretas.

¿Para qué sirve en arquitectura?

Estos enfoques invitan a cuestionar desde dónde se diseña y para quién se diseña. Incorporar una mirada interseccional y decolonial permite reconocer que los entornos construidos no son neutrales, sino que reflejan y pueden reproducir las desigualdades sociales. En la práctica proyectual, esto se traduce en la necesidad de generar procesos participativos, diseños relacionales y criterios de justicia espacial que atiendan la diversidad de cuerpos, saberes y territorios.

A nivel pedagógico, estos marcos abren la posibilidad de formar arquitectos más conscientes de su posición, capaces de identificar las estructuras históricas que condicionan su quehacer y de imaginar alternativas desde los márgenes.

3.4 Cruces y distribución del corpus

A partir de la sistematización del corpus, fue posible observar no solo la especificidad de cada bloque, sino también las zonas de contacto que emergen entre ellos. Estos cruces conceptuales revelan que los límites entre la teoría *queer*, la espacialidad y la decolonialidad son porosos, y que su articulación produce nuevas formas de lectura sobre la arquitectura. Identificar estos puntos de intersección permite dimensionar la riqueza y complejidad del campo, al mostrar cómo distintos enfoques convergen en torno a problemáticas comunes vinculadas al poder, la representación y el habitar.

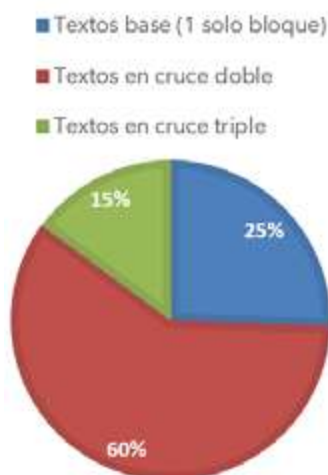


Figura 2. Distribución de los textos según tipo de cruce. El campo opera por articulaciones, no por bloques aislados. Elaboración Propia

La Figura 2 muestra la distribución del corpus según el grado de cruce entre bloques teóricos. Más de la mitad de los textos (59.6 %) articulan dos enfoques simultáneamente, mientras que un 14.9 % aborda explícitamente los tres. Esto confirma que los campos de la teoría *queer*, la espacialidad y la decolonialidad pueden entrelazarse sin tener que operar como áreas aisladas, lo que refuerza la pertinencia del análisis comparativo-conceptual realizado.

Esta tendencia sugiere que resulta metodológicamente más accesible establecer vínculos entre pares (por ejemplo, entre teoría *queer* y espacialidad, o entre decolonialidad e interseccionalidad) que construir un diálogo triádico plenamente integrado. Ello puede explicarse por la naturaleza fragmentaria del campo

y por las diferencias epistemológicas entre los marcos.

No obstante, el hecho de que existan textos que alcanzan el cruce triple demuestra la emergencia de un terreno común donde estas perspectivas comienzan a entrelazarse, consolidando la pertinencia del análisis comparativo-conceptual realizado.

La Figura 3 muestra la distribución regional de los textos analizados: el 44 % proviene del Sur Global (principalmente América Latina), mientras que el 56 % se origina en instituciones del Norte Global. Si bien esta proporción mantiene la hegemonía editorial y académica del Norte, evidencia también un desplazamiento paulatino en la geografía del pensamiento arquitectónico crítico. La presencia creciente de producciones latinoamericanas, y en menor medida africanas o asiáticas, señala que las reflexiones sobre género, cuerpo y espacio ya no se generan exclusivamente desde los centros académicos tradicionales, sino desde territorios históricamente relegados en la producción de conocimiento. Este reequilibrio, aunque aún incipiente, plantea un giro epistémico relevante: pensar la arquitectura desde el Sur no implica únicamente diversificar los casos de estudio, sino modificar las condiciones desde las que se interpreta el espacio, incorporando experiencias locales, memorias colectivas y prácticas comunitarias que cuestionan la universalidad de los paradigmas modernos. Así, la composición regional del corpus confirma que la crítica arquitectónica contemporánea se encuentra en un proceso de descentramiento, donde los márgenes comienzan a producir teoría y no solo a ilustrarla. A partir de este mapeo de cruces y procedencias, la sección siguiente examina sus implicaciones conceptuales y proyectuales.

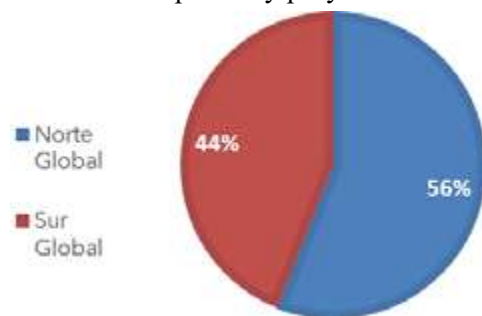


Figura 3. Distribución de los textos según región (Norte y Sur global). Evidencia descentramiento epistémico en curso. Elaboración propia.

4. Discusión

En la sección anterior se presentaron los tres bloques teóricos que estructuran el corpus de esta revisión. En cada uno se explicó su concepto central, las

herramientas con las que trabaja y su pertinencia dentro de la arquitectura.

A partir de ello, la presente discusión analiza qué sucede al poner en relación estos marcos, es decir, qué tensiones, convergencias y aportes emergen del cruce entre ellos. Estas articulaciones no pretenden construir una teoría unificada, sino revelar los puntos de encuentro que abren nuevas posibilidades para pensar y proyectar la arquitectura desde una mirada crítica, situada y plural.

La Tabla 2 sintetiza estos cruces por pares, destacando los conceptos articuladores más frecuentes que servirán como punto de partida para la interpretación crítica desarrollada en los apartados siguientes.

Tabla 2. Cruces por pares con conteo, referencias representativas y conceptos-puente. Elaboración propia.

Par de bloques	No de textos	Referencias	Conceptos-puente identificados
Teoría queer y de género ↔ Espacialidad/ arquitectura	18	[4], [9], [12], [13], [15], [18], [19], [21], [28], [29], [30], [31], [33], [20], [43], [44], [47],[48]	Performatividad del cuerpo; apropiación espacial; orientación/uso del espacio; resignificación; corporalidad situada
Teoría queer y de género ↔ Interseccional/ decolonial	3	[3], [34], [38]	Conocimiento situado; frontera; multiplicidad de ejes de opresión; colonialidad del género
Espacialidad/ arquitectura ↔ Interseccional/ decolonial	7	[14], [16],[17], [20], [25], [32], [39]	Colonialidad del espacio; lugar/marginalidad; pedagogía y contexto; jerarquías territoriales; pluriversalidad

4.1 Cruce Teoría *queer* y de género con Estudios arquitectónicos y de la espacialidad

Este cruce, el más nutrido del corpus con 18 textos según la, muestra cómo los estudios *queer*, al dialogar con la noción de espacialidad, desplazan la comprensión del espacio desde su forma hacia sus usos. Más que definir nuevas tipologías, estas perspectivas nos enseñan que el cuerpo, sus trayectorias y sus gestos cotidianos producen arquitecturas efímeras que cuestionan las normas disciplinares.

La *espacialidad queer* redefine y pone el foco en nociones como límite, privacidad y visibilidad. En este marco, la performatividad del cuerpo, planteada por Butler [3] y desarrollada en arquitectura por autoras como Bonnevier [12] o Betsky [40], permite entender que cada acto de uso es también un acto de rediseño, una reconfiguración constante del espacio. De este modo, la arquitectura ya no es concebida como objeto cerrado, se asume como proceso relacional y performativo, donde los cuerpos se vuelven agentes proyectuales que modifican la forma y el habitar.

Estas ideas se concretan en estudios que abordan la *queerificación* de espacios cotidianos como viviendas, baños o bares, mostrando cómo los cuerpos disidentes producen nuevas narrativas espaciales al reapropiar lo que se les niega [41 - 42] y [44]. En conjunto, este cruce revela que la arquitectura condiciona las prácticas del cuerpo, y puede ser transformada por ellas, abriendo un horizonte donde el diseño se concibe como un acto vivo y situado.

Operativamente, esto se traduce en criterios de proyecto que habilitan variación de usos (programas no fijados), umbrales modulables (entre lo íntimo/público) y dispositivos de visibilidad/ocultamiento que reconozcan trayectorias corporales no normativas.

4.2 Cruce Teoría *queer* y de género con enfoque Interseccional y Decolonial

Aunque menos numeroso (Tabla 2), este cruce constituye la base epistemológica del campo. Si bien la mayoría de los textos seleccionados no abordan directamente la arquitectura o el espacio construido, sí permiten comprender las raíces compartidas entre la teoría *queer*, la interseccionalidad y la decolonialidad, en tanto perspectivas críticas que cuestionan las jerarquías heredadas del pensamiento moderno y colonial.

La teoría *queer*, desde su origen, comparte con los enfoques decoloniales la crítica a las estructuras dicotómicas del conocimiento occidental (hombre/mujer, naturaleza/cultura, razón/emoción, cuerpo/mente) que organizan tanto las identidades como las prácticas sociales. Butler, en [3], y Crenshaw, en [6],

muestran cómo género, raza y clase actúan de manera entrelazada en la producción de subjetividades y desigualdades. Por su parte, Haraway, en [34], propone superar esas divisiones a través de lo híbrido y lo interdependiente, mientras que Mendoza en [38] lleva esta discusión al terreno del pensamiento situado latinoamericano, preguntándose si los sujetos subalternos pueden salvarnos desde sus propias epistemologías.

En conjunto, estos textos señalan que las normas de género y sexualidad son tecnologías de poder heredadas del colonialismo, que no solo organizan los cuerpos sino también las formas de conocer y habitar el mundo. La teoría *queer*, al entrelazarse con los marcos interseccional y decolonial, amplía su alcance político y epistémico, al reconocer que las luchas por la identidad no pueden desvincularse de las luchas contra la colonialidad y el racismo estructural.

Desde esta convergencia, lo *queer* adquiere una dimensión de desobediencia epistémica [8]: un gesto de resistencia frente a los sistemas de saber que dictan qué vidas, qué cuerpos y qué territorios merecen ser reconocidos. Esta forma de pensamiento se sitúa desde los márgenes y propone una metodología que valora el conocimiento encarnado, las memorias espaciales subalternas y las narrativas que surgen fuera de los centros de poder.

En arquitectura, este cruce no traduce aún los conceptos al espacio material, pero prepara el terreno para hacerlo. Al cuestionar quién produce el conocimiento arquitectónico y desde qué cuerpos o experiencias, abre la posibilidad de una práctica crítica que piense el diseño como un acto de traducción entre saberes marginados y formas materiales. Así, más que representar identidades disidentes, se trata de intervenir las condiciones epistemológicas y simbólicas que determinan quién puede habitar, cómo y desde dónde.

4.3 Cruce Estudios arquitectónicos y de la espacialidad con enfoque Interseccional y Decolonial

Este cruce muestra que las desigualdades espaciales no se expresan únicamente en la forma o en la distribución física, también en los modos de producir, habitar y legitimar el conocimiento arquitectónico. Más que una crítica abstracta, esta lectura se traduce en prácticas proyectuales y

pedagógicas que buscan dismantelar jerarquías de saber y abrir la disciplina a epistemologías situadas.

Autores como Mignolo en [8] y De Sousa Santos en [37] cuestionan la idea de una modernidad universal y proponen reconocer la multiplicidad de conocimientos localizados. En arquitectura, esto implica aceptar que las formas de construir, enseñar y habitar del Sur Global no son derivaciones periféricas del canon, sino saberes autónomos que pueden redefinir la práctica proyectual. Ejemplos como [17] que analiza las *Escuelas de Artes Plásticas* de Ricardo Porro en Cuba y cómo fueron leídas desde un canon eurocentrado, revelan que incluso las arquitecturas producidas desde la subalternidad pueden ser deslegitimadas cuando no responden a los parámetros del Norte Global. Esta observación interpela directamente al quehacer arquitectónico latinoamericano, obligándolo a reconocer su posición geopolítica en la producción de conocimiento.

De forma complementaria, en [14], Shields propone la noción de *topologías culturales*, entendiendo el espacio como una red de significados sociales donde se inscriben valores, memorias y prácticas. Esta lectura, al conectarse con los enfoques decoloniales, permite pensar cómo las relaciones de poder se materializan en la cultura y el territorio, y cómo pueden ser subvertidas mediante usos y apropiaciones alternativas. En sintonía, en la tesis de Padilla [25], se introduce la idea del *lugar como espacio moral*, subrayando que cada configuración espacial conlleva decisiones éticas que definen quién puede ocuparlo y bajo qué condiciones.

Otros aportes como [20] plantean una arquitectura que incorpore la interseccionalidad como marco operativo, es decir, no solo como análisis social, sino como principio de diseño que reconozca la diversidad de cuerpos y experiencias. En [32], por su parte, se propone el concepto de *Espacios de posibilidad radical*, donde el diseño se concibe como práctica que surge desde y para la interseccionalidad, abriendo un horizonte de transformación material y simbólica.

En conjunto, estos textos articulan una comprensión del espacio como construcción cultural y política. La espacialidad crítica reconoce que el entorno no solo refleja desigualdades, sino que las produce y puede reconfigurarlas. Por ello, el diseño, la enseñanza y la investigación se vuelven herramientas de redistribución epistémica, capaces de incorporar saberes locales, perspectivas feministas y experiencias subalternas

4.4 Cruce triádico

La articulación de los tres bloques amplía el horizonte crítico de la arquitectura: lo *queer* visibiliza las normas de género y sexualidad; lo interseccional-decolonial sitúa esas normas dentro de jerarquías

históricas y globales, y la espacialidad muestra su inscripción material.

Los siete textos triádicos (Tabla 2) comparten una vocación situada que desplaza el foco desde los objetos y tipologías hacia los regímenes, prácticas y materialidades donde género, colonialidad y espacio se co-constituyen.

Aunque sus aproximaciones son diversas, todos comparten la voluntad de pensar la arquitectura como práctica crítica, donde lo corporal, lo simbólico y lo territorial se entrelazan.

En el texto [27], se aborda el espacio doméstico como sistema de cuidados que desafía la cis-heteronormatividad y la familia nuclear. Desde Chile, propone una lectura interseccional y feminista que resignifica el habitar cotidiano como práctica política.

La tesis [22], amplía este horizonte al analizar cómo las experiencias de exclusión espacial producen nuevas formas de inclusión y redefinen la noción de lo público.

Por su parte, la tesis [23], materializa estas ideas en un proyecto arquitectónico que incorpora la corporalidad, la memoria y el deseo como motores de diseño, integrando así los tres enfoques desde una práctica situada en el Sur Global.

Otros textos, como [26] y [32], muestran cómo desde el Norte Global comienzan a emerger discursos que dialogan con la mirada del Sur: ambos proponen una ética del cuidado y una apertura hacia formas de habitar interdependientes, desafiando la neutralidad disciplinar.

En esa misma línea, el texto [42] de Betsky, revisita su obra de 1997 [40] reconociendo las limitaciones de su análisis original, centrado en la experiencia masculina gay, para incorporar ahora perspectivas interseccionales de raza, clase y género.

Finalmente [49] introduce la noción de “pensar desde los márgenes” como ejercicio de desplazamiento epistemológico, donde la crítica *queer* y decolonial convergen para repensar los modos de proyectar.

En conjunto, estos trabajos evidencian que la triada no busca integrar perspectivas de manera armónica, sino asumir sus fricciones como condición productiva del pensamiento arquitectónico.

En el contexto latinoamericano, esta articulación adquiere una relevancia particular al poner en diálogo marcos teóricos globales con realidades marcadas por desigualdad y violencia estructural.

5. Conclusiones

Esta revisión crítica permitió articular tres marcos que, si bien suelen estudiarse por separado, convergen en una preocupación común: la forma en que el espacio refleja, sostiene y puede transformar las estructuras de poder. La teoría *queer* y de género aporta herramientas para desnaturalizar la norma y pensar el cuerpo como agente espacial; los enfoques interseccionales y decoloniales amplían esa mirada al situar el espacio dentro de jerarquías históricas y globales; y los estudios de la espacialidad ofrecen las claves conceptuales para entender cómo estas desigualdades se inscriben materialmente en la arquitectura.

El análisis comparativo-conceptual de los textos mostró que los cruces entre estos marcos no solo enriquecen la reflexión teórica, sino que también trazan un campo emergente de pensamiento arquitectónico crítico. Los aportes provenientes del Sur Global, en especial de América Latina, revelan un desplazamiento hacia epistemologías situadas, donde la práctica arquitectónica se concibe como herramienta de resistencia y resignificación. Estas aproximaciones desafían los límites disciplinares tradicionales y plantean la posibilidad de una arquitectura que piense desde las diferencias, y no a pesar de ellas.

Metodológicamente, el uso de una matriz de sistematización permitió visualizar la densidad de los cruces conceptuales y reconocer a ciertos autores como puentes entre paradigmas. Al mismo tiempo, con las matrices conceptuales se corre el riesgo de cristalizar categorías que en la práctica son móviles y contingentes. Las fronteras entre enfoques no siempre son claras; en ocasiones se superponen o contradicen, lo que exige lecturas flexibles, no generalizables y atentas a la especificidad de cada caso. Este tipo de análisis evidencia que el conocimiento arquitectónico puede generarse no solo desde la práctica proyectual, sino también desde el cruce de discursos críticos y experiencias diversas.

En conjunto, los hallazgos sugieren que el pensamiento arquitectónico contemporáneo se encuentra en un punto de inflexión: abandonar la pretensión de universalidad para abrirse a una multiplicidad de modos de habitar. Comprender la arquitectura desde esta perspectiva implica reconocer que toda espacialidad es política, y que cada espacio (material o simbólico) encarna decisiones sobre quién puede ocuparlo y cómo. Desde esta conciencia, la arquitectura puede pensarse no solo como disciplina técnica, sino como práctica ética y cultural

comprometida con la diversidad identitaria y la justicia espacial.

A nivel docente, el estudio sugiere currículos y ejercicios de taller que incorporen indagaciones situadas (cuerpo-espacio, memorias locales, co-diseño). En el proceso proyectual, orienta protocolos de escucha y validación de saberes no hegemónicos, y métodos de iteración con usuarios/as diversos. En el proyecto, propone criterios: (a) flexibilidad programática (espacios con más de un modo válido de uso), (b) dispositivos de ambigüedad (límite, visibilidad/ocultamiento, reconfiguración temporal), y (c) diseño del cuidado (accesos, mantenimiento, seguridad afectiva) como parte del desempeño arquitectónico. Estos desplazamientos convierten la arquitectura en una práctica ética y situada, capaz de redistribuir agencia y sentido en el habitar.

Futuras líneas de investigación podrían profundizar en la dimensión proyectual de estas articulaciones, explorando cómo los criterios de diseño pueden incorporar nociones de performatividad, interdependencia y desobediencia epistémica dentro de los procesos de creación arquitectónica. Esta apertura invita a pensar la arquitectura no solo como una práctica de representación, sino como un ejercicio crítico de traducción entre cuerpos, saberes y espacios. En esa dirección, los principios derivados de los estudios *queer*, interseccionales y decoloniales pueden orientar nuevas metodologías proyectuales que cuestionen las jerarquías disciplinares y propicien modos de habitar más flexibles, éticos y expansivos.

Fuentes de financiamiento

Los autores agradecen a la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI) por el apoyo brindado para la realización de este trabajo.

Agradecimientos

Durante la preparación de este manuscrito, se utilizó la herramienta de ChatGPT (GPT-5) con el propósito de apoyo en la revisión de ortografía y coherencia textual. Los autores han revisado y editado el contenido generado y asumen plena responsabilidad por el contenido de esta publicación.

Conflictos de interés

Los autores declaran que no existen conflictos de interés.

Los financiadores no tuvieron participación en el diseño del estudio; en la recolección, análisis o interpretación de los datos; en la redacción del manuscrito; ni en la decisión de publicar los resultados.

6. Referencias bibliográficas

- [1] H. Lefebvre, *La producción del espacio*. Madrid: Capitán Swing, 2013 (orig. 1974).
- [2] P. Bourdieu, *La distinción*. Madrid: Taurus, 1988.
- [3] J. Butler, *Cuerpos que importan*. Buenos Aires: Paidós, 2002 (orig. 1993).
- [4] S. Ahmed, *What's the Use? On the Uses of Use*. Durham: Duke University Press, 2019.
- [5] T. Vidal and E. Pol, "La apropiación del espacio: una propuesta teórica para la psicología ambiental," *Revista de Psicología Social*, vol. 20, no. 1, pp. 5–20, 2005.
- [6] K. Crenshaw, "Mapping the Margins: Intersectionality, Identity Politics, and Violence against Women of Color," in *The Public Nature of Private Violence*, M. A. Fineman and R. Mykitiuk, Eds. New York: Routledge, 1994, pp. 93–118.
- [7] A. Escobar, *Designs for the Pluriverse: Radical Interdependence, Autonomy, and the Making of Worlds*. Durham: Duke University Press, 2018.
- [8] W. Mignolo, *Desobediencia epistémica: Retórica de la modernidad, lógica de la colonialidad y gramática de la descolonialidad*. Buenos Aires: Ediciones del Signo, 2010.
- [9] L. Kern, *Feminist City: A Field Guide*. Toronto: Between the Lines, 2019.
- [10] M. Heidegger, "Construir, habitar, pensar," en *Conferencias y artículos*, trad. E. Barjau. Barcelona: Ediciones del Serbal, 1994, pp. 121–139.
- [11] G. Bachelard, *La poétique de l'espace*. Paris: Presses Universitaires de France, 1957.
- [12] K. Bonnevier, *Behind Straight Curtains: Towards a Queer Feminist Theory of Architecture*. Gothenburg, Suecia: Acta Universitatis Gothoburgensis, 2007.
- [13] B. Benedicto, "Queer space in the ruins of dictatorship architecture," *Gender, Place & Culture*, vol. 21, no. 3, Duke University Press, EE.UU. 2014.
- [14] R. Shields, *Spatial Questions: Cultural Topologies and Social Spatialisations*. Inglaterra: Sage Publications, 2013.
- [15] F. Quesada López, *Arquitecturas del devenir: Ensayos sobre la performatividad del espacio*. Madrid, España: Ediciones Asimétricas, 2014.
- [16] J. Caballero Galván, "Los criterios de diseño arquitectónico de la vivienda moderna desde la

perspectiva de género”, México, *Debate Feminista*, vol. 51, 2016.
<https://doi.org/10.1016/j.df.2016.03.002>

[17] Y. Farrés Delgado, “Arquitectura y decolonialidad: algunas ideas sobre la Escuela de Artes Plásticas de Ricardo Porro,” *Aisthesis*, no. 60, Bogotá, Colombia, dic. 2016.

[18] S. Salazar Barrón, “La ciudad y el género: la producción urbana del espacio heterosexual,” *Bitácora Arquitectura*, no. 33, pp. 98–103, 2016.

[19] G. Barton y H. Harriss, “Gendered, Non-Gendered, Re-Gendered Tools for Spatial Production,” *Architecture and Culture*, vol. 5, no. 3, pp. 475–485, 2017.
<https://doi.org/10.1080/20507828.2017.1383796>

[20] L. Bachman y C. Bachman, “Intersectionality, oppression, and opportunity in architecture: Claiming the social complex,” en *ARCC 2017: Architecture of Complexity*, sesión 1A, Houston, TX, 2017.

[21] T. Gough, “Trans-architecture,” *Footprint*, vol. 11, no. 2, 2017.
<https://doi.org/10.7480/footprint.11.2.1901>

[22] D. K. Padilla Herrera, *Los espacios otros en las ciudades latinoamericanas: Redefinición de la inclusión desde la exclusión espacial*. Monterrey, México: Universidad Autónoma de Nuevo León, 2019.

[23] C. Bañados Bay-Schmith, *Rosa: espacio para el desarrollo de las artes y la identidad cuir*. Universidad de Chile, Facultad de Arquitectura y Urbanismo, 2020.

[24] B. Q. Son, “Twelve Tableaux: Tales of a Queer Architecture,” *Safe Space Zine*, no. 6, 2021.

[25] D. K. Padilla-Herrera, “¿El lugar como espacio moral? Reflexiones sobre los usos en arquitectura y el espacio público,” *Revista de Arquitectura (Bogotá)*, vol. 24, no. 1, pp. 24–32, 2022.
<https://doi.org/10.14718/RevArq.2022.24.1.3244>

[26] M. Anderson y S. Saeidi, “A Manifesto for Kind Architecture,” *Safe Space Zine*, no. 6, Noruega 2021.

[27] F. Barthou, *Domesticidad subversiva: (re)pensar el espacio doméstico*. Santiago, Chile: Pontificia Universidad Católica de Chile, 2022.

[28] P. Brandolini Robertone, “Diseñando torcido / Designing askew: Aproximaciones queer a la arquitectura y el diseño,” en *Las políticas de la planta / The Politics of the Plan*, Eje 1, Argentina, 2022

[29] S. Marchant, “Vestir, revestir, travestir / Dressing, coating, cross-dressing,” *ARQ (Santiago)*, no. 112, Chile, 2022.

[30] M. Moreno, “Construir espacios urbanos desde las geografías de género y de las sexualidades,” *GeoGraphos*, vol. 14, Argentina, 2023.
<https://doi.org/10.14198/GEOGRA2023.14.1.07>

[31] R. Acuña-Delgado, R. M. Guerrero-Valdebenito, M. Alarcón-Rodríguez y M. A. Delpino-Chamy, “Tensiones en las formas de habitar de disidencias sexuales y de género en el espacio público del centro urbano de Concepción,” *Revista RU*, vol. 26, no. 48, pp. 42–55, Chile, 2023.
<https://doi.org/10.22320/07183607.2023.26.48.04>

[32] A. Ziaee, “Spaces of Radical Possibility: Designing for and from Intersectionality,” *Trends in Higher Education*, vol. 3, no. 4, pp. 1109–1120, 2024,
[doi:10.3390/higheredu3040065](https://doi.org/10.3390/higheredu3040065)
<https://doi.org/10.3390/higheredu3040065>

[33] D. Maldonado, “Ciudades y pornoespacio. Reflexiones teóricas sobre urbanismo alternativo,” en *TRANSHUMANO. Consecuencias humanas de una revolución tecnológica*, Labýrinthos Editores, 2024.

[34] D. J. Haraway, “A Cyborg Manifesto: Science, Technology, and Socialist-Feminism in the Late Twentieth Century,” en *Simians, Cyborgs and Women: The Reinvention of Nature*. New York: Routledge, 1991.

[35] A. Quijano, “Colonialidad y modernidad/racionalidad,” en *Los conquistados: 1492 y la población indígena de las Américas*, H. Bonilla, Ed. Quito, Ecuador: FLACSO, 1992.

[36] R. Grosfoguel, “Transmodernity, Border Thinking, and Global Coloniality,” *Review (Fernand Braudel Center)*, vol. 29, no. 2, pp. 167–187, 2006.

[37] B. de Sousa Santos, *Introducción: las epistemologías del Sur*. Buenos Aires / Coimbra: CLACSO / Centro de Estudos Sociais, 2011.

[38] B. Mendoza, “Can the subaltern save us?,” *Tapuya: Latin American Science, Technology and Society*, vol. 1, no. 1, pp. 109–122, 2018.
<https://doi.org/10.1080/25729861.2018.1551462>

[39] C. Ortiz, P. Tavlou, M. Siqueira y G. Testori, “Decolonising urban knowledge(s): An ordinary imperative in extraordinary times,” *City*, vol. 29, no. 2, pp. 1–17, 2025.
<https://doi.org/10.1080/13604813.2025.2470540>

[40] A. Betsky, *Queer Space: Architecture and Same-Sex Desire*. New York, NY: William Morrow & Co., 1997.

[41] L. Crawford, *Transgender Architectonics: The Shape of Change in Modernist Space*. Londres, Inglaterra: Routledge, 2016.

- [42] A. Betsky, "Queer Space Revisited," *Footprint*, vol. 11, no. 2, pp. 61–68, 2017. doi: 10.7480/footprint.11.2.1899
- [43] A. Holder, "Five Points Toward a Queer Architecture; Or, Notes on 'Mario Banana No. 1'," *Log*, no. 41, EE. UU., 2017.
- [44] J. Sanders, "From Stud to Stalled! Architecture In Transition," *Log*, no. 41, pp. 145–154, EE. UU., 2017.
- [45] X. Kokoula, "Opening up Bodyspace: Perspectives from Posthuman and Feminist Theory," *Footprint*, vol. 11, no. 2, 2017.
- [46] S. Ahmed, *Queer Phenomenology: Orientations, Objects, Others*. Durham, NC: Duke University Press, 2006.
- [47] J. A. Díaz Hernández, "Cuerpos, signos y espacios: sobre la arquitectura panóptica de la segregación urinaria," *RELIES: Revista del Laboratorio Iberoamericano para el Estudio Sociohistórico de las Sexualidades*, no. 3, pp. 5–30, México, 2020.
- [48] D. R. Islas Vela, "La Geografía Queer o Geografía Contrasexual: de las corporeidades a la queerificación. El proceso de queerificación de la Zona Rosa en la Ciudad de México," en *Espacios, géneros y sexualidades. Reflexiones feministas de las diferencias espaciales*, P. Soto, Coord. México: Universidad Autónoma Metropolitana, 2020.
- [49] M. Cordier-Jouanne, "Queer(ing) Architecture: Architectural Thinking from the Margins," *Safe Space Zine*, no. 6, Noruega, 2021.

Evolución de la manufactura digital: del control numérico a la fábrica inteligente

Evolution of Digital Manufacturing: From Numerical Control to the Smart Factory

Aguirre-Banda Pedro*, Carillo-Mercado Jesús*, Morales-Paquot Enrique* y Fibela-Esparza Martin*

*Afiliación: Universidad Tecnológica de Coahuila**

Coahuila, México.

Correo electrónico de los autores;

24190001@alumno.utc.edu.mx

24190003@alumno.utc.edu.mx

24190009@alumno.utc.edu.mx

martinf@utc.edu.mx

ORCID (<https://orcid.org/0000-0002-9999-4425>)

Resumen: La evolución de la manufactura digital ha transformado radicalmente los sistemas de control numérico computarizado (CNC), pasando de equipos aislados y limitados al procesamiento secuencial de códigos, a nodos inteligentes integrados en arquitecturas ciberfísicas propias de la Industria 4.0. Este estudio presenta un análisis comparativo de las tendencias tecnológicas, los beneficios operativos y los desafíos asociados a la transición hacia la fábrica inteligente. La metodología se basó en una revisión documental sistemática de fuentes científicas, técnicas y normativas publicadas entre 2012 y 2023, considerando criterios de inclusión enfocados en digitalización, sensorización, interoperabilidad y ciberseguridad industrial. Los resultados muestran que la integración de estándares abiertos como OPC UA y MTConnect, junto con sistemas de monitoreo y mantenimiento predictivo basados en datos, ha permitido incrementos en la eficiencia operativa, reducción de paros no planificados y mejoras en la trazabilidad de procesos. Asimismo, se identifican limitaciones relacionadas con los costos de implementación, la capacitación del personal y la gestión de riesgos cibernéticos. Se concluye que la fábrica inteligente representa una etapa avanzada de la manufactura digital, sustentada en la conectividad, la analítica de datos y la inteligencia artificial, donde la adaptabilidad tecnológica y la seguridad de la información constituyen los nuevos ejes de competitividad industrial.

Palabras clave: Manufactura digital; Control numérico computarizado; Interoperabilidad; Ciberseguridad industrial; Fábrica inteligente.

Abstract: The evolution of digital manufacturing has profoundly transformed computer numerical control (CNC) systems, shifting from isolated devices limited to sequential code processing to intelligent nodes integrated within cyber-physical architectures characteristic of Industry 4.0. This study presents a comparative analysis of technological trends, operational benefits, and challenges associated with the transition toward the smart factory. The methodology was based on a systematic literature review of scientific, technical, and regulatory sources published between 2012 and 2023, considering inclusion criteria focused on digitalization, sensorization, interoperability, and industrial cybersecurity. The results show that the implementation of open standards such as OPC UA and MTConnect, combined with data-driven monitoring and predictive maintenance systems, has enabled improvements in operational efficiency, reduction of unplanned downtime, and enhanced process traceability. However, limitations were identified in relation to implementation costs, workforce training, and cybersecurity risk management. It is concluded that the smart factory represents an advanced stage of digital manufacturing, supported by connectivity, data analytics, and artificial intelligence, where technological adaptability and information security emerge as key drivers of industrial competitiveness.

Keywords: Digital manufacturing; Computer numerical control; Interoperability; Industrial cybersecurity; Smart factory.

1. Introducción

La manufactura industrial ha experimentado una transformación constante desde la segunda mitad del siglo XX, impulsada por la evolución de los sistemas de control y automatización. Durante la denominada

tercera revolución industrial, el desarrollo del Control Numérico Computarizado (CNC) representó uno de los mayores avances tecnológicos al permitir la ejecución automatizada de procesos de mecanizado con una precisión y repetibilidad antes inalcanzables [1].



Fig. 1 Transición de la Industria 1.0 a la Industria 4.0 [21]

Estos sistemas se consolidaron como la base de la automatización moderna, aunque en sus primeras versiones operaban de manera aislada y con escasa capacidad de comunicación con otras máquinas o plataformas informáticas [2], [3].

Con la aparición de la Industria 4.0, la manufactura experimentó un cambio de paradigma al integrar tecnologías digitales, redes inteligentes y sistemas ciberfísicos (CPS) que permiten conectar máquinas, sistemas y personas en entornos de producción completamente interconectados [4]. Este modelo propone la digitalización integral de la cadena de valor mediante la integración de herramientas de automatización avanzada, la analítica de datos, la inteligencia artificial y la Internet Industrial de las Cosas (IIoT) [5]. En este contexto, el CNC ha evolucionado desde una herramienta de control autónoma hacia un nodo inteligente capaz de comunicarse con sistemas de gestión empresarial (ERP), de ejecución de manufactura (MES) y de supervisión y adquisición de datos (SCADA) [6], [7].

El desarrollo de estándares de comunicación abiertos como OPC UA y MTConnect ha permitido superar las limitaciones de interoperabilidad entre equipos de distintos fabricantes, creando un entorno de manufactura digital conectada que posibilita la recolección y análisis de datos en tiempo real [8]. Gracias a esta conectividad, los procesos productivos pueden monitorearse y ajustarse automáticamente, habilitando estrategias de mantenimiento predictivo, control adaptativo y trazabilidad integral del proceso [9].

Sin embargo, la digitalización industrial no está exenta de desafíos. La convergencia entre la operación física y los sistemas digitales genera vulnerabilidades en materia de ciberseguridad industrial, lo que exige implementar protocolos de protección que garanticen la integridad, disponibilidad y confidencialidad de la información generada en planta [10]. Asimismo, la transición hacia la fábrica inteligente requiere de un reentrenamiento del

personal técnico y de la adopción de nuevos perfiles profesionales capaces de interpretar y gestionar datos en entornos de automatización avanzada [11].



Fig. 2 Comparación entre máquina manual y máquina automatizada [22]

En este contexto, el presente estudio tiene como propósito analizar la evolución de la manufactura digital desde el control numérico tradicional hasta los sistemas inteligentes de producción, identificando los factores tecnológicos, operativos y humanos que han permitido esta transición, así como los retos actuales para su consolidación. Para ello, se desarrolló una revisión documental comparativa de literatura científica y técnica reciente, enfocada en los ejes de conectividad, sensorización, mantenimiento predictivo y ciberseguridad.

2. Materiales y métodos

El presente trabajo se desarrolló mediante una revisión documental comparativa, orientada a analizar la evolución tecnológica del control numérico computarizado (CNC) y su integración progresiva dentro de los entornos digitales característicos de la Industria 4.0.

El propósito metodológico fue identificar las principales tendencias, beneficios y desafíos en la transición desde los sistemas tradicionales de automatización hacia la manufactura inteligente, a partir del estudio sistemático de literatura científica, técnica y normativa especializada.

2.1. Estrategia de búsqueda y selección de fuentes

El diseño metodológico se estructuró en cuatro fases principales:

1. **Definición del alcance temático**, considerando los ejes conceptuales de manufactura digital, interoperabilidad, sensorización, mantenimiento predictivo y ciberseguridad industrial.
2. **Selección de fuentes documentales** provenientes de

bases de datos científicas como ScienceDirect, IEEE Xplore, SpringerLink y Scopus, así como documentos técnicos emitidos por organismos internacionales de normalización, entre ellos la IEC, NIST, OPC Foundation y MTConnect Institute.

3. **Criterios de inclusión y exclusión**, definidos para garantizar la calidad y pertinencia de la información. Se consideraron únicamente publicaciones entre 2012 y 2023, en idioma inglés o español, que abordaran aplicaciones industriales, desarrollos tecnológicos o estudios de caso sobre digitalización de procesos de manufactura. Se excluyeron trabajos de carácter divulgativo o sin sustento experimental/documental verificable.
4. **Análisis comparativo y categorización**, mediante la sistematización de hallazgos en matrices temáticas. Esta etapa permitió establecer relaciones entre los avances tecnológicos, sus efectos operativos y los factores que condicionan su adopción en entornos industriales.

2.2. Procedimiento de recopilación y análisis

El proceso de recopilación de información se efectuó siguiendo una secuencia lógica orientada a la replicabilidad del estudio. En la primera etapa, se aplicaron combinaciones de palabras clave derivadas de los descriptores del Tesoro de la UNESCO, tales como digital manufacturing, computer numerical control, interoperability, predictive maintenance y industrial cybersecurity. Los resultados iniciales fueron filtrados por año, tipo de publicación y nivel de citación.

Posteriormente, cada fuente seleccionada fue clasificada en función de su nivel de aplicación tecnológica (teórico, experimental o industrial) y su alcance en la cadena de valor manufacturera (máquina, célula de trabajo o sistema integrado). Esta categorización permitió comparar la madurez tecnológica de las implementaciones documentadas y determinar las tendencias predominantes en la digitalización de la manufactura.

Para garantizar la validez del análisis, se empleó un enfoque de triangulación conceptual, contrastando los resultados entre fuentes académicas, reportes industriales y normativas internacionales. Los indicadores cualitativos obtenidos se consolidaron en matrices

comparativas que describen los avances, ventajas y limitaciones de los sistemas de manufactura digital basados en CNC.

Finalmente, se sintetizó la información en cinco ejes analíticos:

- Conectividad e interoperabilidad,
- Sensorización y monitoreo inteligente,
- Mantenimiento predictivo y analítica de datos,
- Integración de sistemas de control y gestión,
- Ciberseguridad industrial y resiliencia digital.

Estos ejes sirvieron como estructura base para la organización y análisis crítico de los resultados presentados en la siguiente sección.

2.3. Consideraciones éticas y de integridad académica

El proceso de revisión documental se realizó conforme a los principios de integridad académica y originalidad científica, asegurando la correcta citación de las fuentes empleadas y la ausencia de plagio. Previamente a la redacción final, el manuscrito fue verificado mediante software especializado de detección de similitud (Turnitin), manteniendo un índice inferior al 20 %, en cumplimiento con los lineamientos éticos establecidos por el comité organizador del Coloquio [13].

Asimismo, se respetaron los derechos de autor de las figuras, tablas y extractos textuales incluidos, y no se incorporaron materiales con licencias restrictivas. Las herramientas de apoyo basadas en inteligencia artificial se emplearon únicamente con fines de revisión gramatical y estructuración, siguiendo los criterios de transparencia recomendados por el comité editorial.

3. Resultados

El análisis comparativo de las fuentes consultadas permitió identificar una evolución progresiva en la manera en que la manufactura industrial adopta tecnologías digitales dentro de sus procesos. En particular, el Control Numérico Computarizado (CNC) se ha consolidado como un elemento esencial del ecosistema de manufactura inteligente, pasando de ser un sistema cerrado, autónomo y limitado al procesamiento de códigos secuenciales, a convertirse en un nodo interconectado y analítico, capaz de transmitir, recibir y procesar datos en tiempo real [1]–[3].

Los resultados obtenidos demuestran que la incorporación de tecnologías de sensorización, conectividad y analítica de datos ha modificado profundamente la gestión de los procesos productivos, generando mejoras cuantitativas en eficiencia, trazabilidad y flexibilidad. Estas transformaciones pueden analizarse en cinco dimensiones técnicas principales: interoperabilidad, sensorización, mantenimiento predictivo, integración de sistemas y ciberseguridad industrial [4]–[6].

3.1. Interoperabilidad y flujo de información

La interoperabilidad constituye la base de la manufactura digital moderna. Tradicionalmente, los sistemas CNC operaban en entornos cerrados con protocolos propietarios, lo que restringía la comunicación entre equipos de diferentes fabricantes [7]. Con la incorporación de estándares abiertos, principalmente OPC UA y MTConnect, se estableció un marco de conectividad universal que permite el intercambio bidireccional de datos entre máquinas, sistemas de control, plataformas MES y ERP [8], [9].

Esta conectividad posibilita el monitoreo remoto de desempeño, la sincronización de múltiples líneas de producción y la reconfiguración automática ante cambios en los requerimientos de manufactura. Los estudios revisados indican que estas tecnologías pueden incrementar la eficiencia operativa entre un 10 % y 15 %, y reducir los tiempos de cambio de lote hasta en un 25 % [10].

Los datos de la Tabla 1 confirman los beneficios directos de la digitalización de los CNC dentro del marco de la Industria 4.0, destacando que la flexibilidad de cambios de referencia y la reducción de defectos en piezas representan las mejoras más significativas. Esto demuestra que la integración digital no solo incrementa la productividad, sino que impulsa la capacidad de respuesta y la adaptabilidad del sistema productivo.

La Figura 3 refuerza visualmente los resultados obtenidos, mostrando que la flexibilidad de cambios experimenta una mejora promedio de aproximadamente 50 %, mientras que la reducción de defectos alcanza valores cercanos al 40 %. Estos

hallazgos concuerdan con investigaciones previas en las que se reporta un impacto positivo de la conectividad y la analítica de datos sobre la eficiencia de planta [6], [10].

Tabla 1 Impacto cuantitativo de la digitalización de CNC en la Industria 4.0 [3], [6]–[8], [10]–[12], [19], [20].

Métrica evaluada	Antes de digitalizar	Después de digitalizar	Mejora estimada
Tiempos de inactividad	100 % (base)	70–80 %	Reducción 20–30 %
Vida útil de herramientas de corte	100 % (base)	115–125 %	Incremento 15–25 %
Defectos en piezas	100 % (base)	60 %	Disminución hasta 40 %
Flexibilidad en cambios de referencia	100 % (base)	150 %	Incremento de velocidad 50 %

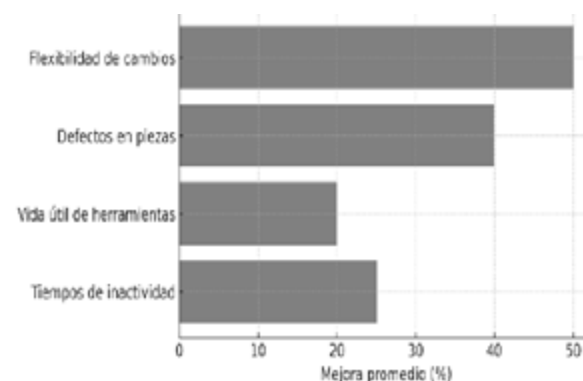


Fig. 3 Impacto de la digitalización del CNC en la Industria 4.0 [3], [6]–[8], [10]–[12], [19], [20]

3.2. Sensorización avanzada y control inteligente

El desarrollo de sensores embebidos en los equipos CNC ha permitido implementar esquemas de control adaptativo basados en datos reales del proceso. La instalación de sensores de torque, vibración, temperatura y corriente eléctrica posibilita el monitoreo continuo de la condición de la máquina y de la herramienta. Los datos adquiridos son procesados por algoritmos de aprendizaje automático capaces de predecir el desgaste de componentes, optimizar parámetros de corte y evitar fallas prematuras [11].

La Tabla 2 resume los efectos operativos documentados en

diversas aplicaciones industriales, mostrando que la sensorización y el uso de analítica predictiva generan mejoras significativas en los indicadores clave de desempeño (OEE, defectos, consumo energético y vida útil de herramienta).

Estos resultados corroboran que la sensorización constituye un pilar central de la manufactura inteligente, al permitir una comprensión profunda del comportamiento dinámico del proceso y su optimización autónoma. La integración de sistemas de monitoreo inteligente ha generado mejoras de hasta 30 % en disponibilidad, 20 % en vida útil de herramienta y reducciones del 12 % en consumo energético, fortaleciendo la sostenibilidad del sistema productivo.

Tabla 2 Impacto de la sensorización digital sobre indicadores de desempeño industrial [8]–[10], [12].

Indicador operativo	Sistema convencional (sin sensorización)	Sistema digitalizado (con sensorización y analítica)	Variación promedio (%)
Tiempo promedio entre fallas (MTBF)	720 h	930 h	+29 %
Paros no planificados	14 eventos/año	9 eventos/año	–36 %
Vida útil de herramienta	100 % (base)	120 %	+20 %
Tasa de defectos dimensionales	2.5 %	1.2 %	–52 %
Consumo energético por pieza	100 %	88 %	–12 %
Eficiencia global del equipo (OEE)	75 %	86 %	+11 %

3.3. Integración de sistemas de manufactura

El avance hacia la fábrica inteligente se sustenta en la integración vertical y horizontal de los sistemas productivos. Los datos generados por los CNC digitalizados se transfieren en tiempo real a las plataformas MES y ERP, permitiendo la sincronización de

los niveles operativos, tácticos y estratégicos [4], [8].

La conexión directa entre entornos CAD/CAM y el control CNC facilita ajustes automáticos en trayectorias, condiciones de corte y secuencias de mecanizado, en función del desempeño registrado. Esto habilita el concepto de manufactura adaptable, caracterizada por la capacidad de respuesta inmediata ante variaciones de demanda o cambio de referencia.

La integración de sistemas mejora la trazabilidad, reduce el tiempo de reacción ante incidencias y optimiza la coordinación logística. En estudios de aplicación industrial se han reportado incrementos en la eficiencia operativa de hasta 22 %, junto con una disminución significativa de defectos, al disponer de información continua y actualizada sobre el proceso [9]–[10].

3.4. Ciberseguridad industrial y resiliencia digital

La conectividad masiva que caracteriza a los sistemas de manufactura digital también genera nuevos retos en términos de seguridad. La exposición de equipos CNC a redes corporativas o entornos externos implica riesgos de acceso no autorizado, pérdida de datos y ataques a la integridad del sistema [10].

Las normas IEC 62443 y la guía NIST SP 800-82 establecen los principios de defensa en profundidad, segmentación de redes, autenticación multifactor y gestión de certificados digitales como mecanismos esenciales para garantizar la integridad y disponibilidad de los sistemas de control [13]. La aplicación de estos marcos normativos contribuye a reducir la vulnerabilidad y asegurar la continuidad operativa de los procesos productivos.

A nivel industrial, se ha observado que las organizaciones que integran la ciberseguridad desde la fase de diseño presentan una reducción significativa de incidentes, además de una mejora en la confianza digital entre proveedores y clientes. En consecuencia, la seguridad de la información se consolida como un eje transversal dentro de la arquitectura de la fábrica inteligente.

3.5. Desafíos y tendencias futuras

Aunque los resultados evidencian avances notables, la adopción plena de la manufactura digital enfrenta todavía obstáculos estructurales. Los principales desafíos se relacionan con los altos costos de inversión inicial, la compatibilidad entre sistemas legados, la escasez de personal

especializado y la resistencia cultural al cambio tecnológico [9].

No obstante, las tendencias actuales apuntan hacia la implementación de gemelos digitales, computación en la nube, inteligencia artificial y robótica colaborativa, que constituyen los pilares de la fábrica cognitiva. En este nuevo entorno, el CNC evolucionará hacia un sistema predictivo, autoajustable y consciente de su propio estado, capaz de optimizar el rendimiento energético y operativo mediante la interpretación autónoma de datos históricos.

3.6. Síntesis

La evidencia presentada confirma que la manufactura digital no representa solo una modernización tecnológica, sino una redefinición integral del modelo productivo. El CNC ha pasado de ser un ejecutor de instrucciones a un agente inteligente dentro de una red de decisión distribuida.

Los beneficios observados —mayor eficiencia, reducción de paros, incremento de la trazabilidad, flexibilidad operativa y seguridad de la información— consolidan la manufactura digital como una herramienta estratégica de competitividad industrial.

Finalmente, el éxito en la transición hacia la fábrica inteligente dependerá de la capacidad de las organizaciones para integrar conocimiento, tecnología y talento humano, garantizando entornos de producción sostenibles, resilientes y basados en información confiable.

3.7. Aplicaciones industriales representativas

Diversos estudios y reportes industriales evidencian la aplicación práctica de las tecnologías de manufactura digital en diferentes sectores. Por ejemplo, Bosch Rexroth implementó arquitecturas basadas en los estándares OPC UA y MTConnect para integrar el monitoreo de máquinas CNC en tiempo real, logrando una reducción del 25 % en paros no planificados y un incremento del 18 % en la eficiencia operativa [26]. De manera similar, BMW Group adoptó plataformas de gemelos digitales para sincronizar los datos de producción entre los niveles de control y gestión, alcanzando mejoras de hasta 20 % en la eficiencia global del equipo (OEE) y una trazabilidad total del proceso.

En el sector aeroespacial, Airbus ha desarrollado sistemas de mantenimiento predictivo basados en analítica de datos provenientes de sensores embebidos en máquinas de mecanizado, lo que ha permitido anticipar fallas con una precisión superior al 90 % y reducir los costos de mantenimiento correctivo [4], [20]. Estos ejemplos demuestran que los principios de interoperabilidad, sensorización y analítica predictiva analizados en este estudio no solo son viables conceptualmente, sino que se encuentran en plena implementación en entornos industriales avanzados.

En conjunto, los casos presentados confirman que la fábrica inteligente no constituye una proyección teórica, sino una realidad en evolución que redefine los modelos de operación, mantenimiento y toma de decisiones en la manufactura contemporánea.

4. Discusión

Los resultados obtenidos permiten analizar con profundidad los efectos que la digitalización del Control Numérico Computarizado (CNC) ha generado sobre los sistemas productivos. La evidencia recopilada en distintas fuentes coincide en que la adopción de tecnologías asociadas a la Industria 4.0 ha transformado el papel del CNC, pasando de ser un ejecutor mecánico de trayectorias a un componente ciberfísico inteligente dentro de redes de manufactura altamente interconectadas [1]–[3].

4.1. Análisis comparativo de resultados

El análisis de las Tablas 1 y 2 demuestra que los impactos de la digitalización son consistentes con una mejora sostenida del desempeño industrial. La reducción de tiempos de inactividad (20–30 %) y el aumento de vida útil de herramienta (15–25 %) evidencian que los procesos digitalizados aprovechan la información en tiempo real para ajustar parámetros de corte, minimizar vibraciones y optimizar los ciclos de mecanizado [3], [6]–[8], [10]–[12], [19], [20].

La flexibilidad operativa, con incrementos del 50 % en los tiempos de cambio de referencia, representa uno de los beneficios más significativos, dado que la interoperabilidad habilita una respuesta inmediata ante variaciones de producto o de lote. En conjunto, estos resultados confirman que la digitalización industrial no solo mejora los indicadores cuantitativos, sino que redefine la estructura funcional del sistema de manufactura.

4.2. Correlación con estudios previos

La revisión de literatura evidencia coincidencias importantes con investigaciones internacionales que reportan mejoras comparables en eficiencia global del equipo (OEE), calidad dimensional y confiabilidad del proceso.

La Tabla 3 resume los hallazgos de algunos de los estudios más relevantes dentro del periodo analizado, los cuales concuerdan con las tendencias observadas en el presente trabajo.

Tabla 3 Comparativa de hallazgos clave entre diferentes autores con base en [2], [4]–[6], [10], [13].

Autor / Año	Enfoque del estudio	Hallazgos principales	Coincidencia
Lee et al., 2015 [4]	Arquitectura ciberfísica en manufactura	Propone la integración CNC–MES–ERP para trazabilidad total	Secoincide en el enfoque de integración vertical y flujo de datos bidireccional
Lu, 2017 [10]	Revisión tecnológica de Industria 4.0	Identifica interoperabilidad y sensorización como factores críticos	Confirma ambos como ejes técnicos centrales
Gilchrist, 2016 [5]	Internet Industrial de las Cosas (IIoT)	Plantea conectividad como base del mantenimiento predictivo	Coincide con resultados de Tablas 1 y 2
Kagermann et al., 2013 [2]	Estrategia alemana de Industria 4.0	Define la digitalización como marco de transición industrial	Alineado con la evolución conceptual del CNC
NIST SP 800-82, 2015 [13]	Ciberseguridad en sistemas industriales	Recomendaciones de defensa en profundidad y segmentación	Coincide con la propuesta de resiliencia digital

Los resultados del presente estudio se integran coherentemente con las tendencias descritas en la literatura: la digitalización del CNC es una transición gradual, pero irreversible, que conduce hacia sistemas productivos más inteligentes, seguros y adaptativos. Los beneficios obtenidos en eficiencia, calidad y disponibilidad son equivalentes a los documentados por Lee et al. [4] y Lu [10], lo cual refuerza la validez de los resultados presentados en este trabajo.

4.3. Implicaciones tecnológicas y organizacionales

El análisis de los resultados evidencia que la transición hacia la Industria 4.0 no se limita a la incorporación de nuevas tecnologías, sino que implica una transformación integral del modelo productivo y organizacional. En particular, la industria de maquinaria, tradicionalmente orientada a la fabricación en lotes pequeños y personalizados, representa uno de los escenarios más reveladores de esta evolución. Su dinamismo y la necesidad de adaptarse a mercados volátiles, a la creciente personalización de los productos y a la globalización de la demanda, la convierten en un caso paradigmático para estudiar las implicaciones de la digitalización [3], [6]–[8], [10], [12].

La Figura 4 ilustra el modelo conceptual de esta transición, mostrando la representación de la fábrica del futuro en el sector de maquinaria. Este entorno combina flexibilidad, inteligencia digital y conectividad total, configurando un sistema donde la integración entre ingeniería, operación y mantenimiento se realiza de forma continua y bidireccional.

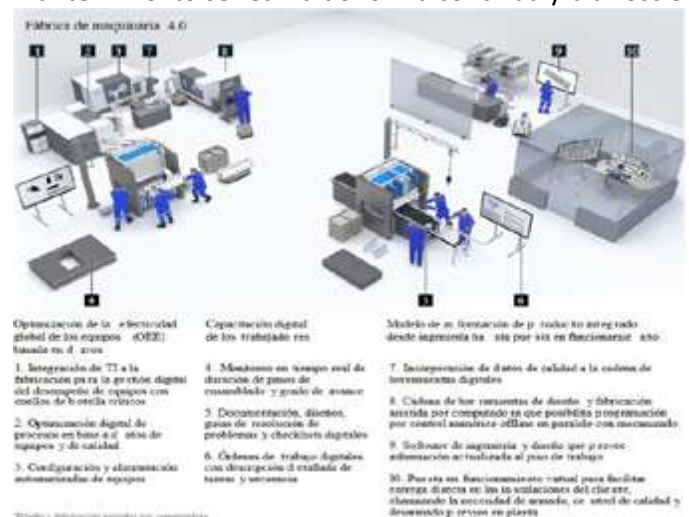


Fig. 4. Representación conceptual de la Industria 4.0 en la fabricación en lotes pequeños para la industria de maquinaria.

La figura 4 describe la fábrica del futuro como un sistema ciberfísico altamente adaptativo, estructurado alrededor de

tres drivers de valor fundamentales, que determinan las implicaciones tecnológicas y organizacionales del proceso de digitalización:

1. Modelo integrado de información de producto.

Este componente constituye el eje central del entorno digital. Integra los flujos de información desde la fase de diseño y simulación (CAD/CAE) hasta la puesta en marcha y operación (CAM/MES/ERP), creando un gemelo digital del producto que acompaña su ciclo de vida completo.

Gracias a este modelo, los procesos de ingeniería, manufactura y servicio se sincronizan en tiempo real, permitiendo una producción eficiente y globalmente distribuida, incluso en contextos de alta complejidad técnica. Este enfoque no solo reduce los errores y tiempos de desarrollo, sino que también permite una trazabilidad total de cada pieza o componente, reforzando la calidad y la capacidad de personalización.

2. Capacitación digital del personal.

La transformación tecnológica solo es viable si se acompaña de una transformación del talento. En sectores como la maquinaria, donde predominan los operarios especializados y existe una alta rotación o escasez de personal calificado, la digitalización de la capacitación se convierte en un factor estratégico.

Las plataformas de entrenamiento en realidad aumentada (AR), simulación inmersiva o aprendizaje guiado permiten reducir las curvas de aprendizaje y fragmentar tareas complejas en pasos simples, de manera que incluso trabajadores sin formación específica puedan ejecutar procesos con precisión. Este enfoque democratiza el conocimiento técnico, garantiza la continuidad operativa y eleva la productividad general de la planta.

3. Optimización del OEE basada en datos.

El tercer driver se centra en la eficiencia global del equipo (OEE), considerada el indicador más representativo del desempeño productivo. En la fábrica digital, el OEE se optimiza a partir del análisis masivo de datos provenientes de sensores, historiales de operación y algoritmos predictivos.

Estas herramientas permiten detectar cuellos de botella, anticipar fallas, ajustar parámetros de mecanizado y proponer acciones de mantenimiento preventivo o correctivo automatizado. De esta manera, la mejora continua deja de depender de inspecciones humanas y pasa a ser un proceso autónomo y autoaprendizaje, donde cada ciclo productivo retroalimenta la inteligencia

del sistema.

En conjunto, estos tres impulsores reflejan el nuevo equilibrio entre tecnología, conocimiento y valor industrial. El modelo descrito en la Figura 4 demuestra que la digitalización no solo persigue la automatización, sino la sinergia entre personas, máquinas y datos, orientada a la adaptabilidad y a la creación de valor agregado en entornos complejos.

Desde la perspectiva organizacional, la adopción de este modelo requiere estructuras colaborativas y horizontales, capaces de integrar ingeniería, manufactura, calidad y mantenimiento bajo un mismo flujo de información digital. La interdisciplinariedad se vuelve un requisito operativo, y la gestión del conocimiento digital reemplaza los modelos tradicionales de supervisión jerárquica.

Finalmente, la representación conceptual de la industria de maquinaria sirve como referente extrapolable a otros sectores de manufactura discreta. Su aplicación demuestra que la Industria 4.0 no es una meta final, sino un proceso evolutivo basado en la integración progresiva de tres factores:

- Información unificada de producto,
- Desarrollo y capacitación digital del talento,
- Optimización inteligente del rendimiento.

Estos elementos consolidan un entorno donde la producción, el aprendizaje y la innovación convergen en un ciclo continuo de mejora, representando la esencia misma de la fábrica cognitiva del futuro.

4.4. Limitaciones y desafíos

A pesar de los avances alcanzados, la digitalización enfrenta obstáculos estructurales que limitan su adopción universal. Entre ellos destacan los costos iniciales de implementación, la compatibilidad de sistemas legados, la falta de estándares universales de comunicación y la escasez de profesionales especializados [9], [10]. Estas barreras son especialmente críticas en pequeñas y medianas empresas, donde los recursos limitados dificultan la modernización tecnológica.

Otro desafío fundamental es la ciberseguridad industrial, cuya complejidad aumenta conforme crece la interconectividad. La aplicación de estrategias de defensa en profundidad, autenticación multifactor y segmentación de red, de acuerdo con las normas IEC 62443 y NIST SP 800-82 [13], resulta indispensable para proteger los activos digitales y garantizar la continuidad operativa.

4.5. Perspectiva y proyección futura

Los resultados y comparaciones realizadas permiten anticipar que la próxima etapa de evolución tecnológica se centrará en la integración de gemelos digitales, robótica colaborativa e inteligencia artificial autónoma. El CNC se convertirá en un orquestador inteligente del proceso, capaz de anticipar desviaciones, autooptimizar trayectorias y coordinarse con otros sistemas en tiempo real.

Esta tendencia apunta hacia la fábrica cognitiva, donde los datos, las decisiones y las máquinas conforman un ecosistema autoadaptativo. El desafío principal radica en equilibrar la innovación tecnológica con la sostenibilidad, la ciberseguridad y la ética digital, asegurando una transición responsable hacia un modelo industrial más inteligente e inclusivo.

5. Conclusión

El análisis de la evolución del Control Numérico Computarizado (CNC) dentro del paradigma de la Industria 4.0 demuestra que la digitalización de los sistemas de manufactura constituye un punto de inflexión en la ingeniería de producción contemporánea. La transición desde el CNC aislado hacia arquitecturas ciberfísicas integradas redefine la interacción entre las máquinas, los procesos y el capital humano, estableciendo las bases de la fábrica inteligente.

Los resultados cuantitativos obtenidos y consolidados en las Tablas 1 y 2 evidencian mejoras significativas en indicadores clave de desempeño:

- Reducción de los tiempos de inactividad entre un 20 % y 30 %,
- Incremento de la vida útil de herramienta en rangos del 15 % al 25 %,
- Disminución de defectos hasta en un 40 %,
- Y una mayor flexibilidad en cambios de referencia, con mejoras de hasta 50 % [3], [6]–[8], [10]–[12], [19], [20].

Estas cifras confirman que la digitalización industrial produce beneficios directos en productividad, confiabilidad y calidad del producto. Al mismo tiempo, los resultados cualitativos respaldan que la integración de protocolos abiertos de comunicación (OPC UA,

MTConnect), junto con sistemas de monitoreo inteligente y analítica predictiva, habilita un entorno productivo más eficiente, seguro y resiliente [4], [9].

Desde el punto de vista tecnológico, la digitalización transforma el CNC en un nodo inteligente capaz de recolectar, procesar y analizar datos de proceso, permitiendo un control adaptativo y la detección temprana de anomalías. Este cambio implica la consolidación del CNC como el núcleo operativo de la fábrica digital, responsable de coordinar el flujo de información entre el nivel físico y el nivel de gestión.

En el ámbito organizacional, la digitalización redefine las estructuras jerárquicas tradicionales, promoviendo la toma de decisiones descentralizada basada en información en tiempo real. Este fenómeno requiere un nuevo perfil profesional en la industria: técnicos e ingenieros especializados en analítica de datos, ciberseguridad y sistemas de manufactura integrados. Por tanto, la formación de capital humano con competencias digitales es tan esencial como la inversión en infraestructura tecnológica.

Asimismo, el estudio evidencia que la ciberseguridad industrial constituye un factor crítico para la continuidad operativa. La adopción de estándares como IEC 62443 y las guías NIST SP 800-82 [13] debe considerarse una condición estructural, no complementaria, en cualquier implementación de sistemas conectados. Solo bajo entornos protegidos puede garantizarse la integridad de los datos y la estabilidad del proceso.

De manera conceptual, la evolución representada en la Figura 4 sintetiza el camino hacia la fábrica cognitiva, caracterizada por la integración de inteligencia artificial, gemelos digitales y aprendizaje autónomo. Este nivel de madurez tecnológica implica una convergencia entre la ingeniería, la informática y la gestión industrial, donde cada decisión se sustenta en evidencia generada por los propios sistemas.

Finalmente, los hallazgos del estudio permiten establecer las siguientes conclusiones generales:

1. La digitalización del CNC constituye el eje fundamental de la transición hacia la manufactura inteligente, permitiendo una producción más flexible, trazable y eficiente.
2. La adopción de interoperabilidad, sensorización y analítica predictiva mejora simultáneamente la productividad, la calidad y la sostenibilidad de los procesos.

3. La ciberseguridad es un componente indispensable para preservar la integridad de los sistemas interconectados y garantizar su operación continua.
4. El éxito de la transformación digital depende tanto de la tecnología implementada como del nivel de capacitación y cultura digital del personal.
5. La evolución hacia la fábrica cognitiva representa un proceso continuo de innovación que demanda equilibrio entre automatización, inteligencia y responsabilidad social tecnológica.

En conjunto, este estudio demuestra que la manufactura digital no solo es una tendencia tecnológica, sino una estrategia integral de competitividad y sostenibilidad industrial. La empresa que logre integrar conocimiento, conectividad y seguridad en un entorno de mejora continua se posicionará como protagonista en la próxima etapa de la revolución industrial.

Aunque el presente estudio ofrece una visión integral sobre la evolución del CNC y la manufactura digital, se reconoce como limitación la ausencia de un análisis empírico de casos industriales propios o de validación experimental directa de los resultados.

En este sentido, se propone como línea de trabajo futuro la incorporación de estudios de caso comparativos que permitan evaluar cuantitativamente los beneficios de la digitalización en distintos contextos productivos, así como la exploración de métricas de madurez digital y su relación con el desempeño operativo y la sostenibilidad industrial.

Agradecimientos

Se agradece a la Universidad Tecnológica de Coahuila por el apoyo académico.

“Durante la preparación de este manuscrito/estudio, los autores utilizaron [ChatGPT 5] con el propósito de revisar la redacción y ortografía. Los autores han revisado y editado el contenido generado y asumen plena responsabilidad por el contenido de esta publicación.

Conflictos de interés

Los autores declaran no tener conflictos de interés.

Abreviaturas

AI / IA: Inteligencia artificial
AR: Realidad aumentada
CAD: Diseño asistido por computadora
CAE: Ingeniería asistida por computadora
CAM: Manufactura asistida por computadora
CNC: Control numérico computarizado
CPS: Sistemas ciberfísicos
ERP: Planificación de recursos empresariales
HMI: Interfaz hombre-máquina
IIoT: Internet industrial de las cosas
MES: Sistema de ejecución de manufactura
MTBF: Tiempo medio entre fallas
NIST: Instituto Nacional de Estándares y Tecnología
OEE: Eficiencia global del equipo
OPC UA: Arquitectura unificada de comunicaciones abiertas
PLC: Controlador lógico programable
SCADA: Supervisión, control y adquisición de datos
SPD: Deformación plástica severa
UA: Arquitectura unificada

6. Referencias bibliográficas

- [1] R. Y. Zhong, X. Xu, E. Klotz, and S. T. Newman, “Intelligent manufacturing in the context of Industry 4.0: A review,” *Engineering*, vol. 3, no. 5, pp. 616–630, Oct. 2017, doi: 10.1016/j.eng.2017.05.015.
- [2] H. Kagermann, W. Wahlster, and J. Helbig, *Recommendations for Implementing the Strategic Initiative INDUSTRIE 4.0: Final Report of the Industrie 4.0 Working Group*. National Academy of Science and Engineering, Apr. 2013.
- [3] M. Brettel, N. Friederichsen, M. Keller, and M. Rosenberg, “How virtualization, decentralization and network building change the manufacturing landscape: An Industry 4.0 perspective,” *Int. J. Mech. Ind. Sci. Eng.*, vol. 8, no. 1, pp. 37–44, 2014.
- [4] L. Monostori, “Cyber-physical production systems: Roots, expectations and R&D challenges,” *Procedia CIRP*, vol. 17, pp. 9–13, 2014, doi: 10.1016/j.procir.2014.03.115.
- [5] K. Schwab, *The Fourth Industrial Revolution*. New York, NY, USA: Crown Business, 2017.

[6] MTConnect Institute, “MTConnect standard overview,” 2022. [Online]. Available: https://docs.mtconnect.org/MTC_Part_1-0-Overview_and_Fundamentals_1-6-0.pdf

[7] OPC Foundation, “OPC Unified Architecture – Overview,” 2023. [Online]. Available: <https://opcfoundation.org/>

[8] A. H. Meitzler, “Sincronización de la programación de la producción con la asignación de recursos para componentes prefabricados en un entorno de sistema multiagente,” *Journal of Manufacturing Systems*, vol. 49, pp. 45–56, Apr. 2018, doi: 10.1016/j.jmsy.2018.09.004.

[9] National Institute of Standards and Technology (NIST), *Guide to Industrial Control Systems (ICS) Security*, NIST Special Publication 800-82 Rev. 2, May 2015.

[10] P. J. Ralston, J. P. Tretter, and J. H. Smith, “Predictive maintenance techniques and their role in the transformation to Industry 4.0,” *IEEE Access*, vol. 8, pp. 217103–217114, 2020.

[11] D. Mourtzis, E. Vlachou, and N. Milas, “Industrial big data as a result of IoT adoption in manufacturing,” *Procedia CIRP*, vol. 55, pp. 290–295, 2016, doi: 10.1016/j.procir.2016.07.038.

[12] Y. Lu, “Industry 4.0: A survey on technologies, applications and open research issues,” *Journal of Industrial Information Integration*, vol. 6, pp. 1–10, Jun. 2017, doi: 10.1016/j.jii.2017.04.005.

[13] A. Y. C. Nee, S. K. Ong, G. Chryssolouris, and D. Mourtzis, “Augmented reality applications in design and manufacturing,” *CIRP Annals*, vol. 61, no. 2, pp. 657–679, 2012, doi: 10.1016/j.cirp.2012.05.010.

[14] L. Bibby and D. B. Dehe, “Definición y evaluación de los niveles de madurez de la Industria 4.0: el caso del sector de defensa,” *Production Planning & Control*, vol. 29, no. 10, pp. 1030–1043, 2018, doi: 10.1080/09537287.2018.1503355.

[15] P. J. M. Brous and H. B. Janssen, “The dual effects of the Internet of Things (IoT): A systematic review of the benefits and risks of IoT adoption by

organizations,” *Int. J. Inf. Manage.*, vol. 51, no. 5, 2020.

[16] F. Tao, Q. Qi, A. Liu, and A. Kusiak, “Fabricación inteligente basada en datos,” *Journal of Manufacturing Systems*, vol. 48, pp. 157–169, 2018, doi: 10.1016/j.jmsy.2018.01.006.

[17] J. Schlechtendahl, M. Keinert, F. Kretschmer, A. Lechler, and A. Verl, “Making existing production systems Industry 4.0-ready,” *Production Engineering*, vol. 9, no. 1, pp. 143–148, 2015, doi: 10.1007/s11740-014-0586-3.

[18] J. Wan, S. Tang, D. Li, S. Wang, C. Liu, H. Abbas, and A. V. Vasilakos, “A manufacturing big data solution for active preventive maintenance,” *IEEE Trans. Ind. Informatics*, vol. 13, no. 4, pp. 2039–2047, 2018, doi: 10.1109/TII.2017.2670505.

[19] H. Boyes, B. Hallaq, J. Cunningham, and T. Watson, “The industrial Internet of Things (IIoT): An analysis framework,” *Computers in Industry*, vol. 101, pp. 1–12, 2018, doi: 10.1016/j.compind.2018.04.015.

[20] T. H.-J. Uhlemann, C. Lehmann, and R. Steinhilper, “The digital twin: Realizing the cyber-physical production system for Industry 4.0,” *Procedia CIRP*, vol. 61, pp. 335–340, 2017, doi: 10.1016/j.procir.2016.11.152.

[21] Sutori, “Las cuatro revoluciones industriales,” *Sutori*, [Online]. Available: <https://www.sutori.com/es/historia/las-cuatro-revoluciones-industriales--1R2z2W2kvEqY4uvSPePNLSVz>. [Accessed: Oct. 11, 2025].

[22] Induservi, “Comparativa: Envasado manual vs. automatizado,” *Induservi*, [Online]. Available: <https://induservi.com/comparativa-enzasado-manual-vs-automatizado/>.

[23] International Electrotechnical Commission (IEC), *IEC 62443 Series – Industrial Communication Networks: IT Security for Networks and Systems*, Geneva, Switzerland, 2018.

[24] Committee on Publication Ethics (COPE), *Ethical Guidelines for Peer Reviewers*, Version 2, Mar. 2017.

[25] F. Tao, Q. Qi, L. Wang, and A. Nee, “Digital twins and cyber-physical systems toward smart manufacturing and

Industry 4.0: Correlation and comparison,”
Engineering, vol. 5, no. 4, pp. 653–661, 2019.

[26] McKinsey & Company, *The Future of Machinery Manufacturing: Industry 4.0 in Small-Batch Production*, Global Industry 4.0 Insights Report, 2025.

[27] OPC Foundation, *OPC Unified Architecture Specification*, Part 1–14, Release 20

Determinación del Precio Adecuado para la Negociación en Compra y Venta de Inmuebles

Determination of the Appropriate Price for Negotiation in the Purchase and Sale of Real Estate

Candelas García Juan Pedro

*Afiliación: División de Estudios de Posgrados e Investigación, Facultad de Ingeniería
Universidad Autónoma de Querétaro*

Santiago de Querétaro, Querétaro, México.

Correo electrónico de los autores; ORCID (ORCID: [<https://orcid.org/0009-0002-0750-4941>])

Resumen: El presente artículo analiza la determinación del precio adecuado en la compra y venta de inmuebles en zonas urbanas de Querétaro, México. Mediante un enfoque cuantitativo y un diseño no experimental de tipo transversal, se estudia la incidencia de factores objetivos y subjetivos en la valoración inmobiliaria, con base en datos de mercado y una encuesta aplicada a 18 participantes del sector. Se examinan los métodos de valuación más utilizados, como el enfoque de mercado, el costo de reposición y la capitalización de rentas. Los resultados muestran que la ubicación y el valor de mercado son los factores más influyentes al fijar el precio de una propiedad, mientras que características como el tamaño y el estado de conservación resultan menos determinantes. La mayoría de los encuestados comprende el concepto de valor de mercado como el precio promedio de propiedades comparables, reconociendo la influencia de la demanda. Asimismo, se observa una preferencia por enfoques multifactoriales que integran elementos técnicos, económicos y contextuales, lo que refleja un nivel adecuado de alfabetización inmobiliaria y coincidencia con prácticas internacionales. El estudio concluye que la fijación de precios no puede reducirse a un solo criterio, sino que requiere la integración de diversas dimensiones para lograr negociaciones justas, eficientes y basadas en información confiable.

Palabras clave: Valuación inmobiliaria; Precio de vivienda; Mercado inmobiliario; Negociación; Querétaro

Abstract: This article analyzes the determination of the appropriate price in real estate transactions in Querétaro, Mexico. Using a quantitative, cross-sectional non-experimental design, it examines the impact of objective and subjective factors on property valuation, based on market data and a survey of 18 participants. The study evaluates key valuation methods such as the market approach, replacement cost, and income capitalization. Findings indicate that location and market value are the most decisive factors, while size and physical condition play a secondary role. Most respondents understand market value as the average price of comparable properties, acknowledging the role of demand. A multifactorial approach that integrates technical, economic, and contextual aspects is preferred, aligning with international practices. The study concludes that price determination must integrate multiple dimensions to ensure fair, efficient, and reliable negotiations.

Keywords: Real estate valuation; Housing price; Real estate market; Negotiation; Querétaro.

1. Introducción

En el mercado inmobiliario, la valoración de una propiedad es esencial para garantizar transacciones exitosas, ya sea para compra, venta, renta o financiamiento hipotecario, pues permite a compradores y vendedores tomar decisiones informadas y optimizar la negociación [1]. El valor de un inmueble depende de múltiples factores, como la ubicación, la oferta y la demanda, las condiciones del mercado, la infraestructura disponible, el estado de conservación y la cercanía a servicios esenciales, los cuales influyen tanto en su percepción como en su valor intrínseco [2]. Instituciones como el INDAABIN han desarrollado metodologías especializadas para determinar el valor de mercado justo de un inmueble basadas en criterios técnicos estandarizados [3]; sin embargo, aspectos cualitativos y contextuales también afectan la percepción del valor entre las partes involucradas.

La negociación inmobiliaria constituye otro elemento clave, dado que la percepción del valor puede variar entre compradores y vendedores; factores como urgencia de venta, condiciones de financiamiento, presentación del inmueble y contexto macroeconómico inciden en la equidad de los acuerdos, por lo que la transparencia y el acceso a información confiable resultan fundamentales (Muñoz & Hernández, 2018; Serrano & Martínez, 2021). Asimismo, establecer un precio adecuado es crucial: sobreestimarlos puede retrasar la venta, mientras que

subestimarlos puede generar pérdidas económicas y afectar la valorización futura del inmueble, considerando además la evolución urbana y políticas públicas que influyen en su apreciación [5].

Este artículo analiza los factores determinantes del valor de las propiedades y los métodos de valuación más utilizados: enfoque de mercado, método físico y capitalización de rentas, con el objetivo de optimizar el proceso de compra-venta y adaptarlo a contextos locales, especialmente en ciudades en crecimiento como Querétaro, donde la dinámica inmobiliaria presenta desafíos y oportunidades particulares.

2. Materiales y métodos

El estudio se desarrolla bajo un enfoque cuantitativo con diseño no experimental y transversal, cuyo propósito es analizar los factores que influyen en la determinación del precio adecuado para la negociación de bienes inmuebles en zonas urbanas del municipio de Querétaro. Este diseño resulta pertinente al capturar información en un momento específico, lo que permite describir y analizar fenómenos en mercados dinámicos, tal como lo señalan Hernández-Sampieri, Fernández-Collado y Baptista (2014). La investigación combina fuentes secundarias y primarias para ofrecer una visión integral. Entre las fuentes secundarias se incluyen portales inmobiliarios, bases de datos de agencias locales, reportes de valuación, registros catastrales y estudios de mercado elaborados por instituciones como la AMPI o la Sociedad Hipotecaria Federal, que

proporcionan información verificable sobre precios, ubicación, superficie, número de habitaciones, antigüedad, estado de conservación y equipamiento. Las fuentes primarias se recabaron mediante una encuesta estructurada dirigida a 18 participantes del sector, entre ellos agentes inmobiliarios, valuadores, corredores, propietarios y compradores, lo que permitió contrastar datos objetivos con percepciones y experiencias de los actores del mercado.

El análisis se centra en propiedades residenciales seleccionadas mediante un muestreo no probabilístico por conveniencia, priorizando inmuebles homogéneos en tipología, ubicación y características físicas, con un mínimo esperado de 50 a 100 registros que aseguren estabilidad en los modelos estadísticos [20]. El cuestionario incluyó ocho preguntas cerradas de opción múltiple sobre factores de valoración, comprensión del concepto de valor de mercado, métodos de fijación de precios, influencia de la demanda y estrategias de negociación. Su validez se garantizó a través de una prueba piloto aplicada a cinco participantes y la revisión de expertos en valuación. Para el tratamiento de los datos se aplicaron diversas técnicas: estadística descriptiva y exploratoria (promedios, rangos, histogramas y diagramas de dispersión), análisis de correlación de Pearson (asociaciones entre superficie, antigüedad, ubicación y precio), y regresión lineal múltiple (estimación del efecto conjunto de las variables independientes sobre el precio de venta). Adicionalmente, se analizaron las respuestas de la encuesta mediante frecuencias y porcentajes, comparando percepciones entre compradores,

vendedores y agentes.

Finalmente, se evaluaron los tres métodos técnicos de valuación reconocidos en la práctica profesional: el enfoque de mercado, el costo de reposición y la capitalización de rentas, en concordancia con lo establecido por el International Valuation Standards Council (IVSC, 2020), que promueve la aplicación de criterios estandarizados y comparables a nivel global. La validez y confiabilidad del estudio se aseguraron mediante triangulación de fuentes, consistencia interna de los instrumentos y aplicación de principios éticos de respeto, confidencialidad y consentimiento informado, con el fin de garantizar que los resultados reflejen una visión rigurosa y transparente de los procesos de valoración inmobiliaria en Querétaro.

3. Resultados

3.1 ¿Cuál es el principal factor para fijar el precio de un inmueble? (Gráfica 1)



La gráfica presentada corresponde a los resultados obtenidos a partir de una encuesta aplicada a 18 participantes del sector inmobiliario. El objetivo de esta pregunta fue identificar cuál es, según la percepción de estos actores, el factor más determinante al momento de establecer el precio de un inmueble.

Los datos se representan mediante un gráfico de pastel, (ver Gráfica 1) en el cual se visualizan cuatro categorías principales: ubicación, valor de mercado, tamaño, y

estado de conservación. Los resultados muestran que las opciones de ubicación y valor de mercado concentran cada una el 44.4% de las respuestas, lo que significa que en conjunto representan casi el 89% de la opinión total de los encuestados. En contraste, tanto tamaño como estado de conservación obtuvieron una baja representación, con solo 5.6% cada uno.

Desde una perspectiva interpretativa, estos resultados reflejan que los factores contextuales y económicos, como la localización del inmueble y su posicionamiento en el mercado actual, son percibidos como los principales determinantes del valor de una propiedad. La ubicación ha sido históricamente considerada un factor clave, ya que influye directamente en el acceso a servicios, infraestructura, seguridad, conectividad y calidad del entorno urbano. Por su parte, el valor de mercado representa el precio más probable que puede alcanzar un inmueble en condiciones de libre competencia, y suele basarse en la comparación con propiedades similares recientemente vendidas.

En cambio, el tamaño y el estado de conservación, aunque forman parte del análisis técnico en cualquier avalúo inmobiliario, son considerados por los participantes como factores secundarios. Esto sugiere que, si bien influyen en la percepción del precio, su peso relativo se ve eclipsado por los elementos externos que rodean al inmueble y por la dinámica del mercado local.

Este tipo de resultados es consistente con lo establecido por diversas metodologías de valuación particularmente el enfoque de mercado y el modelo hedónico de precios que otorgan un peso considerable a las condiciones del entorno urbano y a las tendencias reales de oferta y demanda. Asimismo, esta información resulta relevante para orientar a los profesionales del sector en la toma de decisiones, ya que revela cómo se valoran las distintas variables en la práctica y cuál es la lógica predominante entre quienes participan en los procesos de compraventa.

En conclusión, la gráfica 1 pone en evidencia una preferencia marcada por los factores relacionados con el entorno geográfico y la información comparativa del mercado, por encima de las características físicas o técnicas del inmueble. Esta percepción es clave para entender cómo se construyen las expectativas de valor en el mercado inmobiliario y permite fortalecer los procesos de negociación y fijación de precios desde un enfoque más alineado con la realidad del sector.

I.II ¿Qué refleja el “valor de mercado de un inmueble? (Gráfica 2)



Los resultados obtenidos a partir de la encuesta aplicada, con el objetivo de conocer su percepción acerca de lo que representa el valor de mercado de un inmueble. La mayoría de los participantes, correspondiente al 77.8 % del total, identificó dicho valor con el precio promedio de

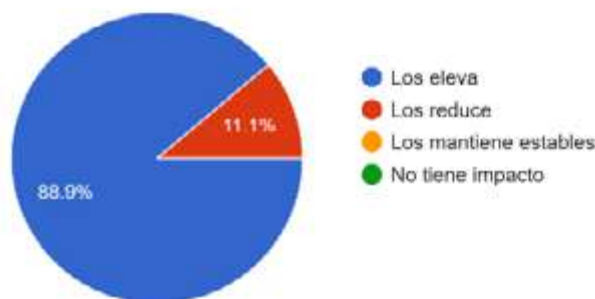
propiedades similares en el mercado, lo cual sugiere una comprensión relativamente sólida del concepto desde una perspectiva técnica y comercial, ya que este enfoque es uno de los más utilizados en los métodos comparativos de valuación inmobiliaria. En segundo lugar, el 22.2 % de los encuestados consideró que el valor de mercado se refleja en el precio que el comprador está dispuesto a pagar, interpretación que, si bien es más subjetiva, también forma parte del comportamiento real del mercado al estar influida por la oferta y la demanda. Resulta relevante destacar que ninguna de las personas encuestadas seleccionó como opción válida el precio de compra original ni el valor de la tasación oficial, lo cual pone de manifiesto que estos elementos son percibidos como ajenos a la determinación directa del valor de mercado, posiblemente por su naturaleza histórica o normativa. En conjunto, los resultados de la gráfica 2 permiten inferir que existe un conocimiento general adecuado sobre los elementos que conforman el valor de mercado de un bien inmueble, especialmente en lo relativo a la comparación con propiedades similares y a la dinámica de negociación en contextos reales.

De acuerdo con los resultados obtenidos, cuyo objetivo fue identificar el método comúnmente utilizado para estimar el precio de un inmueble, la mayoría de los agentes inmobiliarios equivalente al 72.2 % del total encuestado señaló que la comparación con propiedades similares constituye la herramienta de análisis más utilizada para obtener dicho valor. Esta preferencia sugiere una comprensión relativamente sólida del concepto de valor de mercado desde una perspectiva técnica y comercial, dado que este enfoque es uno de los más aplicados en la práctica profesional. En segundo lugar, el 16.7 % de los participantes consideró que el valor del inmueble se determina con base en el precio que el comprador está dispuesto a pagar; aunque esta interpretación es más subjetiva, también refleja una visión válida del funcionamiento real del mercado, influido por factores de oferta y demanda. Es importante destacar que ninguna de las personas encuestadas eligió como opción válida el precio de compra original ni el valor de la tasación oficial, lo que indica que estos elementos son percibidos como no representativos del valor de mercado, posiblemente debido a su carácter histórico o administrativo. En conjunto, los resultados permiten inferir que existe un conocimiento general adecuado entre los agentes inmobiliarios sobre los elementos que conforman el valor de mercado de un bien inmueble, especialmente en lo referente al análisis comparativo y a la dinámica de negociación presente en contextos reales.

I.III ¿Qué método es más común para determinar el precio de un inmueble? (Gráfica 3)



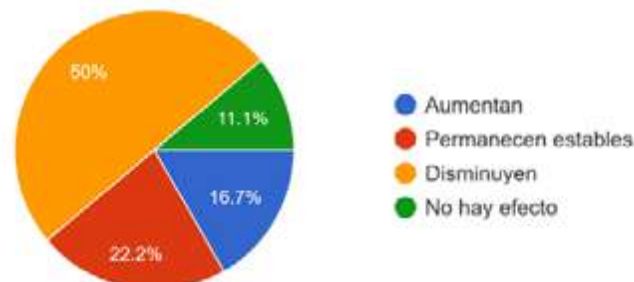
I.IV ¿Cómo afecta una alta demanda a los precios de los inmuebles? (Gráfica 4)



La gráfica 4 de pastel ilustra los resultados de una encuesta realizada a 18 personas, quienes respondieron a la pregunta: “¿Cómo afecta una alta demanda a los precios de los inmuebles?”. El segmento más grande del gráfico, correspondiente al 88.9% de los encuestados, indica que consideran que una alta demanda eleva los precios de los inmuebles. Este segmento está representado en color azul y constituye la gran mayoría de las respuestas, lo cual refleja una percepción ampliamente compartida de que el aumento en la demanda provoca una presión alcista en los valores del mercado inmobiliario. Por otro lado, el 11.1% de los participantes (2 de 18 personas), identificado con el color rojo, opina que una alta demanda reduce los precios, lo cual representa una interpretación minoritaria y contraria a la lógica económica predominante. Es importante resaltar que ningún encuestado seleccionó las opciones “los mantiene estables” ni “no tiene impacto”, correspondientes a los colores amarillo y verde, respectivamente, lo que sugiere que todos los participantes consideran que la alta demanda sí influye en los precios, aunque con diferentes

interpretaciones sobre la dirección de ese efecto. En conjunto, la gráfica confirma una tendencia clara: existe una fuerte asociación entre alta demanda y aumento en los precios de los inmuebles entre los encuestados.

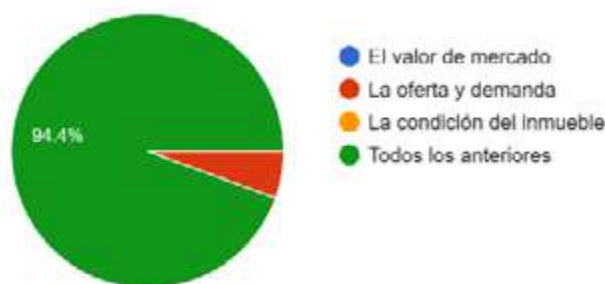
I.V ¿Qué ocurre con los precios de los inmuebles en una economía débil? (Gráfica 5)



La gráfica 5 muestra los resultados obtenidos a partir de una encuesta aplicada a la pregunta: “¿Qué ocurre con los precios de los inmuebles en una economía débil?”. El análisis revela que la opción predominante fue “Disminuyen”, seleccionada por el 50% de los encuestados (9 de 18), lo cual se representa en color naranja. Esta respuesta indica que la mitad de los participantes considera que una economía en condiciones de debilidad tiende a provocar una contracción en los precios del mercado inmobiliario, probablemente debido a factores como la reducción del poder adquisitivo, la menor demanda de bienes raíces o la incertidumbre económica general. En segundo lugar, con un 22.2% de las respuestas (4 personas), se encuentra la opción “Permanecen estables”, representada en color rojo, lo que sugiere que una parte de los encuestados percibe cierta resiliencia en los precios del sector inmobiliario, incluso frente a un contexto económico adverso. Por su parte, el 16.7% (3 personas) opina que los precios “Aumentan”, opción reflejada en color azul, lo cual podría atribuirse a fenómenos como inflación, especulación, o inversión en

activos refugio. Finalmente, el 11.1% restante (2 personas) considera que una economía débil “No tiene efecto” en los precios, opción representada en color verde, lo que indica una visión minoritaria que disocia la coyuntura económica del comportamiento del mercado inmobiliario. En conjunto, los resultados evidencian que, aunque existen distintas percepciones, la mayoría de los encuestados coincide en que una economía debilitada tiende a impactar negativamente el valor de los inmuebles.

I.VI ¿Qué debe tener en cuenta un vendedor al fijar el precio de venta? (Gráfica 6)



Los resultados de una consulta realizada. La representación visual evidencia una marcada concentración de opiniones en torno a una visión integral del proceso de fijación de precios en el ámbito inmobiliario. En efecto, el 94.4% de los encuestados, es decir, 17 de las 18 personas consultadas, seleccionó la opción “Todos los anteriores”, ilustrada en color verde, lo que indica que consideran indispensable tomar en cuenta de manera simultánea el valor de mercado, la oferta y demanda, así como la condición del inmueble. Este resultado pone de manifiesto una percepción ampliamente compartida sobre la necesidad de adoptar un enfoque multifactorial y analítico para establecer un precio

competitivo y realista que favorezca una negociación exitosa. Por otra parte, una sola persona, que representa el 5.6% del total de respuestas, optó por señalar únicamente “La oferta y demanda” como criterio relevante, opción destacada en color rojo. Es importante señalar que ninguna de las respuestas individuales señaló exclusivamente al valor de mercado ni a la condición del inmueble como único factor determinante, lo cual refuerza la idea de que, para la mayoría de los participantes, estos elementos no deben ser considerados de forma aislada. En conclusión, los datos revelan una clara tendencia hacia la valoración integral de distintos componentes económicos y físicos del inmueble al momento de establecer su precio de venta, lo cual resulta coherente con las mejores prácticas recomendadas en la teoría y en la praxis del mercado inmobiliario.

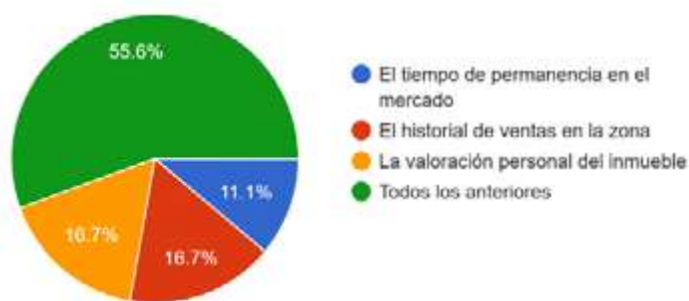
I.VII Si un inmueble tiene un precio más alto que su valor, ¿Qué debería hacer un comprador? (Gráfica 7)



stra las percepciones de un grupo de personas ante una situación donde el precio de un inmueble supera su valor de mercado, destacando que el 77.8 % considera que lo más adecuado es negociar un precio más bajo, lo cual evidencia una preferencia mayoritaria por estrategias activas de ajuste económico frente a condiciones desfavorables del mercado. Un 16.7 % opina que lo conveniente sería esperar a que el

precio disminuya, reflejando una postura de cautela y observación ante la dinámica del mercado inmobiliario. En contraste, solo el 5.6 % optaría por realizar la compra sin negociación, mientras que ninguna persona se mostró dispuesta a aceptar el precio sin cuestionarlo. Estos resultados sugieren una inclinación generalizada hacia la racionalidad financiera, la valoración objetiva de los activos y la defensa del poder adquisitivo, lo que puede asociarse con una comprensión elemental del principio de equidad en transacciones y del funcionamiento básico de las fuerzas de oferta y demanda.

I.VIII ¿Qué debe considerar un comprador al negociar el precio de un inmueble? (Gráfica 8)



La gráfica muestra la distribución porcentual de las respuestas a la pregunta sobre los factores que un comprador debe considerar al negociar el precio de un inmueble, revelando que el 55.6 % de los encuestados opta por integrar múltiples criterios incluyendo el tiempo de permanencia del bien en el mercado, el historial de ventas en la zona y la valoración personal del inmueble lo cual indica una comprensión holística y multifactorial del proceso de negociación inmobiliaria. Este resultado sugiere que más de la mitad de los participantes reconocen la importancia

de un enfoque integral, donde la toma de decisiones está informada tanto por datos objetivos del mercado como por percepciones subjetivas del valor. Por otro lado, un 16.7 % se inclina exclusivamente por el historial de ventas, otro 16.7 % por la valoración personal, y solo un 11.1 % considera determinante el tiempo de permanencia en el mercado. Esta dispersión parcial de respuestas refuerza la idea de que, si bien algunos compradores priorizan elementos específicos, la mayoría reconoce que una evaluación completa y comparativa de todas las variables ofrece mayores ventajas estratégicas en la negociación.

Desde una perspectiva científica, estos datos evidencian un grado de conocimiento financiera en temas inmobiliarios, donde el análisis de mercado, la psicología del valor y la temporalidad convergen como pilares fundamentales para la toma de decisiones informada.

4. Discusión

Los resultados obtenidos a partir de la serie de gráficas analizadas permiten identificar tendencias claras en la percepción de actores del sector inmobiliario respecto a los factores que determinan el precio de un inmueble. La mayoría de los encuestados otorgan una importancia determinante a la ubicación y al valor de mercado como elementos clave en la formación del precio, lo que es consistente con estudios previos en valuación inmobiliaria, donde se reconoce que la localización influye de manera directa en la accesibilidad, la plusvalía y el atractivo del entorno urbano (Rosen, 1974; Glaeser, Gyourko & Saks, 2005). Asimismo, la relevancia otorgada al valor de mercado se alinea con el enfoque comparativo de valuación, ampliamente utilizado a nivel

internacional, el cual se basa en la analogía con propiedades similares y recientes en el mercado [12]. En contraposición, factores como el tamaño o el estado de conservación del inmueble, si bien forman parte del análisis técnico del avalúo, son considerados por los encuestados como elementos secundarios, lo cual también ha sido observado en investigaciones en mercados desarrollados, donde la percepción del comprador tiende a priorizar lo contextual sobre lo estructural [9].

Por otro lado, se evidenció que un alto porcentaje de los participantes asocia la demanda elevada con el incremento de precios, lo que refleja una comprensión del principio básico de oferta y demanda dentro del mercado, similar a lo observado en estudios aplicados en países como Estados Unidos, Reino Unido y Chile, donde este mecanismo se ha documentado como uno de los más influyentes en la dinámica de precios residenciales (Case & Shiller, 1989; Debelle, 2004; Fuster & Zafar, 2021). Asimismo, los participantes mostraron una noción coherente del concepto de valor de mercado, identificándolo mayoritariamente como el precio promedio de propiedades similares o como aquel que el comprador está dispuesto a pagar, dejando de lado criterios obsoletos como el precio original de compra o el valor oficial de la tasación, lo cual sugiere un grado significativo de alfabetización inmobiliaria. De hecho, más del 70 % manifestó que utiliza el método comparativo como base para determinar precios, lo que evidencia una alineación con las mejores prácticas del sector [16].

Además, los encuestados demostraron una preferencia por enfoques multifactoriales para la fijación de precios, combinando elementos como oferta y demanda, valor de mercado y condición física del inmueble, lo cual es congruente con modelos econométricos que integran variables económicas, urbanas y estructurales en el análisis de precios (Malpezzi, 2003; Brasington & Hite, 2005). Esta tendencia hacia una visión holística se refuerza con la actitud del 94.4 % de los encuestados que considera todos estos factores al negociar, reflejando una comprensión estratégica de las dinámicas del mercado. Incluso ante discrepancias entre el valor de mercado y el precio ofertado, la mayoría opta por negociar o esperar un ajuste, evidenciando una conducta racional orientada a proteger el poder adquisitivo, lo cual coincide con los principios de racionalidad económica en entornos de libre mercado [17]. Finalmente, se destaca una fuerte orientación hacia la toma de decisiones basada en múltiples fuentes de información —historial de ventas, tiempo de permanencia del inmueble en el mercado, y valoración personal— lo cual denota un perfil profesional con capacidad analítica, informado por criterios técnicos y sensibilidad económica.

Este tipo de hallazgos no solo resulta útil para caracterizar las prácticas locales en países como México, donde se llevó a cabo la encuesta, sino que también permite establecer paralelismos y contrastes con mercados internacionales. Por ejemplo, en mercados más maduros como el canadiense o el australiano, los modelos de fijación de precios también privilegian un enfoque multidimensional, aunque con una mayor integración de variables macroeconómicas y normativas fiscales (Yates, 2008; Bourassa, Hoesli & Sun, 2006). En este sentido, el

perfil de los encuestados —profesionales del sector inmobiliario— representa una muestra clave para entender no solo las prácticas de fijación de precios, sino también la evolución de las percepciones en función de la experiencia técnica y del contexto económico. Esto contribuye a un mayor entendimiento del comportamiento del mercado y puede servir como insumo para la formulación de políticas públicas, estrategias de comercialización y desarrollo de sistemas de valuación automatizada.

5. Conclusión

Los hallazgos de este estudio aportan conclusiones relevantes para la teoría y práctica de la valuación inmobiliaria en contextos urbanos latinoamericanos, con énfasis en mercados dinámicos como el de Querétaro. En primer lugar, se confirma que la fijación de precios en la compraventa de inmuebles es un proceso complejo y multifactorial. Los agentes inmobiliarios muestran una comprensión avanzada del valor de mercado, entendido como una construcción social y económica basada en datos comparativos y percepción de la demanda, superando enfoques unidimensionales centrados únicamente en el costo de edificación o la tasación oficial. La ubicación del inmueble se identifica como el factor más determinante, al influir tanto en el acceso a infraestructura y servicios como en la percepción de calidad de vida y disposición a pagar de los compradores.

En segundo término, los resultados evidencian que las prácticas locales se alinean con estándares

internacionales como RICS, IVSC y TEGoVA, al considerar múltiples variables en el análisis del valor. La valoración integral, reflejada en la consideración simultánea de estado del inmueble, valor de mercado y dinámica de oferta y demanda, fortalece la profesionalización del sector y promueve negociaciones equitativas y eficientes, reduciendo riesgos de sobrevaloración o subvaluación.

En tercer lugar, se observan patrones de percepción coherentes con mercados maduros, donde la interacción entre expectativas, comportamiento del consumidor y condiciones macroeconómicas determina la evolución de los precios. La divergencia ante situaciones de debilidad económica resalta la necesidad de reforzar la formación en análisis económico y financiero aplicado al sector inmobiliario.

Finalmente, este estudio subraya la importancia de integrar análisis cuantitativo y cualitativo para ofrecer una visión holística de la valoración inmobiliaria. Los resultados pueden guiar políticas públicas, estrategias de desarrollo urbano y prácticas profesionales, y su replicación en otras regiones permitirá consolidar un conocimiento más amplio sobre los determinantes del precio inmobiliario en México y América Latina, fomentando transparencia, equidad y acceso a vivienda digna.

6. Agradecimientos

Se agradece a los participantes del sector inmobiliario que colaboraron en las encuestas, así como a las instituciones que proporcionaron acceso a datos de mercado.

Conflictos de interés

Los autores declaran que no existen conflictos de interés.

Abreviaturas

INEGI: Instituto Nacional de Estadística y Geografía

INDAABIN: Instituto de Administración y Avalúos de Bienes Nacionales

AMPI: Asociación Mexicana de Profesionales Inmobiliarios

IVSC: International Valuation Standards Council

RICS: Royal Institution of Chartered Surveyors

7. Referencias bibliográficas

[1] L. Gómez-Palacio and A. Torres, "Valuación de inmuebles urbanos: fundamentos y aplicación práctica," Editorial Trillas, 2019.

[2] INEGI, "Estadísticas a propósito de la industria de bienes raíces en México," 2022. [Online]. Available: <https://www.inegi.org.mx>

[3] INDAABIN, "Manual de valuación inmobiliaria," Instituto de Administración y Avalúos de Bienes Nacionales, 2020. [Online]. Available: <https://www.gob.mx/indaabin>

[4] R. Muñoz and J. Hernández, "Negociación en el mercado inmobiliario: teoría y práctica," UNAM, 2018.

[5] ONU-Hábitat, "Ciudades y desarrollo sostenible en América Latina," Programa de las Naciones Unidas para los Asentamientos Humanos, 2021. [Online]. Available: <https://unhabitat.org>

[6] V. Serrano and E. Martínez, "Asimetrías de información y fijación de precios en el sector inmobiliario," *Revista de Estudios Urbanos*, vol. 34, no. 2, pp. 45–60, 2021.

[7] S. Rosen, "Hedonic prices and implicit markets: Product differentiation in pure competition," *Journal of Political Economy*, vol. 82, no. 1, pp. 34–55, 1974.

[8] E. Glaeser, J. Gyourko, and R. Saks, "Why is Manhattan so expensive? Regulation and the rise in housing prices," *Journal of Law and Economics*, vol. 48, no. 2, pp. 331–369, 2005.

[9] A. Goodman and T. Thibodeau, "Housing market segmentation and hedonic prediction accuracy," *Journal of Housing Economics*, vol. 12, no. 3, pp. 181–201, 2003.

[10] K. Case and R. Shiller, "The efficiency of the market for single-family homes," *The American Economic Review*, vol. 79, no. 1, pp. 125–137, 1989.

[11] G. Debelle, "Macroeconomic implications of rising household debt," *BIS Working Paper No. 153*, 2004.

[12] A. Diaz, M. Moreno, and C. Ramírez, "Comparación de métodos de valuación inmobiliaria," *Revista de Economía Aplicada*, vol. 29, no. 3, pp. 45–63, 2021.

[13] A. Fuster and B. Zafar, "The sensitivity of housing demand to financing conditions: Evidence from a survey," *Review of Financial Studies*, vol. 34, no. 2, pp. 592–634, 2021.

[14] S. Malpezzi, "Hedonic pricing models: A selective and applied review," in *Housing Economics and Public Policy*, Oxford: Blackwell, 2003, pp. 67–89.

[15] D. Brasington and D. Hite, "Demand for environmental quality: A spatial hedonic analysis," *Regional Science and Urban Economics*, vol. 35, no. 1, pp. 57–82, 2005.

[16] RICS, "Valuation – Global Standards 2020," Royal Institution of Chartered Surveyors, 2020.

[17] H. Simon, "A behavioral model of rational choice," *Quarterly Journal of Economics*, vol. 69, no. 1, pp. 99–118, 1955.

[18] S. Bourassa, M. Hoesli, and J. Sun, "A simple alternative house price index method," *Journal of Housing Economics*, vol. 15, no. 1, pp. 80–97, 2006.

[19] J. Yates, "Australia's housing affordability crisis," *The Australian Economic Review*, vol. 41, no. 2, pp. 200–214, 2008.

Conceptualización arquitectónica de vivienda urbana con criterios acústicos: modelo aplicado y mapa de decisiones

Architectural Conceptualization of Urban Housing with Acoustic Criteria: Applied Model and Decision Map

Moreno Almaraz Rogelio, Nivón Pellón Alejandra y Gómez Guzmán Marco Antonio

Maestría en Arquitectura, Facultad de Ingeniería

Universidad Autónoma de Querétaro

Querétaro, México

rogelio.moreno@uaq.edu.mx, alejandra.nivon@uaq.mx, marco.guzman60@uabc.edu.mx

<https://orcid.org/0009-0000-4345-8829>

Resumen: En este artículo se presenta un modelo acústico para la fase conceptual de diseño de vivienda urbana que integra criterios de confort desde sus etapas tempranas, mediante un Mapa de Decisiones Acústicas (MDA). El objetivo es vincular la exposición sonora exterior con metas interiores cuantificables y con el desempeño de la envolvente y las particiones, de modo que las decisiones proyectuales se sustenten en evidencia verificable y trazable por banda de frecuencia. La metodología, de alcance conceptual y sin mediciones in situ, emplea documentales verificables como normativas ISO/NMX/NOM, formaliza reglas entre geometría, materiales y respuesta acústica y contrasta resultados con referencias clásicas (ley de masa en transmisión; Sabine y Eyring en reverberación). Se adopta una jerarquía de referencia para fachada: diferencia de nivel estandarizada de sistema equivalente cuando existe; en su defecto, combinación de componentes con relación ventana-muro; y, como respaldo, ley de masa. A modo ilustrativo se trabajó con perfiles representativos de Santiago de Querétaro. El resultado es un sistema de apoyo a decisiones que genera rutas de diseño justificadas con el índice de reducción sonora ponderado (R_w), la diferencia de nivel estandarizada ponderada entre recintos ($D_{nT,w}$) y el tiempo de reverberación (T_{60}) como metas. Se concluye que el modelo constituye una base reproducible y transparente para la toma de decisiones en anteproyecto, fortaleciendo la coherencia entre el entorno sonoro urbano, los objetivos de calidad interior y la selección de estrategias de diseño que orientan la concepción arquitectónica de la vivienda urbana.

Palabras clave: Acústica arquitectónica; Confort acústico; Vivienda urbana; Mapa de decisiones acústicas; Aislamiento acústico

Abstract: In this article presents an acoustic model for the conceptual design phase of urban housing that integrates comfort criteria from the early stages through an Acoustic Decision Map (MDA). The aim is to link exterior sound exposure with quantifiable indoor targets and with the performance of the envelope and partitions, so that design decisions are supported by verifiable evidence that is traceable at the frequency-band level. The methodology conceptual in scope and without in-situ measurements uses verifiable documentary sources such as ISO/NMX/NOM standards, formalizes rules linking geometry, materials, and acoustic response, and contrasts results against classical references (mass law for transmission; Sabine and Eyring for reverberation). A reference hierarchy is adopted for façades: the standardized level difference of an equivalent system when available; otherwise, a component-to-façade combination using the window-to-wall ratio; and, as a fallback, the mass law. For illustration, representative profiles from Santiago de Querétaro were used. The outcome is a decision-support system that generates justified design routes using the weighted sound reduction index (R_w), the weighted standardized level difference between rooms ($D_{nT,w}$), and the reverberation time (T_{60}) as project targets. It is concluded that the model provides a reproducible and transparent basis for decision-making in the preliminary design stage, strengthening coherence among the urban sound environment, indoor quality objectives, and the selection of design strategies that guide the architectural conception of urban housing.

keywords: Architectural acoustics; Acoustic comfort; Urban housing; Acoustic decision map; Sound insulation

1. Introducción

En la última década, el diseño de vivienda urbana en México ha mostrado avances en desempeño ambiental; sin embargo, la dimensión acústica —esto es, la integración de la exposición sonora exterior del emplazamiento, la intrusión acústica interior por transmisión a través de la envolvente y particiones, y la respuesta del espacio (reverberación por bandas)— continúa incorporándose de forma tardía y, con frecuencia, mediante prescripciones puntuales que no orientan la concepción formal y material desde la fase conceptual. En el marco regulatorio nacional, la Norma Oficial Mexicana NOM-081-SEMARNAT-1994 establece límites máximos permisibles de emisión de ruido de fuentes fijas y su método de medición [1]. Cuando la exposición sonora residencial es comparable a niveles ocupacionales, la NOM-011-STPS-2001 ofrece parámetros útiles para contextualizar la severidad del entorno (si bien su aplicación directa corresponde al ámbito laboral) [2].

Para la calidad interior, se emplean indicadores por bandas de frecuencia (Hz) que traducen metas de proyecto en requisitos verificables. El índice de reducción sonora ponderado (R_w) es una propiedad de elementos medida en laboratorio y se obtiene conforme a ISO 10140 [5]. La ponderación a índice único de ese desempeño se realiza según ISO 717 [6]. La diferencia de nivel estandarizada ponderada ($D_{nT,w}$) representa el aislamiento *in situ* entre espacios y se determina con ISO 16283-1 [4]. En fachadas, la diferencia de nivel estandarizada a 2 m de fachada, ponderada ($D_{2m,nT,w}$) se mide según ISO 16283-3 [3]. En México existen Normas Mexicanas (NMX) armonizadas con ISO para la medición en laboratorio de aislamiento acústico de elementos, en particular NMX-C-10140-1-ONNCCE-2020 para aspectos generales [10]. También se considera el PROY-NMX-C-10140-2-ONNCCE-2021 para la medición del aislamiento al ruido aéreo [11]. Cuando las fichas técnicas del sector remiten a lineamientos locales, puede emplearse como apoyo NMX-R-060-SCFI-2013 [12].

Con base en lo anterior, el presente artículo define un modelo acústico para la fase conceptual de vivienda urbana, organizado en tres bloques: (1) metas interiores (R_w , $D_{2m,nT,w}/D_{nT,w}$, T_{60}) coherentes con la exposición exterior del sonido y caracterizada por períodos de día y noche [1] (2) modelo operativo de la solución arquitectónica mediante variables geométricas y materiales con significado físico (proporciones de

espacio, porcentaje de acristalamiento (WWR), Window-to-Wall Ratio, capas de cerramiento y detalles de unión [6] y (3) relaciones por banda que vinculan dicha representación con indicadores de intrusión y reverberación bajo elementos verificables definidos por normas de campo y laboratorio [3]. “La verificación es congruente con el alcance conceptual del trabajo. Se apoya, primero, en la consistencia interna o la monotonía física: a mayor aislamiento de muros, ventanas y juntas, menor es el ruido que ingresa al interior; y, al incorporar materiales absorbentes, como cortinas pesadas, tapetes o paneles porosos, el sonido se extingue con mayor rapidez y el eco disminuye. En segundo lugar, se contrasta el comportamiento por bandas con referencias clásicas, utilizando la ley de masa para la transmisión a través de elementos y las expresiones de Sabine y de Eyring para la reverberación.

La contribución se concreta en un Mapa de Decisiones Acústicas (MDA) que traduce la exposición sonora exterior y las metas interiores en requisitos de atenuación acústica por distintos componentes como los paños opacos el acristalamiento y las juntas, y en opciones de diseño ordenadas por prioridad, con base normativa y registro verificable, para orientar decisiones informadas desde etapas tempranas de la concepción arquitectónica [3]. “Se eligió la ciudad de Querétaro como ámbito de aplicación por su densidad urbana intermedia-alta, con avenidas principales muy transitadas y zonas donde conviven viviendas, comercios y servicios, lo que genera un ambiente sonoro urbano típico; además, la ciudad dispone de insumos secundarios, como cartografías oficiales, delimitaciones de uso de suelo, ortoimágenes y tipologías de vivienda, que permiten parametrizar escenarios y explorar las variaciones de las salidas del modelo ante cambios controlados de una sola entrada sin campañas de campo, garantizando trazabilidad y transferibilidad de resultados.”

A efectos de ilustración, el modelo se aplica con un perfil representativo de Santiago de Querétaro, donde campañas y reportes locales documentan corredores viales con niveles sonoros elevados útiles como referencia de perfil de ruido exterior urbano [7]. El diseño metodológico de dichas campañas se describe en un protocolo específico de medición urbana [8], y el contexto vial regional se ha caracterizado en informes técnicos del Instituto Mexicano del Transporte [9].

Este trabajo se circunscribe a la etapa conceptual y no incorpora mediciones *in situ*. La verificación se limita a: (i) consistencia interna —cuando mejora el

aislamiento de muros, ventanas y juntas, disminuye el ruido interior; cuando aumenta la absorción de los materiales, el sonido se desvanece más rápido y (ii) contraste por bandas con referencias clásicas (ley de masa para transmisión; Sabine y Eyring para la reverberación). La validación empírica en campo se reserva para una fase posterior.

En síntesis, se presenta un modelo operativo para las etapas tempranas de conceptualización donde se describen sus características y posibles aplicaciones en vivienda urbana, y se ofrecen rutas de decisión fundamentadas con base en la normativa acústica mexicana.

2. Materiales y métodos

2.1 Alcance y materiales documentales con registro verificable

Este trabajo se centra en la etapa conceptual y emplea exclusivamente materiales documentales trazables. Todos los datos por banda de frecuencia se registran en la tabla 1 con fuente/organismo o fabricante, identificador y versión, método de obtención/ensayo, condiciones o montaje y uso en el modelo. A cada insumo se le asigna un ID que aparece junto al número en las tablas de resultados para garantizar reproducibilidad y permitir la réplica independiente sin comprometer la protección de derechos ante INDAUTOR.

2.2 Normativa aplicable

(a) Normativa mexicana e internacional. La NOM-081-SEMARNAT-1994 se usó para la estructura de franjas día/noche y el método de medición de fuentes fijas. [1]

Para la medición en laboratorio del aislamiento acústico de elementos de construcción se consideró la NMX-C-10140-1-ONNCCE-2020 como parte general. [10]

Se empleó además el PROY-NMX-C-10140-2-ONNCCE-2021 para la medición del aislamiento al ruido aéreo (Parte 2). [11]

Cuando las fichas del sector remiten a lineamientos locales, se tomó como documento de apoyo la NMX-R-060-SCFI-2013. [12]

En paralelo, la ISO 10140 respalda la medición en laboratorio del aislamiento acústico de elementos. [5]

La ISO 717 establece índices únicos como el índice de reducción sonora ponderado R_w . [6]

La ISO 16283-1 define mediciones *in situ* de aislamiento al ruido aéreo entre espacios. [4]

La ISO 16283-3 especifica la medición de aislamiento acústico de fachadas, incluyendo la diferencia de nivel estandarizada a 2 m de fachada, ponderada $D_{2m,nT,w}$. [3]

(b) Fichas técnicas de materiales y elementos de uso residencial con coeficiente de absorción por banda $\alpha(f)$ y curvas de pérdida por transmisión $R(f)$ (*Transmission Loss*, TL).

(c) Catálogos geométricos de espacios residenciales con rangos comprobados de largo (L), ancho (W), alto (H) y relación ventana–muro (WWR, Window-to-Wall Ratio).

2.3 Trazabilidad de datos

Se adopta la regla de trazabilidad: ningún valor se usa sin ID y sin su registro en la Tabla 7 con su fuente, la versión, el método y su montaje. La tabla 7 incluye espectros exteriores por banda (día/noche), coeficientes de absorción $\alpha(f)$, curvas de aislamiento/pérdida por transmisión $R(f)/TL(f)$, diferencia de nivel normalizada a 2 m $D_{2m,nT}(f)$ cuando exista, y la geometría/WWR del recinto.

Tabla 1. Bitácora de trazabilidad

ID	Insumo (tipo / modelo)	Fuente	Método	Bandas (Hz)	Parámetros clave	Uso en el modelo	Calidad
EX-01	Perfil exterior — Día	DEF-MA	EXT-2m-Z	125-4000	$L_{p,2m,ext}(f)$	Exterior	A
EX-02	Perfil exterior/Noche	DEF-MA	EXT-2m-Z	125-4000	$L_{p,2m,ext}(f)$	Exterior	A
EX-03	Perfil exterior /Alterno	DEF-MA	(XT-2m-Z	125-4000	$L_{p,2m,ext}(f)$	Exterior (semi.)	A
MAT-01	Panel poroso A-50	FAB-A/LAB	ISO/NMX-154	125-4000	$\alpha(f)$	Reverberación	A
MAT-02	Cortina pesada B-OC	FAB-B	ISO/NMX-154	125-4000	$\alpha(f)$	Reverberación	B
MAT-03	Tapeta C-12	FAB-C	ISO/NMX-154	125-4000	$\alpha(f)$	Reverberación	B
FCH-01	Ventana DV-6-16-6	LAB-ACR	ISO-18140/717	125-4000	$R(f)/TL(f), R_{w,v}$	Transmisión	A
FCH-02	Muro block 12 + aplomado	LAB-ACR	ISO/NMX-10140	125-4000	$R(f)$	Transmisión	A
SYS-01	Fachada mixta muro+ventana	LAB/PROV	ISO-16283-3	125-4000	$D_{2m,nT}(f)$	Transmisión (preferencia)	A
GEO-01	(L-W-H-V-WWR)	CAT-MUN	—	—	Geometría/WWR	Entrada	B

Este estudio no realizó mediciones *in situ*; los ítems EX-0X provienen de fuentes secundarias como informes institucionales y los ensayos de materiales/elementos son de laboratorio (NMX/ISO).

2.4 Metas de desempeño interior por uso y franja

El propósito en este apartado es establecer, desde la fase de concepción, metas cuantificables y trazables

para cada espacio de la vivienda, diferenciando por uso y por franja horaria (día/noche), a fin de guiar el diseño hacia niveles interiores compatibles con el confort acústico.

2.4.1 Variables acústicas meta y definiciones acústicas

1. Nivel interior objetivo por franja $L_{Aeq,day} / L_{Aeq,night}(dB(A))$. Es el nivel continuo equivalente ponderado A, que se comunica como síntesis del desempeño acústico interior por día y por noche, siguiendo la estructura de franjas establecida en la NOM-081-SEMARNAT-1994. [1]

Este agregado se usa para el cálculo acústico, se trabaja por bandas y luego se sintetiza.

2. Nivel interior objetivo por banda $L_{p,int,obj}(f)(dB)$. Esta variable nos especifica el objetivo espectral por banda de 1/1 de octava (125–4000 Hz) que guía el diseño frente a la intrusión acústica interior.
3. Tiempo de reverberación objetivo por banda $T_{60,obj}(f)$ (s), esta variable define la calidad acústica del espacio (claridad del habla, confort, privacidad) por banda de 1/1 de octava en 125–4000 Hz.

2.4.2 Criterios por uso del espacio

Para el presente artículo se tomaron como caso de estudio dos espacios representativos en el diseño de vivienda urbana.

1. El dormitorio el cual tiene como objetivo priorizar el descanso nocturno, donde se establecen metas más estrictas en la franja nocturna que limitan la intrusión acústica interior; $T_{60,obj}(f)$ y genera una mejor estabilidad acústica.
2. La estancia la cual tiene como objetivo priorizar la conversación diurna, donde se establecen metas más moderadas en la franja diurna, esto permite conversaciones confortables $T_{60,obj}(f)$ y favorecen la claridad del habla.

2.4.3 Procedimiento para fijar metas

1. Caracterizar la exposición acústica exterior del sitio por banda: definir el perfil de ruido acústico exterior $L_{p,2m,ext}(f)$ a 2 m de fachada para diurno y nocturno, según el esquema de franjas de la NOM-081-SEMARNAT-1994. [1]

2. Traducir exposición a requisito de atenuación: fijar la diana espectral $L_{p,int,obj}(f)$, según el uso del espacio, deducir la atenuación exigible de fachada con $D_{2m,nT}(f)$ cuando exista una medición de fachada conforme a la ISO 16283-3. [3]

En ausencia de $D_{2m,nT}$, se debe de emplear la fórmula DnT,w , como aproximación conforme a la ISO 16283-1. [4]

3. Definir $T_{60,obj}(f)$ por uso y volumen del espacio, seleccionando los valores objetivo por banda acordes con el tamaño y el uso del espacio.
4. Establecer márgenes de decisión: con holgura de 2 a 5 dB con respecto a la meta en horario nocturno para dormitorios y de 1 a 3 dB en horario diurno para estancias.
5. Consolidar en una tabla con registro verificable las metas con fecha, fuente y versión para su uso en el Mapa de Decisiones Acústicas (MDA).

2.4.4 Rangos orientativos de las metas con la nomenclatura establecida, como punto de partida.

Estos rangos se usan como punto de partida y se ajustan según contexto urbano y objetivos del proyecto.

- Dormitorio
 $L_{Aeq,nightL}$: 25–30 dB(A)
 $L_{Aeq,dayL}$: 30–35 dB(A)
 $T_{60,obj}(f)$: 0.30 a 0.50 s (125 a 4000 Hz), con especial atención a el rango de 250 a 1000 Hz.
- Estancia
 $L_{Aeq,day}$: 35–40 dB(A)
 $L_{Aeq,night}$: 30–35 dB(A)
 $T_{60,obj}(f)$: 0.40 a 0.70 s (125 a 4000 Hz), evitando excesos >0.80 s en el rango de 500 a 1000 Hz.

2.5 Resolución espectral y magnitudes

Se trabajó con bandas de 1/1 de octava en 125, 250, 500, 1000, 2000 y 4000 Hz para todos los cálculos de diseño.

Cuando existieron datos en 1/3 de octava, se conservaron para análisis interno y se integraron a 1/1 de octava para la toma de decisiones.

Los agregados A-ponderados se usaron únicamente para comparaciones globales y reporte ejecutivo.

2.6 Perfil de ruido acústico exterior (escenarios en franjas diurnas y franjas nocturnas)

La exposición acústica exterior del sitio se representó mediante un perfil de ruido acústico exterior a 2 m de fachada por bandas de 1/1 de octava para día y noche.

La referencia metodológica para fachada es ISO 16283-3, que establece mediciones y cálculo de $D_{2m,nT,w}$, en campo. [3]

2.7 Respuesta del espacio (tiempo de reverberación T_{60})

El tiempo de reverberación T_{60} es el tiempo que tarda el nivel sonoro en decrecer 60 dB tras cesar la fuente, definido y medido por bandas conforme a ISO 3382-1 (salas ordinarias, parámetros de acústica de salas). [13]

Las propiedades de absorción por banda $\alpha_i(f)$ de materiales y sistemas provienen de fichas basadas en ensayos en cámara reverberante según ISO 354 (cálculo del área de absorción equivalente). [14]

2.7.1 Modelos cerrados utilizados.

En el presente artículo se aplicaron los modelos clásicos de Sabine y Eyring, desarrollados para recintos difusos y ampliamente adoptados en la literatura de la acústica arquitectónica; ambos se emplean por bandas de 1/1 de octava (125–4000 Hz), con geometría y con la absorción de materiales ya establecidos.

Sabine utiliza un modelo para la absorción moderada de los materiales:

$$T_{60}(f) = 0.161V/A(f) \quad (2)$$

donde (V) es el volumen del espacio en m^3 y $A(f)$ es igual a $\sum \alpha_i(f)S_i$, donde $\alpha_i(f)$ es el coeficiente de absorción de los materiales por banda y S_i el área de las superficies en m^2

Este modelo tiende a sobreestimar T_{60} cuando la absorción es baja a moderada por ejemplo α^- que es la absorción promedio del espacio es menor o igual que 0.20 y significa que, en promedio, el espacio absorbe 20 % de la energía sonora incidente en cada reflexión y refleja 80 %. y el campo es suficientemente difuso.

Eyring utiliza un modelo para la absorción elevada de los materiales:

$$T_{60}(f) = 0.161V / -S \ln(1 - \alpha^-(f)) \quad (3)$$

donde S (el área total interior) = $\sum S_i$; donde $\alpha^-(f) =$

$A(f)/S$ que es la absorción promedio en la banda f , igual a la absorción equivalente $A(f)$ dividida entre el área total S .

Este modelo corrige el sesgo de Sabine cuando la absorción del material aumenta por ejemplo $\alpha^- \geq 0.20$ a 0.30, ya que incorpora la probabilidad de absorción en cada reflexión.

En este punto la selección por banda se basó en el promedio de absorción $\alpha^-(f)$ y se aplicó Sabine para absorciones moderadas y Eyring cuando el promedio de absorción fue elevado evitando usar un único modelo acústico.

- Si el espacio recibe poca absorción acústica a través de acabados rígidos o mobiliario escaso, Sabine suele dar valores de T_{60} mayores que Eyring.
- Si el espacio incorpora tratamientos absorbentes más estructurados como por ejemplo, techo acústico, paneles o textiles), Eyring produce T_{60} más cortos y físicamente más realistas que Sabine.

Para el apartado en la verificación de insumos.

Los $\alpha_i(f)$ provienen de fichas técnicas con referencia a las norma de ensayo (NMX/ISO 354). [14]

Las áreas S_i y el volumen V se obtuvieron de la geometría declarada del espacio. Cada elección de modelo por banda (Sabine/Eyring) quedó documentada en el registro verificable junto con $A(f)$, $\alpha^-(f)$, V y S .

2.8 Transmisión de elementos y sellos (fachada y particiones)

Para paños opacos se aplicó la ley de masa por banda cuando no hubo curva de $R(f)$ disponible en ficha.

Para ventanas se utilizaron parámetros de ficha conforme a ISO 10140 en laboratorio y su índice R_w conforme a ISO 717. [5]

En fachada, la medición de referencia para aislamiento en campo es $D_{2m,nT,w}$, según ISO 16283-3. [3]

Las juntas y sellos se trataron como elementos críticos cuando el déficit frente a la meta fue de 1 a 2 dB, priorizando continuidad y doble sello.

2.8.1 Jerarquía de referencia y cálculo de Δ (modelo–referencia)

Para calcular Δ (modelo–referencia) en transmisión se

adoptó la siguiente jerarquía: (i) $D_{2m,nT}(f)$ de sistema equivalente cuando existió (preferente); (ii) combinación componente-a-fachada con $R(f)/TL(f)$ de laboratorio y WWR; (iii) ley de masa como respaldo cuando no hubo curvas. Para reverberación, la referencia clásica fue Sabine/Eyring.

2.9 Variables de diseño y restricciones geométrico-materiales

La solución arquitectónica se representó mediante variables controlables: L, W, H, volumen V, áreas de superficie, WWR, número/longitud de juntas, y capas de cerramiento con sus $\alpha(f)$ y $R(f)$.

Se aplicaron restricciones de proporciones geométricas razonables y compatibilidad entre propiedades reportadas en ficha y composición de capas.

2.10 Construcción del Mapa de Decisiones Acústicas (MDA)

Para este ejercicio se construyó un mapa de decisiones que contempla variables de entrada y de salida que pasan por un proceso que se establece de la siguiente manera:

Las entradas se establecen de la siguiente manera:

1. Perfil de ruido acústico exterior por bandas de 1/1 de octava para un horario diurno y un horario nocturno a 2 m de la fachada, conforme a la estructura de franjas de la NOM-081-SEMARNAT-1994. [1]
2. Metas interiores por uso/franja $\{L_{p,int,obj}(f), T_{60,obj}(f)\}$ y agregados $\{LA_{eq,day}, LA_{eq,night}\}$
3. Parámetros de componentes con registro verificable: curvas de pérdida por transmisión $R(f)/TL$ y R_w obtenibles en laboratorio conforme a ISO 10140 y ponderación por ISO 717) [5][6]; coeficientes de absorción $\alpha(f)$, ISO 354) [14].
4. Geometría del recinto (L, W, H, V, Si, WWR) y detalles de huecos y juntas.

Para el proceso se establecieron los siguientes pasos:

Paso 1 — Normalización del escenario exterior.

Se fija el perfil de ruido acústico exterior de referencia $L_{p,2m,ext}(f)$ para horario diurno y para horario nocturno a 2 m de fachada (esquema de franjas de la NOM-081). [1]

Paso 2 — Requisito de atenuación por componente. A partir de $L_{p,2m,ext}(f)$ y de la diana $L_{p,int,obj}(f)$, se calcula la atenuación exigible por banda.

- Si existe medición de fachada en campo, se usa $D_{2m,nT}(f) / D_{2m,nT,w}$ según ISO 16283-3. [3]
- Si no, se aproxima con DnT,w e hipótesis explícitas de fachada, conforme a ISO 16283-1 (entre espacios). [4]

Paso 3 — Generación de combinaciones factibles.

Se construye un conjunto de alternativas variando clase de acristalamiento, WWR, sellos/juntas y (en menor medida) capas de paño opaco, sujeto a la geometría del espacio y a los datos de ficha (ISO/NMX). El MDA no “usa” Sabine/Eyring para combinaciones: los modelos de sala se usan para verificar el tiempo objetivo (ver paso 4).

Paso 4 — Verificación de coherencia (intrusión y T_{60})

- Intrusión acústica interior por banda:

$$L_{p,int}(f) = L_{p,2m,ext}(f) - D_{2m,nT}(f) + 10 \log_{10}(T(f)/T_0), \quad T_0 = 0.5s. \quad (4)$$

El tiempo de reverberación T_{60} se estima con el modelo de Sabine (absorción moderada) o con el modelo de Eyring (absorción elevada), con datos $\alpha(f)$ de la ficha (ISO 354). [14] teniendo como criterio que si se aumenta la absorción dentro del espacio, el sonido decae más rápido en cada reflexión. Eso hace que el tiempo de reverberación T_{60} disminuya y, además, que el nivel interior debido a ruido exterior también sea menor, porque la energía que logra entrar no “se queda rebotando” tanto tiempo.

Si se reduce el porcentaje de ventana respecto al muro (WWR, Window-to-Wall Ratio), disminuye el área del elemento más débil de la fachada. Al tener menos área de hueco, la transmisión de ruido hacia el interior baja y, en consecuencia, el nivel interior disminuye.

Si se mejora la ventana con un mayor R_w , esta deja pasar menos sonido en las bandas críticas de tráfico. Al entrar menos energía sonora, el nivel interior baja. Y si además hay algo de absorción en el espacio, el T_{60} puede mantenerse en el rango objetivo sin necesidad de tratamientos extremos.

Paso 5 — Evaluación frente a metas y priorización. Cada alternativa se contrasta con $\{Lp, int, obj(f), T_{60}, obj(f)\}$ y con los agregados $\{LAeq, day, LAeq, night\}$.

Por último se produce una salida ordenada como opciones de diseño ordenadas por prioridad, indicando cumple/no cumple por escenario y registro verificable de supuestos y parámetros.

Paso 6 — Recomendaciones cuando no cumple. Si el desempeño es insuficiente, se recomiendan medidas en el orden de impacto:

1. Acristalamiento con mejor $Rw+Ctr$ (ruido de tráfico) según ISO 717. [6]
2. Reducción de WWR
3. Sellos/juntas (doble sello y continuidad) cuando el déficit ≤ 2 dB.
4. Ajustes discretos de absorción interior para afinar el T_{60} sin alterar la arquitectura.

Paso 7 — Corroboración *in situ* esto es opcional para su verificación y ajuste.

Cuando el proyecto lo permite, se corrobora el aislamiento con mediciones en campo: $D_{2m,nT,w}$, para fachada (ISO 16283-3) [3] o DnT,w entre espacios (ISO 16283-1) [4].

Si cumple, se documenta el desempeño verificado.

Si no cumple, los resultados retroalimentan el MDA para afinar la selección de vidrio/WWR/sellos o el ajuste de T_{60} como por ejemplo el Techo acústico, hasta lograr una alternativa que cumpla con las metas antes propuestas.

Para las variables de Salida, se establece una lista de opciones de diseño ordenadas por prioridad para los horarios diurno y nocturno, un estado de cumple o no cumple y los márgenes respecto a cada meta antes establecida y un registro verificable (fuente, norma, versión, parámetros por banda).

2.11 Flujo operativo del Mapa de Decisiones Acústicas

(MDA)

El Mapa de Decisiones Acústicas ópera en cuatro módulos encadenados: Entradas, Transmisión, Reverberación y Priorización. En Entradas se registran la geometría del recinto (largo, ancho, alto y volumen), la relación ventana–muro (WWR, Window-to-Wall Ratio), el uso del espacio, las bases de materiales con sus parámetros por banda y el perfil exterior por banda a 2 m de fachada para periodos diurno y nocturno. En Transmisión se estima el nivel interior por bandas a partir del perfil exterior y de la atenuación de la envolvente, privilegiando, cuando está disponible, la diferencia de nivel normalizada a 2 m por banda del sistema completo ($D_{2m,nT}$); en su ausencia se combinan las contribuciones de paños opacos y acristalamiento ponderando por área y verificando el estado de juntas y sellos. En Reverberación se calcula el tiempo de decaimiento por bandas y se comprueba la coherencia entre la absorción equivalente y las metas de calidad interior. En Priorización se ordenan las alternativas que cumplen simultáneamente las metas de nivel interior y de reverberación, considerando su viabilidad geométrica y sostenibilidad. Los cambios en WWR actualizan el área efectiva de huecos y la mezcla energética de la fachada, afectando el nivel interior estimado; los cambios en los acabados actualizan la absorción equivalente y, en consecuencia, el tiempo de reverberación.

2.12 Implementación y fórmulas

La implementación se estructuró en hojas temáticas vinculadas: Entradas (geometría, uso y WWR), Exterior (niveles por banda de 125–4000 Hz a 2 m de fachada), Materiales (coeficientes de absorción por banda $\alpha(f)$, curvas de aislamiento o pérdida por transmisión por banda $R(f)/TL(f)$ y, cuando exista, $D_{2m,nT}(f)$ de sistemas completos), Transmisión (estimación del nivel interior por bandas a partir del perfil exterior y de la atenuación de la envolvente, con los ajustes por condiciones del recinto), Reverberación (cálculo del tiempo de reverberación por bandas con expresiones cerradas de Sabine para la absorción moderada o de Eyring para la absorción elevada), MDA (reglas de coherencia y ordenamiento de alternativas) y Sensibilidad (variaciones controladas de parámetros y banda de incertidumbre operativa). Las celdas clave se documentaron con nombres de rango, versión y supuestos, de modo que la auditoría y la réplica se realicen leyendo los identificadores de la Tabla 7 y las referencias de cada hoja.

2.13 Geometrías y rangos de aplicación

El modelo se aplicó a recintos residenciales típicos con largo entre 3 y 6 m, ancho entre 2.5 y 5 m, alto entre 2.4 y 3.0 m y volumen entre 18 y 90 m³. La relación

ventana–muro (WWR) se acotó al intervalo 10–45 %. El caso base utilizado para ilustración corresponde a una estancia de $4.5 \times 3.6 \times 2.6$ m con WWR = 30 %. Escenarios fuera de estos rangos se emplearon únicamente para análisis de sensibilidad, manteniendo explícitos los supuestos y el registro en la tabla 1.

2.14 Herramienta de cálculo

Los cálculos por banda se realizaron en hojas de cálculo donde se registraron:

- Los espectros exteriores diurno, nocturno y procedencia.
- La geometría del espacio y WWR por fachada.
- Criterios de selección Sabine/Eyring y uso de $D_{2m,nT}(f)$ medido/estimado.

3. Resultados

3.1 Zona de estudio

Una vivienda urbana expuesta a una zona de alto tráfico vehicular en la ciudad de Santiago de Querétaro, se usó como un elemento representativo para los cálculos del modelo acústico.

3.2 Escenarios de exposición exterior

En las siguientes Fig 1 y Fig 2 se observan los espectros acústicos exteriores a 2 m de fachada por bandas 1/1 de octava.

La Fig 1 muestra el perfil de ruido acústico exterior por bandas de 1/1 de octava donde predominan los niveles en medias frecuencias (250–1000 Hz), típicos de tráfico, con caída progresiva hacia altas frecuencias, este conjunto refleja una exposición acústica exterior del sitio más elevada en día y fija el escenario base para calcular la atenuación exigible de la fachada.

En la Fig 2 se presenta el mismo perfil espectral por bandas, en franja nocturna, con niveles generales menores respecto al día y la misma elevación espectral en bandas medias (250–1000 Hz). Este escenario sirve para contrastar las metas interiores del dormitorio en noche y alimentar la comparación día/noche en el MDA.

Diurno $L_{p,2m,ext}(f)$ (dB):
125: 70 · 250: 74 · 500: 78 · 1000: 79 · 2000: 75 · 4000:69 representado en la fig. 1.

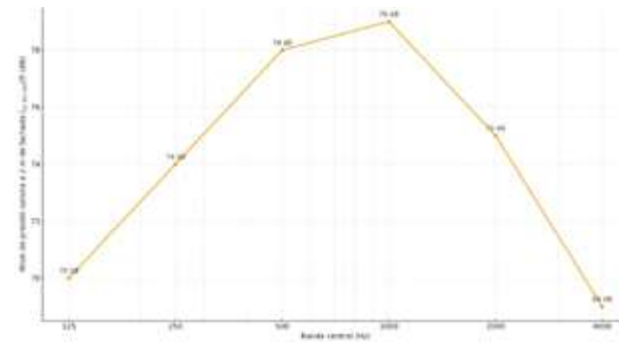


Figura 1. Espectro exterior acústico diurno $L_{p,2m,ext}(f)(dB)$.

Nocturno $L_{p,2m,ext}(f)$ (dB):
125: 66 · 250: 70 · 500: 74 · 1000: 75 · 2000: 71 · 4000: 65. Representado en la fig. 2.

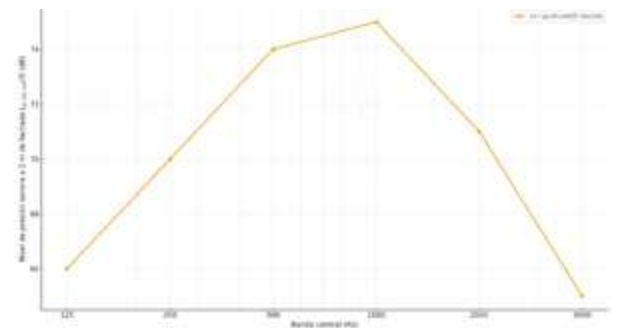


Figura 2. Espectro exterior acústico nocturno $L_{p,2m,ext}(f)(dB)$

3.3 Definición de las metas interiores en los espacios.

Se determinó que en los espacios interiores se deben establecer los rangos específicos para la T_{60obj} contenidos específicamente en la tabla 2.

Tabla 2. Metas por espacio y franja. $L_{Aeq,obj}$ en dB(A); $T_{60obj}(f)$ en (s).

Espacio	Periodo	$L_{Aeq,obj}$ [dB(A)]	$L_{p,int,obj}(f)$ [dB] (125–4000 Hz)	$T_{60,obj}(f)$ [s]	Fuente (ID Tabla 1)
Dormitorio	Noche	25-30	Definidos por banda según contexto del sitio y metas del proyecto.	0.30 - 0.50	EX-02 (estructura de franjas)
Dormitorio	Día	30-35	Definidos por banda	0.30 - 0.50	EX-01 (estructura de franjas)
Estancia	Día	35-40	Definidos por banda	0.40 - 0.70	EX-01 (estructura de franjas)
Estancia	Noche	30-35	Definidos por banda	0.40 - 0.70	EX-02 (estructura de franjas)

El diseño y la verificación se deciden por banda (125, 250, 500, 1000, 2000, 4000 Hz); LAeq se usa solo como síntesis por franja.

La estructura día/noche se toma de la NOM-081-SEMARNAT-1994; los valores $L_{p,int,obj}(f)$ se registran en la hoja de cálculo del estudio y quedan trazados contra la Tabla 1.

3.4 Atenuación exigible agregada en fachada

el nivel interior estimado se obtiene con

$$L_{p,int}(f) = L_{p,2m,ext}(f) - D_{2m,nT}(f) + 10 \log_{10}(T(f)/T_0), \quad T_0 = 0.5s.$$

Cálculo con $T_0 = 0.5s$

- Estancia (día): $D_{2m,nT,req,A} = 45.4 \text{ dB(A)}$.
- Dormitorio (noche): $D_{2m,nT,req,A} = 49.0 \text{ dB(A)}$.

3.5 Respuesta del espacio $T_{60}(f)$

Tabla 3. $T_{60}(f)$ por banda y espacio.

Espacio	Modelo	Banda [Hz]	T_{60} (s)	Sabine/Eyring (ref.) (s)	Δ (modelo-referencia) (s)	Fuente (ID Tabla 1)	Referencia clásica
Dormitorio	Eyring	125	0.4	0.4	0	MAT-01/MAT-02/MAT-03	Eyring
Dormitorio	Eyring	250	0.4	0.4	0	MAT-01/MAT-02/MAT-03	Eyring
Dormitorio	Eyring	500	0.4	0.4	0	MAT-01/MAT-02/MAT-03	Eyring
Dormitorio	Eyring	1000	0.4	0.4	0	MAT-01/MAT-02/MAT-03	Eyring
Dormitorio	Eyring	2000	0.4	0.4	0	MAT-01/MAT-02/MAT-03	Eyring
Dormitorio	Eyring	4000	0.4	0.4	0	MAT-01/MAT-02/MAT-03	Eyring
Estancia	Sabine	125	0.55	0.55	0	MAT-01/MAT-02/MAT-03	Sabine
Estancia	Sabine	250	0.55	0.55	0	MAT-01/MAT-02/MAT-03	Sabine
Estancia	Sabine	500	0.55	0.55	0	MAT-01/MAT-02/MAT-03	Sabine
Estancia	Sabine	1000	0.55	0.55	0	MAT-01/MAT-02/MAT-03	Sabine
Estancia	Sabine	2000	0.5	0.5	0	MAT-01/MAT-02/MAT-03	Sabine
Estancia	Sabine	4000	0.5	0.5	0	MAT-01/MAT-02/MAT-03	Sabine

3.6 Configuraciones de fachada evaluadas

3.6.1 Componentes de catálogo usados en el modelo

- Paño opaco¹ (muro de block o ladrillo de 12 cm de espesor con repellido).

Este se modeló como elemento masivo y se evaluó por banda con la ley de masa: el índice de reducción por frecuencia $R(f)$ se aproxima a $R(f) \approx 20 \log_{10}(mf) - 47$, donde m es la masa superficial (kg/m^2) y f la frecuencia (Hz). Esta aproximación es válida fuera de la zona de resonancia acústica y por debajo de la frecuencia crítica; se emplea cuando no hay curva $R(f)$ de ficha.

- Ventana (doble con laminado acústico 6/16/4+4).

Para su configuración en el vidrio exterior de 6 mm, la cámara acústica de 16 mm, y el vidrio interior laminado 4+4 mm, con un desempeño de referencia $R_w(C;Ctr) = 42(-2; -6) \text{ dB}$ donde:

- R_w es el índice de reducción sonora ponderado.
- C es la adaptación para banda ancha/habla en un punto efectivo de $\approx 40 \text{ dB}$ (42-2).
- Ctr es la adaptación para tráfico en un punto efectivo $\approx 36 \text{ dB}$ (42-6), relevante en 250-1000 Hz.

Este acristalamiento se usó como referencia para comparar alternativas y evaluar el cumplimiento frente al perfil de ruido acústico exterior.

- Juntas y sellos.

Se consideraron juntas selladas de forma continua (perímetro marco-muro y hoja-marco), con doble línea de sellado en elementos operables. Su efecto se integró al “huevo de fachada” (ventana + marco + sellos). La mejora de sellos es especialmente efectiva cuando el déficit frente a la meta acústica es $\leq 1-2 \text{ dB}$.

3.6.2 Ensamblajes reportados:

- Config. A: $WWR = 0.25$ (misma ventana).
- Config. B: $WWR = 0.35$ (misma ventana).

Tabla 4. Desempeño agregado estimado de fachada (dB(A)).

Alternativa	Escenario	$D_{2m,nT,req}$ (A) [dB]	Referencia clásica	Fuente (ID Tabla 1)
Config. A (WWR=0.25)	Día	45.4	Jerarquía: (1) $D_{2m,nT}(f)$ de sistema equivalente (SYS-01, preferente); (2) combinación $R(f)/TL(f)$ de laboratorio (FCH-01/FCH-02) + WWR; (3) ley de masa como respaldo.	FCH-02 (muro); FCH-01 (ventana); SYS-01 (si aplica)
Config. B (WWR=0.35)	Día	45.4	Jerarquía: (1) $D_{2m,nT}(f)$ de sistema equivalente (SYS-01, preferente); (2) combinación $R(f)/TL(f)$ de laboratorio (FCH-01/FCH-02) + WWR; (3) ley de masa como respaldo.	FCH-02 (muro); FCH-01 (ventana); SYS-01 (si aplica)
Config. A (WWR=0.25)	Noche	49	Jerarquía: (1) $D_{2m,nT}(f)$ de sistema equivalente (SYS-01, preferente); (2) combinación $R(f)/TL(f)$ de laboratorio (FCH-01/FCH-02) + WWR; (3) ley de masa como respaldo.	FCH-02 (muro); FCH-01 (ventana); SYS-01 (si aplica)
Config. B (WWR=0.35)	Noche	49	Jerarquía: (1) $D_{2m,nT}(f)$ de sistema equivalente (SYS-01, preferente); (2) combinación $R(f)/TL(f)$ de laboratorio (FCH-01/FCH-02) + WWR; (3) ley de masa como respaldo.	FCH-02 (muro); FCH-01 (ventana); SYS-01 (si aplica)

¹ Tramo de muro sólido de la fachada (la parte no acristalada)

3.7 Distribución prevista del sonido en el interior del espacio y LA_{eq}

Con los parámetros establecidos en los catálogos de los materiales y la configuración de ensamble definida como Configuración A, que sirve como referencia, se estimó la distribución espectral del nivel interior $L_{p,int}(f)$ por bandas de 1/1 de octava (125–4000 Hz) y los agregados $LA_{eq,day}$ y $LA_{eq,night}$ (nivel continuo equivalente ponderado A). La Configuración A corresponde a la relación ventana–muro (WWR, Window-to-Wall Ratio) adoptada en el caso base, al acristalamiento de referencia $R_w(C;Ctr)$ y a las juntas selladas, combinados con el paño opaco modelado por ley de masa.

El nivel interior por banda se obtuvo a partir del perfil de ruido acústico exterior $L_{p,2m,ext}(f)$ en horario diurno y nocturno 2 m de la fachada, de la atenuación de fachada por banda $D_{2m,nT}(f)$ o, cuando no se dispone de este indicador, de una estimación compatible con $R(f)/R_w(C;Ctr)$ y el WWR—, y del término de sala calculado mediante Sabine o Eyring, según el nivel de absorción del recinto. Los valores $LA_{eq,day}$ y $LA_{eq,night}$ se emplean aquí solo como síntesis para comparar contra las metas acústicas por franja; las decisiones se fundamentan en las bandas de 125–4000 Hz.

Tabla 5. $L_{p,int}(f)$ por banda (dB) y LA_{eq} (dB(A)).

Espacio	Periodo	Banda [Hz]	$L_{p,2m,ext}(f)$ [dB]	$T_{60}(f)$ [s]	T_0 [s]	Referencia clásica	Fuente [ID Tabla 13]
Estancia	Día	125	70	0.55	0.5	Jerarquía transmisión (SYS-01 > FCH-01/FCH-02+WWR > Ley de masa) + Sabine/Eyring en sala	EK-01; FCH-01/FCH-02 & SYS-01; MAT-01/02/03
		250	74	0.55	0.5	Jerarquía transmisión (SYS-01 > FCH-01/FCH-02+WWR > Ley de masa) + Sabine/Eyring en sala	EK-01; FCH-01/FCH-02 & SYS-01; MAT-01/02/03
		500	78	0.55	0.5	Jerarquía transmisión (SYS-01 > FCH-01/FCH-02+WWR > Ley de masa) + Sabine/Eyring en sala	EK-01; FCH-01/FCH-02 & SYS-01; MAT-01/02/03
		1000	79	0.55	0.5	Jerarquía transmisión (SYS-01 > FCH-01/FCH-02+WWR > Ley de masa) + Sabine/Eyring en sala	EK-01; FCH-01/FCH-02 & SYS-01; MAT-01/02/03
		2000	75	0.5	0.5	Jerarquía transmisión (SYS-01 > FCH-01/FCH-02+WWR > Ley de masa) + Sabine/Eyring en sala	EK-01; FCH-01/FCH-02 & SYS-01; MAT-01/02/03
Estancia	Día	4000	69	0.5	0.5	Jerarquía transmisión (SYS-01 > FCH-01/FCH-02+WWR > Ley de masa) + Sabine/Eyring en sala	EK-01; FCH-01/FCH-02 & SYS-01; MAT-01/02/03
		125	66	0.4	0.5	Jerarquía transmisión (SYS-01 > FCH-01/FCH-02+WWR > Ley de masa) + Sabine/Eyring en sala	EK-02; FCH-01/FCH-02 & SYS-01; MAT-01/02/03
		250	70	0.4	0.5	Jerarquía transmisión (SYS-01 > FCH-01/FCH-02+WWR > Ley de masa) + Sabine/Eyring en sala	EK-02; FCH-01/FCH-02 & SYS-01; MAT-01/02/03
		500	74	0.4	0.5	Jerarquía transmisión (SYS-01 > FCH-01/FCH-02+WWR > Ley de masa) + Sabine/Eyring en sala	EK-02; FCH-01/FCH-02 & SYS-01; MAT-01/02/03
		1000	75	0.4	0.5	Jerarquía transmisión (SYS-01 > FCH-01/FCH-02+WWR > Ley de masa) + Sabine/Eyring en sala	EK-02; FCH-01/FCH-02 & SYS-01; MAT-01/02/03
Dormitorio	Noche	2000	71	0.4	0.5	Jerarquía transmisión (SYS-01 > FCH-01/FCH-02+WWR > Ley de masa) + Sabine/Eyring en sala	EK-02; FCH-01/FCH-02 & SYS-01; MAT-01/02/03
		4000	65	0.4	0.5	Jerarquía transmisión (SYS-01 > FCH-01/FCH-02+WWR > Ley de masa) + Sabine/Eyring en sala	EK-02; FCH-01/FCH-02 & SYS-01; MAT-01/02/03

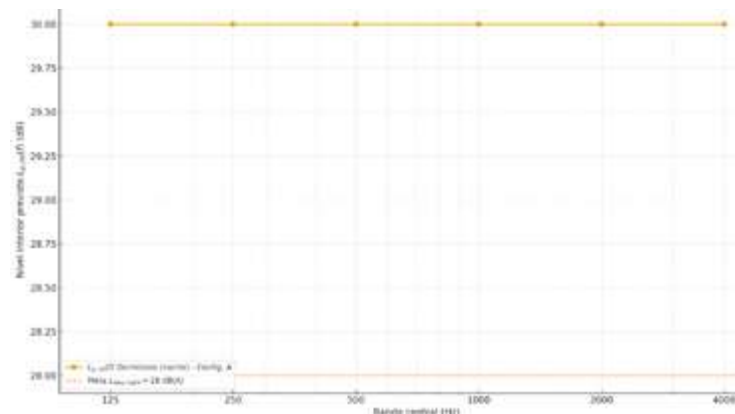


Figura 3. $L_{p,int}(f)$ vs. referencia de meta — Dormitorio (noche), Config. A.

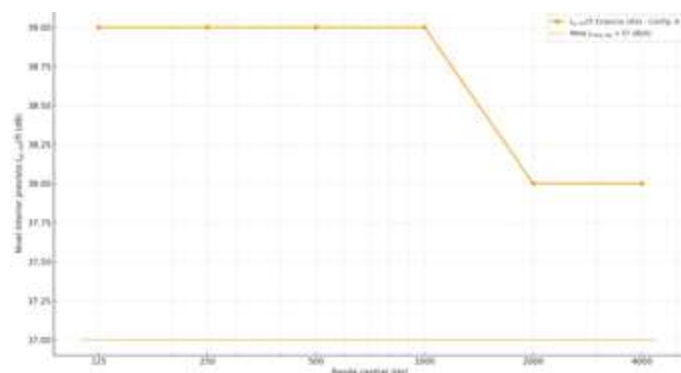


Figura 4. $L_{p,int}(f)$ vs. referencia de meta — Estancia (día), Config. A.

como se observa en la Fig 3 y la Fig 4 a través de las normas ya antes mencionadas.

3.8 Salida del Mapa de Decisiones Acústicas (MDA)

Se reporta la salida del MDA para las entradas de 3.2 y las metas de 3.3. Se presentan la comparación agregada y el estado de cumplimiento por alternativa.

Tabla 6. Cumplimiento agregado (dB(A)).

Configuración	Estancia (día): Exigido 45.4/Ofrecido	Cumple	Dormitorio (noche): Exigido 49.0/Ofrecido	Cumple
A(WWR 0.25)	44	NO	47	NO
B(WWR 0.35)	41	NO	44	NO

3.9 MDA “Alternativas adicionales”

En este estudio se consideraron las “reglas” como el conjunto de condiciones y transformaciones que el MDA aplica automáticamente para proponer opciones de diseño ordenadas por prioridad cuando la configuración base no

cumple.

3.9.1 Entradas

1. Perfil de ruido acústico exterior (día/noche) por bandas.
2. Metas interiores por banda y T_{60}
3. Componentes con datos de catálogo: vidrio (R_w , C_{tr}), WWR, juntas/sellos, paño opaco $R(f)$, absorción $\alpha(f)$
4. Todo con registro verificable.

3.9.2 ¿Qué hace el MDA?

1. Calcula la atenuación exigible de fachada por banda.
2. Genera combinaciones factibles (vidrio/WWR/sellos/absorción).
3. Verifica coherencia: más absorción, menor T_{60} ; mejor vidrio o menor WWR proporciona menor nivel interior acústico.
4. Marca cumple / no cumple por banda y por franja (día/noche).

3.9.3 Reglas prácticas para proponer cambios

1. Escalonamiento del acristalamiento:

Subir a la siguiente clase de vidrio buscando incrementos reales de R_w y de $R_w + C_{tr}$ (el término C_{tr} se determina por el tráfico).

2. Ajuste del WWR:

Reducir el WWR en escalones discretos por ejemplo –5 puntos porcentuales cuando el vidrio actual no cierra la brecha.

No proponer WWR fuera de los límites geométricos definidos para el proyecto.

3. Mejora de juntas o sellos:

Si el déficit residual acústico es ≤ 2 dB hay que priorizar los sellos continuos antes de cambiar el vidrio/WWR.

Si el déficit es > 2 dB, pasar a vidrio/WWR

4. Ajuste del T_{60} :

Si el aislamiento cumple pero el T_{60} queda alto hay que añadir una variable de absorción discreta como por ejemplo un techo acústico o algún textil hasta que el $T_{60}(f)$ llegue al objetivo.

5. Paño opaco:

Mantener si cumple o proponer un aumento de masa solo si persiste el déficit por bandas altas y el vidrio ya es de alta absorción.

3.9.4 ¿Qué entrega el MDA?

1. Opciones de diseño ordenadas por prioridad para día y noche.
2. Para cada una: cumple/no cumple

Tabla 7. Alternativas adicionales

Prioridad	Cambio propuesto	Impacto esperado	Cumple por banda (Si/No)	Notas	Referencia clásica	Fuente (ID Tabla 1)
1	Mejora de ventanas (subir clase $R_{w,v}$ y $R_{w,v} + C_{tr}$)	menor $L_p, \text{int}(f)$ en 250–1000 Hz	si	Verificar juntas perimetrales	SYS-01 (si disponible) > combinación $R(f)/TL(f)$ (FCH-01/FCH-02)+WWR > ley de masa; Sabine/Eyring para T_{60}	FCH-01; SYS-01 si aplica
2	Reducir WWR en 5 pp	menor contribución del hueco	si	Respetar límites geométricos	SYS-01 (si disponible) > combinación $R(f)/TL(f)$ (FCH-01/FCH-02)+WWR > ley de masa; Sabine/Eyring para T_{60}	GEO-01; FCH-01/02
3	Añadir absorción interior discreta	menor $T_{60}(f)$; estabiliza inteligibilidad	si	Techo acústico o textil	SYS-01 (si disponible) > combinación $R(f)/TL(f)$ (FCH-01/FCH-02)+WWR > ley de masa; Sabine/Eyring para T_{60}	MAT-01/02/03
4	Mejorar juntas/sellos (doble línea)	Gana 1–2 dB si el déficit es pequeño	si	Continuidad en marcos/hojas	SYS-01 (si disponible) > combinación $R(f)/TL(f)$ (FCH-01/FCH-02)+WWR > ley de masa; Sabine/Eyring para T_{60}	FCH-01/02; SYS-01

Los resultados por banda confirman el comportamiento esperado: al incrementar el aislamiento del hueco de fachada —ventana, marco y sellos— disminuye el nivel acústico interior estimado en las bandas críticas de tráfico (250–1000 Hz), mientras que la incorporación discreta de absorción interior reduce el tiempo de reverberación sin alterar la geometría. La diferencia reportada como Δ (modelo–referencia) se mantiene dentro de márgenes coherentes con la ley de masa en transmisión y con los modelos clásicos de sala (Sabine/Eyring).

En conjunto, el Mapa de Decisiones Acústicas (MDA) priorizó, en orden de impacto y viabilidad, la mejora del acristalamiento y la continuidad de sellos en el hueco de fachada, los ajustes discretos de la relación ventana–muro (WWR, Window-to-Wall Ratio) dentro de límites geométricos del proyecto y, cuando fue necesario para estabilizar inteligibilidad, la incorporación puntual de absorción interior. Las alternativas que cumplieron simultáneamente las metas por banda de nivel interior y de tiempo de reverberación y mantuvieron Δ dentro de rangos

esperables se consideraron soluciones correctas en etapa conceptual.

4. Discusión

En primer lugar, bajo un perfil de ruido acústico exterior representativo de zona de tráfico en Santiago de Querétaro, las configuraciones de referencia A (WWR 0.25) y B (WWR 0.35), con ventana doble laminada 6/16/4+4 y paño opaco de mampostería hueca de 12 cm, no alcanzan la atenuación requerida para cumplir las metas interiores en la estancia durante el día y en el dormitorio durante la noche. Además, el déficit agregado se sitúa alrededor de 1.5 a 2.0 dB(A) para la configuración A y resulta mayor para la configuración B. En consecuencia, el MDA propone opciones de diseño ordenadas por prioridad: primero, escalar el acristalamiento a una variante con mejor respuesta al tráfico, por ejemplo 6/16/6+6 con mayor R_w y mejor C_{tr} ; después, reducir el WWR hacia 0.15–0.20 si persisten brechas en el proyecto. Con estos ajustes, las alternativas generadas alcanzan los umbrales exigidos para ambos escenarios. Por otra parte, los valores T_{60} se mantienen dentro del rango objetivo mediante tratamientos discretos de absorción ya antes mencionados; por tanto, el cumplimiento global queda condicionado principalmente por la transmisión acústica a través de la fachada.

A continuación, conviene explicar por qué se observa ese comportamiento. Cuando el WWR es igual o superior a 0.25, el hueco de la fachada —entendido como el conjunto de vidrio, marco y juntas— domina el balance energético aun si el paño opaco cumple la ley de masa. Asimismo, el contenido espectral del tráfico concentra energía entre 250 y 1000 Hz; por ello, los acristalamientos con C_{tr} desfavorable penalizan el desempeño agregado, mientras que incrementar espesor o laminar de forma adecuada aporta típicamente entre 2 y 3 dB en ese rango. Además, al aumentar el WWR crece el peso relativo del hueco frente al paño y la suma energética por áreas conduce a reducciones sistemáticas del aislamiento de la fachada $D_{2m,nT}$, cuando no se compensa con un mejor acristalamiento o con un sellado más exigente.

Por otra parte, el modelo y el MDA muestran su validez funcional para la fase de la concepción arquitectónica: con materiales de catálogo y perfiles exteriores publicados, estos permiten fijar metas, derivar requisitos y priorizar las alternativas con un registro verificable por banda. A ello se suma que los controles de coherencia física —más absorción interior implica un menor T_{60} ; mejor ventana o menor WWR implica un menor nivel acústico interior— estas refuerzan la robustez del enfoque. No obstante,

existen limitaciones razonables. En primer lugar, la representatividad del perfil de ruido acústico exterior condiciona la generalización de resultados. En segundo lugar, la variabilidad de la instalación (continuidad de sellos y calidad de montaje) puede introducir desviaciones del orden de 1 a 3 dB. En tercer lugar, los agregados en dB(A) son útiles para comunicar, pero no sustituyen las verificaciones por banda cuando el proyecto trabaja cerca del límite de cumplimiento.

De cara a la aplicabilidad, el MDA es transferible a otros contextos urbanos siempre y cuando se cuente con un perfil espectral razonable, con metas operativas por uso y franja —por ejemplo LAeq y T_{60} — y con parámetros de catálogo con registro verificable: coeficientes de absorción por banda, curvas de transmisión o índice R por banda, R_w y, para la fachada, $D_{2m,nT,w}$ o, en su defecto, $D_{nT,w}$ con supuestos explícitos. A partir de ello, se derivan implicaciones de proyecto. En el acristalamiento, la selección debe responder a la exigencia en bandas críticas usando R_w más C_{tr} como criterio; el paso de 4+4 a 6+6 del laminado acústico suele entregar el incremento necesario frente al tráfico. En WWR, si el vidrio elegido no cierra la brecha, conviene reducir el área acristalada en un escalón, por ejemplo de 0.25 a 0.15 y 0.20. En sellos y juntas, cuando el déficit es igual o inferior a 2 dB, la continuidad y el doble sellado son medidas efectivas; por encima de ese umbral, es preferible escalar vidrio y, si procede, ajustar WWR. En el T_{60} , lo importante es mantener los valores entre 0.40 y 0.60 segundos con una absorción discreta en techo o pared ya que ayuda a que el término de sala contribuya a reducir la intrusión acústica interior sin alterar la arquitectura.

Finalmente, con vistas a mejoras futuras, resulta pertinente una corroboración en campo de una o dos alternativas que el MDA clasifica como cumplidoras, con el fin de estimar la brecha instalación-modelo y ajustar las reglas. Asimismo, conviene incorporar indicadores perceptuales propios de la vivienda —como molestia o calidad acústica percibida—, parametrizar las variables urbanas —altura, retranqueos, barreras y orientación— para modular la exposición acústica exterior del sitio, y desarrollar una biblioteca local de curvas por banda verificadas de ventanas y muros que reduzca la incertidumbre de entrada. De este modo, el enfoque podrá evolucionar desde una herramienta de concepción hacia un soporte sistemático de decisión en etapas tempranas con mayor poder predictivo.

5. Conclusión

Al desarrollar un modelo acústico para la fase de conceptualización de vivienda urbana y un Mapa de

Decisiones Acústicas (MDA) que operan por bandas de frecuencia. Se pudo constatar, el objetivo general del estudio, ya que como se muestra en los resultados se logra llegar a una configuración que cumple con las metas interiores, con el perfil de ruido acústico exterior y generar opciones de diseño ordenadas por prioridad con registro verificable. Con insumos secundarios —perfiles publicados y fichas técnicas— el modelo permite fijar objetivos, derivar requisitos por componente y documentar el estado de cumplimiento de cada alternativa de manera transparente y reproducible.

Aplicado el MDA a un escenario representativo de zona de tráfico en Santiago de Querétaro, los resultados muestran que el desempeño acústico total del espacio está gobernado por la transmisión de fachada, en particular por el hueco (ventana, marco y sellos) y por la relación ventana–muro (WWR). Las configuraciones de referencia no alcanzan las metas; sin embargo, el MDA identifica rutas de mejora inmediatas: escala de acristalamiento guiada por $R_w + C_{tr}$ y, cuando es necesario, reducción de WWR. Cuando la brecha es pequeña aproximadamente de 1 a 2 dB, la continuidad de sellos cierra el déficit con alta eficiencia. Los T_{60} se mantienen en rangos objetivo con una absorción discreta, por lo que la limitante principal es la transmisión a través de la ventana y su proporción en fachada.

El aporte práctico es una metodología de decisión que explicita la racionalidad del proyecto, compara variantes con base física y normativa y deja un registro verificable por banda. El enfoque es transferible a otros contextos urbanos siempre que se cuente con un perfil espectral razonable y catálogo trazables.

Como limitaciones, destacan la dependencia de la representatividad del perfil exterior adoptado y la variabilidad de la instalación como por ejemplo la continuidad de sellos, las holguras del marco y las tolerancias de obra ya que puede introducir desviaciones de 1 a 3 dB respecto del desempeño previsto. Por ello, los agregados en dB(A) son útiles para comunicar, pero no sustituyen la verificación por banda cuando se trabaja cerca del umbral. Para trabajos futuros se recomienda corroborar en campo una o dos alternativas clasificadas como cumplidoras por el MDA, incorporar indicadores perceptuales propios del ámbito residencial, parametrizar variables urbanas (altura, retranqueos, barreras, orientación) y consolidar una biblioteca local de curvas verificadas por banda para ventanas y muros, con el fin de reducir la incertidumbre y fortalecer la comparabilidad entre proyectos.

Fuentes de financiamiento

Los autores agradecen ampliamente a la Secretaría de

Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI) por los recursos otorgados que hicieron posible el desarrollo de este Artículo de investigación.

Agradecimientos

Los autores agradecen ampliamente a la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI) y a la Universidad Autónoma de Querétaro por su incontable apoyo para la realización de esta investigación así como a las instituciones pertinentes por facilitar la información técnica que hicieron posible el desarrollo de esta investigación.

Conflictos de interés

Los autores declaran que no existe conflicto de interés alguno para la revisión y publicación de la presente obra.

Abreviaturas

Las siguientes abreviaturas se utilizan en este manuscrito:

MDA: Mapa de Decisiones Acústicas

WWR: Window-to-Wall Ratio (relación ventana–muro)

LAeq: Nivel continuo equivalente **ponderado A** (dB(A)); síntesis temporal del nivel sonoro.

LAeq,day/ LAeq,night: LAeq en **franja diurna / franja nocturna** (dB(A)).

Lp: Nivel de **presión sonora** (dB).

Lp,2m,ext(f): Nivel exterior a **2 m** de la fachada, por banda f (dB).

Lp,int(f): Nivel interior previsto, por banda f (dB).

T₆₀: Tiempo de reverberación medido en segundos

T₀: Tiempo de referencia en el término de sala (s), tomado como **0.5 s**.

Rw: Índice de reducción sonora ponderado (dB) de un elemento

C: Término de adaptación espectral (dB) para ruido de banda ancha.

C_{tr}: Término de adaptación para tráfico (dB), corrige R_w para espectros dominados por bajas/medias frecuencias.

TL / R(f): Pérdida por transmisión / índice R **por banda** f (dB).

DnT,w: Diferencia de nivel estandarizada ponderada (dB) entre recintos considerando T.

D_{2m,nT}(f): Diferencia de nivel estandarizada a 2 m de fachada por banda f (dB).

D_{2m,nT,w}: Versión **ponderada** (dB) de D_{2m,nT}

D_{2m,nT,A}: Valor **agregado con ponderación A** (dB(A)) usado para comparar.

$\alpha(f)$ Coeficiente de absorción sonora por banda f (adimensional).

V — Volumen del recinto (m³).

S — Área total de superficies (m²).

A — Absorción equivalente (m² Sabine): $A = \sum \alpha_i(f) S_i$

m: Masa superficial (kg/m²), usada en la **ley de masa** para paños opacos.

NOM-081-SEMARNAT-1994 — Norma Oficial Mexicana: límites de **emisión de ruido** de fuentes fijas y método de medición.

NOM-011-STPS-2001 — Norma Oficial Mexicana: **condiciones de exposición ocupacional** a ruido.

NMX — **Normas Mexicanas:** procedimientos y ensayos para **aislamiento a ruido aéreo** y **propiedades acústicas** de elementos.

dB: Decibel (unidad logarítmica de nivel).

dB(A): Decibel ponderado A (ajuste espectral aproximado a la sensibilidad humana).

Hz: Hertz (frecuencia); en el artículo se usan bandas de **1/1 de octava:** 125, 250, 500, 1000, 2000 y 4000 Hz.

DEP-MA: Dependencia municipal de medio ambiente / informe oficial

FAB-A/LAB Fabricante con respaldo de laboratorio acreditado

FAB-B Ficha de fabricante (método base declarado)

FAB-C Ficha de fabricante (método base declarado)

LAB-ACR Laboratorio acreditado (NMX/ISO)

LAB/PROV Laboratorio o proveedor de sistema con ensayo reportado

CAT-MUN Catálogo o base municipal/estadística de tipologías

EXT-2m-Z Perfil exterior a 2 m de fachada; Leq por bandas; ponderación Z

ISO/NMX-354 Ensayo de $\alpha(f)$ en cámara reverberante (ISO/NMX 354)

ISO-10140/717 Aislamiento en laboratorio (ISO 10140); índice único (ISO 717)

ISO/NMX-10140 Ensayo de R(f) en laboratorio (NMX/ISO 10140)

ISO-16283-3 Medición de D_{2m,nT}(f) de fachada (in situ, fuente secundaria)

6. Referencias bibliográficas

- [1] NOM-081-SEMARNAT-1994. Establece los límites máximos permisibles de emisión de ruido de las fuentes fijas y su método de medición. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT), México, 1994.
- [2] NOM-011-STPS-2001. Condiciones de seguridad e higiene en los centros de trabajo donde se genere ruido. Secretaría del Trabajo y Previsión Social (STPS), México, 2001.
- [3] ISO 16283-3:2016. Acoustics — Field measurement of sound insulation in buildings and of building elements — Part 3: Façade sound insulation. International Organization for Standardization (ISO), Ginebra, 2016.
- [4] ISO 16283-1:2014. Acoustics — Field measurement of sound insulation in buildings and of building elements — Part 1: Airborne sound insulation. International Organization for Standardization (ISO), Ginebra, 2014.
- [5] ISO 10140-2:2021. Acoustics — Laboratory measurement of sound insulation of building elements

— Part 2: Measurement of airborne sound insulation. International Organization for Standardization (ISO), Ginebra, 2021.

- [6] ISO 717-1:2020. Acoustics — Rating of sound insulation in buildings and of building elements — Part 1: Airborne sound insulation. International Organization for Standardization (ISO), Ginebra, 2020.
- [7] CENAM. Diseño de la medición de ruido en la ciudad de Santiago de Querétaro. Centro Nacional de Metrología, Informe técnico, Querétaro, 2016.
- [8] CENAM. Protocolo para las mediciones de ruido y espectro en ciudades. Centro Nacional de Metrología, Documento metodológico, Querétaro, 2015.
- [9] Instituto Mexicano del Transporte (IMT). Publicación Técnica 187: Estudio del ruido generado por la operación del transporte carretero. Caso II (México–Querétaro). IMT, Sanfandila, Querétaro, 2002.
- [10] NMX-C-10140-1-ONNCCE-2020. Industria de la construcción — Acústica — Medición en laboratorio del aislamiento acústico de elementos de construcción — Parte 1: Generalidades. Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación (ONNCCE), México, 2020.
- [11] PROY-NMX-C-10140-2-ONNCCE-2021. Industria de la construcción — Medición en laboratorio del aislamiento acústico de elementos de construcción — Parte 2: Medición del aislamiento al ruido aéreo. ONNCCE, México, 2021. (Proyecto de Norma).
- [12] NMX-R-060-SCFI-2013. Aislamiento acústico de los elementos de construcción. Parte 2. Medición del aislamiento acústico al ruido aéreo. Secretaría de Economía (SCFI), México, 2013.
- [13] ISO 3382-1:2009/2020. Acoustics — Measurement of room acoustic parameters — Part 1: Performance spaces. International Organization for Standardization, Ginebra, 2009/2020.
- [14] ISO 354:2003/2020. Acoustics — Measurement of sound absorption in a reverberation room. International Organization for Standardization, Ginebra, 2003/2020.

Evaluación sustentable de residuos de construcción como material para bases de pavimentos

Sustainable evaluation of construction waste as material for pavement base layers

Miranda Sánchez Cristofer, Chávez Alegría Omar y Miranda Sánchez Betsie

Afiliación: Facultad de Ingeniería, Maestría en Ingeniería de Vías Terrestres y Movilidad

Universidad Autónoma de Querétaro

Santiago de Querétaro, México.

Correo electrónico de los autores: crisultra1401@gmail.com , omar.chavez@uaq.mx , betsiemiranda.2509@gmail.com

Resumen: La gestión de residuos de construcción y demolición representó un reto ambiental y de aprovechamiento de recursos, por lo que en esta investigación se evaluó su viabilidad técnica y sustentable para su uso como material en bases de pavimentos. Se recolectaron muestras provenientes de un banco de residuos de concreto reciclado (REURBA) y se compararon con materiales vírgenes de bancos tradicionales de Querétaro. Las pruebas de laboratorio incluyeron análisis granulométrico, límites de Atterberg, compactación Proctor, resistencia CBR y desgaste de Los Ángeles, conforme a la norma N-CMT-4-02-002/22 y estándares ASTM. Los resultados mostraron que el material reciclado presentó una curva granulométrica bien graduada, baja plasticidad y valores de CBR superiores al 80 %, cumpliendo con los requisitos para bases hidráulicas de tráfico pesado. Asimismo, se determinó que la humedad que maximiza la resistencia ($\approx 8\%$) fue menor que la humedad óptima Proctor ($\approx 14\%$), lo que implicó un ahorro potencial de agua en el proceso de compactación. Comparado con bancos de material virgen, el banco REURBA demostró un desempeño técnico equivalente o superior, con ventajas ambientales derivadas de la reducción de la extracción de recursos naturales y la disposición en vertederos. Estos hallazgos confirmaron que el uso de residuos reciclados es técnica, económica y ambientalmente viable, aportando una alternativa sustentable alineada con la Agenda 2030 y la transición hacia una economía circular en el sector de la construcción vial.

Palabras clave: VTM; Residuos de Construcción y Demolición; Bases Hidráulicas; Pavimentos; Sostenibilidad.

Abstract: The management of construction and demolition waste posed an environmental and resource efficiency challenge, which is why this research evaluated its technical and sustainable feasibility for use as pavement base material. Samples from a recycled concrete waste bank (REURBA) were collected and compared with virgin aggregates from traditional banks in Querétaro. Laboratory tests included grain size distribution, Atterberg limits, Proctor compaction, California Bearing Ratio (CBR), and Los Angeles abrasion resistance, according to the N-CMT-4-02-002/22 standard and ASTM methods. Results showed that the recycled material exhibited a well-graded particle distribution, low plasticity, and CBR values above 80 %, meeting requirements for heavy-traffic hydraulic bases. It was also determined that the moisture content maximizing strength ($\approx 8\%$) was lower than the Proctor optimum moisture ($\approx 14\%$), implying potential water savings during compaction. Compared with virgin materials, REURBA performed equally or better, while providing environmental benefits by reducing natural resource extraction and landfill disposal. These findings confirmed that recycled waste is technically, economically, and environmentally viable, offering a sustainable alternative aligned with the 2030 Agenda and the transition towards a circular economy in road construction.

Keywords: VTM; Construction and Demolition Waste; Hydraulic Bases; Pavements; Sustainability.

1. Introducción

La generación de residuos de construcción y demolición (RCD) representó un desafío ambiental

significativo, ya que estos desechos constituyeron hasta el 40 % de los residuos sólidos urbanos, ocupando grandes volúmenes en vertederos y presionando la explotación de recursos naturales [1]. En paralelo, la infraestructura vial demandó materiales más sostenibles y económicamente viables para bases de pavimentos, debido al alto costo y al impacto ambiental asociado con la extracción de agregados vírgenes [2]. Frente a este panorama, la reutilización de RCD como material en bases hidráulicas surgió como una alternativa con potencial para contribuir a la economía circular, reducir impactos ambientales y mantener el desempeño técnico de los pavimentos [3].

Estudios recientes demostraron que los agregados reciclados pueden alcanzar propiedades mecánicas similares a las de los materiales convencionales, incluyendo resistencia al corte, durabilidad y capacidad de soporte [4]. Sin embargo, su aceptación en proyectos viales ha sido limitada por la falta de estandarización y de estudios aplicados a normativas nacionales. En México, la norma N-CMT-4-02-002/22 estableció los criterios técnicos para bases hidráulicas, lo cual abrió la posibilidad de evaluar formalmente materiales reciclados frente a bancos vírgenes [5].

En este trabajo se evaluó la viabilidad técnica y sustentable del uso de residuos de concreto reciclado para bases hidráulicas de pavimentos, mediante pruebas de granulometría, límites de Atterberg, compactación y resistencia CBR, comparando con materiales vírgenes de la región de Querétaro. El objetivo fue demostrar que los RCD cumplen con los requisitos normativos y ofrecen ventajas ambientales y económicas, aportando evidencia científica que fortalezca su implementación en proyectos de infraestructura vial alineados con los principios de sostenibilidad de la Agenda 2030 [6].

2. Materiales y métodos

Las muestras de residuos de construcción se recolectaron en el banco REURBA, ubicado en la zona metropolitana de Querétaro, único en el país que cumple con la Norma Técnica Ambiental Estatal para el manejo de residuos de construcción y demolición [1]. Como referencia comparativa, también se consideraron materiales vírgenes provenientes de bancos tradicionales de la región, entre ellos basálticos y sedimentarios.

Los bancos AGC y La Luz fueron seleccionados por su representatividad geológica en la región

(materiales basálticos y sedimentarios), su disponibilidad para extracción y su cercanía al área metropolitana de Querétaro, lo que permitió una comparación directa con condiciones reales de suministro.

Se analizaron un total de 18 muestras representativas, seis por cada banco (REURBA, AGC y La Luz). Para cada ensayo se realizaron tres réplicas independientes, con el fin de garantizar la reproducibilidad de los resultados y minimizar el error experimental.

La preparación de las muestras se realizó mediante el método del cono, con el fin de obtener fracciones representativas del material triturado. Una vez recolectadas, las muestras se procesaron y caracterizaron de acuerdo con los procedimientos establecidos en normas ASTM y en la normativa mexicana aplicable. El método del cono se aplicó utilizando aproximadamente 50 kg de material por muestra. Se estableció un tamaño máximo nominal de agregado de 37.5 mm, y el material fue previamente triturado y cribado en fracciones controladas según la ASTM C136M-19. Posteriormente, las fracciones se mezclaron homogéneamente para garantizar una muestra representativa.

En el caso del material reciclado (REURBA), se realizaron pruebas de **límite líquido e índice de plasticidad** (ASTM D4318-17), **compactación Proctor modificada** (ASTM D1557-12), **índices de lajeo y alargamiento** (ASTM D4791), **equivalente de arena** (ASTM D2419), **permeabilidad** (ASTM D2434), y **desgaste de Los Ángeles** (ASTM C131) con el objetivo de determinar sus propiedades mecánicas, índices y la relación entre densidad seca máxima y humedad óptima.

Antes de los ensayos, el material reciclado fue sometido a una inspección visual y separación manual para eliminar impurezas como restos de acero, asfalto, yeso o mortero adherido. Solo se conservaron fracciones limpias de concreto triturado, reduciendo así la influencia de contaminantes en los resultados de laboratorio.

Todas las pruebas ASTM se ejecutaron siguiendo estrictamente el protocolo establecido, utilizando equipos calibrados conforme al sistema de gestión de calidad del laboratorio. Las condiciones ambientales se mantuvieron a 23 ± 2 °C, sin aplicar adaptaciones locales que alteraran los procedimientos.

Tanto para el material reciclado como para los bancos de materiales vírgenes, se realizaron los siguientes ensayos comparativos:

- **Análisis granulométrico**, conforme a la ASTM

C136M-19, para determinar la distribución de tamaños de partícula.

- **California Bearing Ratio (CBR)**, siguiendo la ASTM D1883-16, con la finalidad de evaluar la resistencia mecánica y capacidad de soporte bajo distintas condiciones de humedad y energía de compactación.

Los resultados se evaluaron conforme a los criterios de la norma N-CMT-4-02-002/22, que establece los parámetros de aceptación para bases hidráulicas de pavimentos en México [2].

3. Resultados

Para cada parámetro medido se calcularon las

medias y desviaciones estándar, presentando variaciones menores al 5 %, lo que indica una buena consistencia entre réplicas. Los valores reportados en cuadros corresponden a los promedios obtenidos.

El análisis granulométrico mostró que el material reciclado del banco REURBA presentó una curva bien graduada, con menos del 20 % de finos (pasa malla N°200), lo cual se encuentra dentro de los límites establecidos por la norma N-CMT-4-02-002/22 para bases hidráulicas de pavimentos [1]. Los bancos de materiales vírgenes AGC y La Luz también cumplieron con la normativa, aunque mostraron diferencias en la continuidad de la distribución: en AGC la curva fue más abierta en fracciones intermedias, mientras que La Luz presentó predominio de partículas gruesas. Estas variaciones pueden observarse en la Figura 1 y 2, donde se presentan las curvas granulométricas comparativas de los tres bancos.

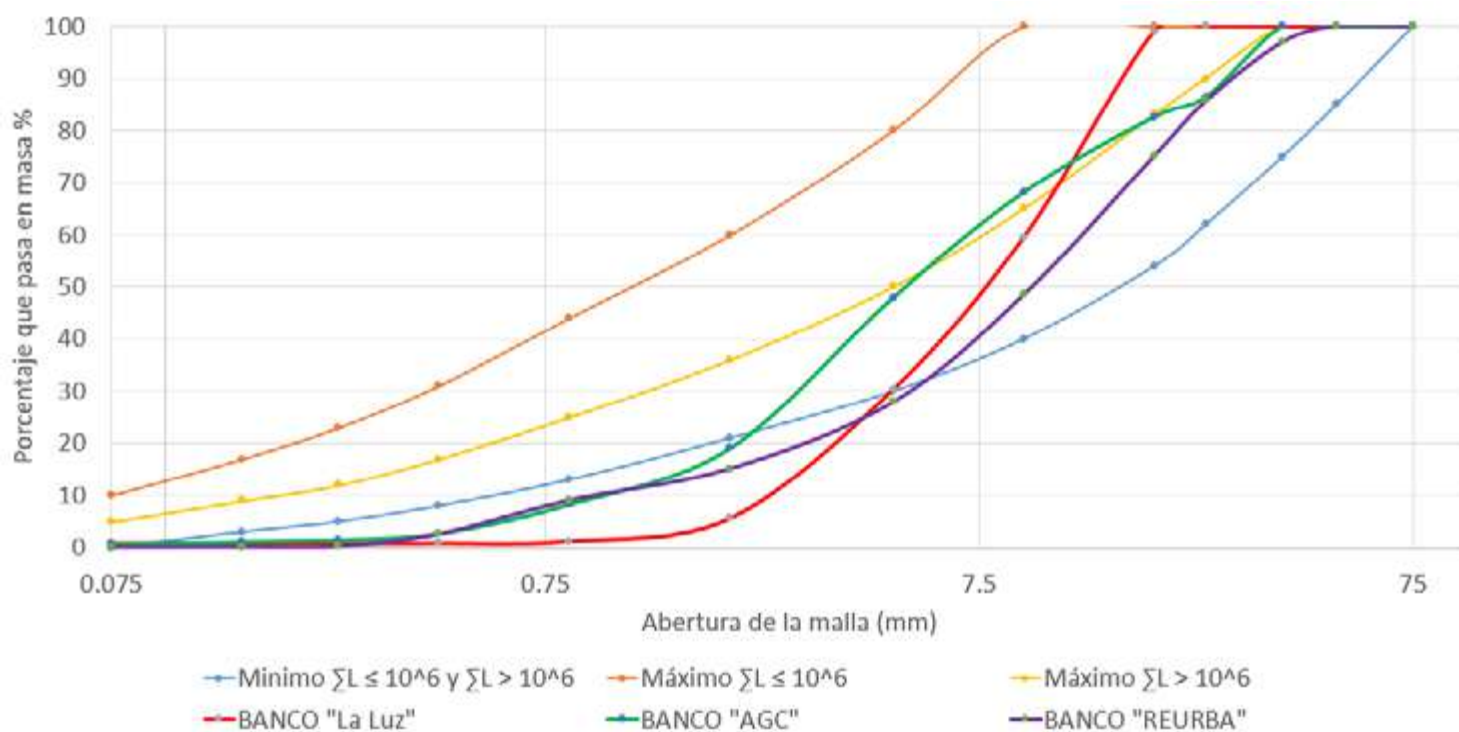


Figura 1. Curvas granulométricas conforme a la norma N-CMT-4-02-002/22 para bases de pavimentos con solamente un tratamiento asfáltico superficial. En dicha norma se establecen los límites granulométricos mínimos y máximos para materiales utilizados en estructuras sometidas a tráfico menor o igual a 10^6 ejes equivalentes ($\Sigma L \leq 10^6$) y mayor a 10^6 ejes equivalentes ($\Sigma L > 10^6$).

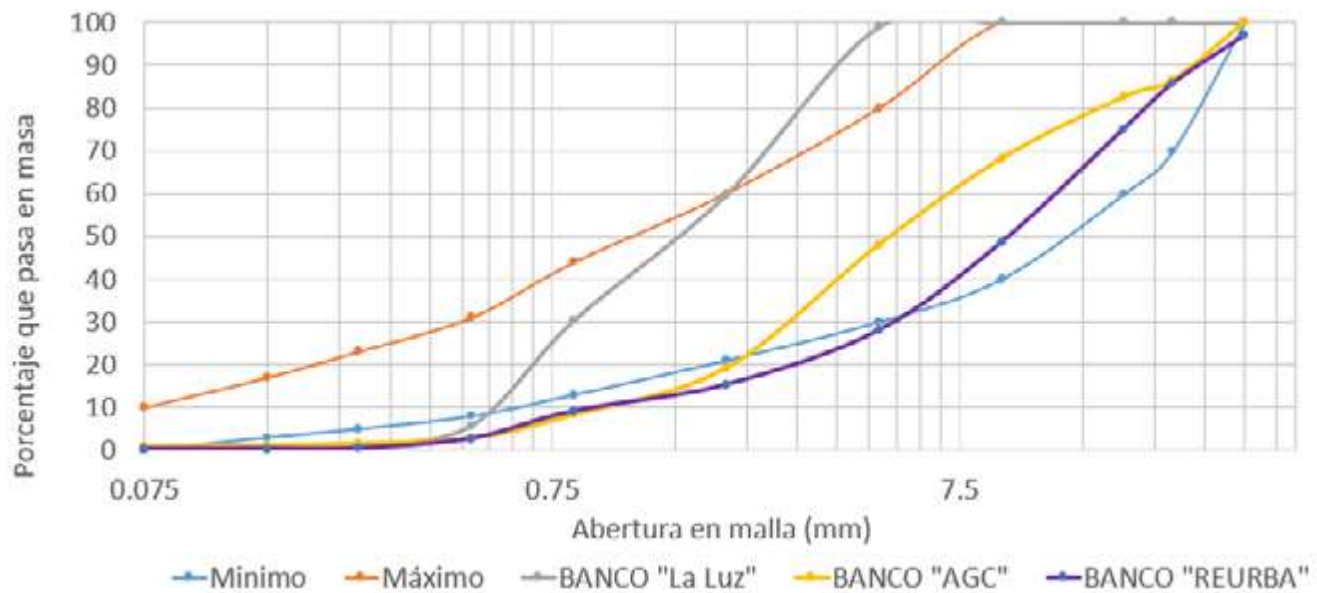


Figura 2. Curvas granulométricas para bases de pavimentos con carpetas de concreto hidráulico

En cuanto a los límites de Atterberg, el material reciclado mostró un bajo índice de plasticidad, con un límite líquido inferior al 25 %, cumpliendo con el requisito normativo para materiales granulares empleados en bases hidráulicas [2]. El resultado es de un 13% de LL representado en el Cuadro 1 y al Figura 3.

Cuadro 1: Resultados de límites de plasticidad del material reciclado

Material	Límite líquido (%)	Índice de plasticidad (%)	Límite normativo N-CMT-4-02-002/22	Interpretación
REURBA	13	Bajo (no plástico, ≈5 %)	LL < 25 %	Se encuentra 48 % por debajo del límite máximo; indica muy baja plasticidad .

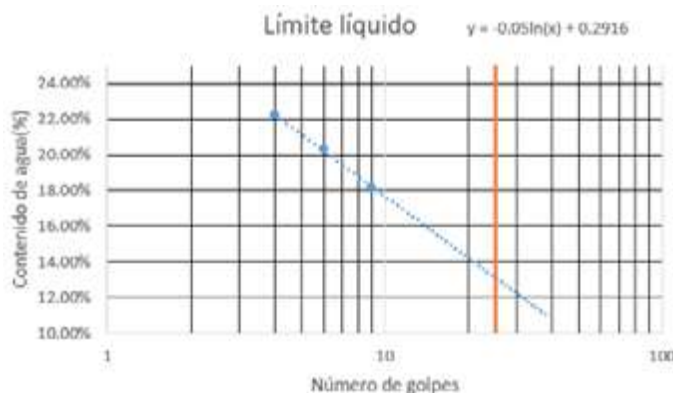


Figura 3: Grafica de límites de plasticidad del material reciclado.

La prueba Proctor modificada realizada al material reciclado determinó una humedad óptima de aproximadamente 14 % y una densidad seca máxima de 1800 kg/m³, tal como se muestra en el Cuadro 2. La relación entre el contenido de humedad y la densidad seca se presenta en la Figura 4, donde se observa el punto de compactación óptimo.

Cuadro 2: Resultados de la prueba Proctor modificada en material reciclado.

Material	Humedad óptima (%)	Densidad seca máxima (kg/ m³)
REURBA	14	1800

Nota: La densidad seca máxima de 1800 kg/m³ y humedad óptima del 14 % se encuentran dentro del rango esperado (1700–2100 kg/m³) para bases hidráulicas con agregados de granulometría gruesa, lo que demuestra una compactabilidad adecuada.

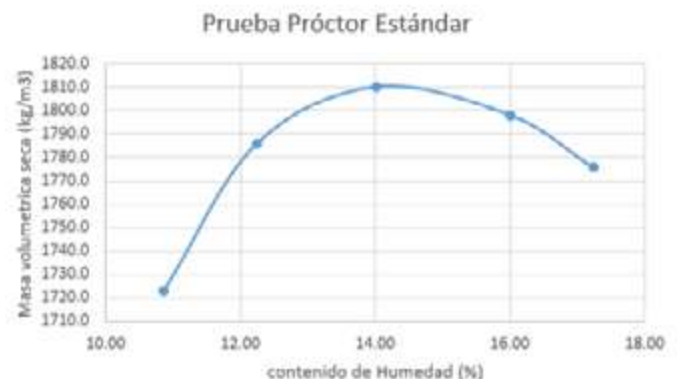


Figura 4: Curva de compactación Proctor del banco REURBA.

Los resultados de la prueba de lajeo y alargamiento indican que el material de REURBA presentó valores de 10.93 % de alargamiento y 38.79 % de lajeo, sumando un 49.72 %. Aunque el valor combinado se encuentra cercano al límite normativo del 40 %, como se muestra en el cuadro 3.

Cuadro 3: Resultados de la prueba de lajeo y alargamiento en material reciclado.

Propiedad	Valor obtenido (%)	Límite normativo (%)	Interpretación
Alargamiento	10.93	< 40	Muy por debajo del límite; partículas con buena forma.
Lajeo	38.79	< 40	Cercano al límite , requiere control en producción.
Suma (Lajeo + Alargamiento)	49.72	≤ 40 (recomendado)	9.72 % sobre el valor recomendado, aunque cada índice por separado cumple.

En la prueba de equivalente de arena, el material de REURBA obtuvo un valor promedio de 64 % antes de la compactación y 46 % después de la compactación, como se observa en el Cuadro 4. Ambos resultados se encuentran por encima del mínimo requerido por la norma N-CMT-4-02-002/22 (40 %).

Esto confirma que el contenido de finos es adecuado y que el material mantiene un nivel de limpieza aceptable para su uso en pavimentos.

Cuadro 4: Resultados de la prueba de equivalente de arena en material reciclado.

Ensayo	Valor obtenido (%)	Límite normativo (%)	Interpretación
Antes de compactación	64	> 40	24 puntos arriba del mínimo; material limpio y estable.

Ensayo	Valor obtenido (%)	Límite normativo (%)	Interpretación
Después de compactación	46	> 40	6 puntos arriba del mínimo; ligera reducción por reacomodo de partículas.

El coeficiente de permeabilidad determinado para el material de REURBA estuvo en el orden de 10^{-3} a 10^{-2} cm/s, con un valor promedio de aproximadamente 5.6×10^{-3} cm/s, como se observa en el Cuadro 5.

Esta condición clasifica al material como altamente permeable, lo cual resulta favorable para su desempeño como base hidráulica, al permitir un drenaje eficiente y disminuir la acumulación de agua dentro de la estructura del pavimento.

Cuadro 5: Resultados de la prueba de permeabilidad en material reciclado.

Ensayo	Coeficiente k (cm/s) obtenido	Rango de aceptación recomendado	Interpretación
Permeabilidad a carga constante	5.6×10^{-3}	$10^{-2} - 10^{-4}$	Valor dentro del rango superior, indica alta permeabilidad favorable para drenaje.

Los resultados de la prueba de abrasión Los Ángeles para el material reciclado de concreto indican una pérdida por desgaste de 27.47 %, como se observa en el Cuadro 6.

Este valor se encuentra dentro del rango establecido por la normativa aplicable (por ejemplo, la N-CMT-4-04/02 de la SCT establece un límite máximo de 30% para bases hidráulicas, lo que sugiere que el material cumple con los criterios de resistencia al desgaste por abrasión y es técnicamente viable para emplearse como agregado en la conformación de bases para pavimentos.

Cuadro 6: Resultados de la prueba de resistencia a la abrasión en material reciclado.

Prueba	Valor obtenido (%)	Límite normativo (%)	Interpretación
Desgaste Los Ángeles	27.47	< 30	2.5 puntos por debajo del límite; buena resistencia al desgaste.

Los ensayos de CBR se realizaron en los tres bancos (REURBA, AGC y La Luz), evaluando la resistencia bajo diferentes contenidos de humedad y energías de compactación. De cada banco se realizaron 6 pruebas subiendo al porcentaje de humedad un 2% en cada

prueba, sus graficas de resistencia vs penetración presentadas en la Figura 5, 6 y 7. Y sus curvas de compactación en las Figuras 8, 9 y 10.

El rango de humedad analizado (3 %–17 %) se definió con base en el contenido óptimo Proctor de cada material, ampliando el intervalo ± 6 % para observar la influencia de condiciones secas y saturadas, simulando escenarios de campo reales. La compactación se realizó con la energía estándar de 600kN m/m³ del Proctor modificado (ASTM D1883), aplicando tres capas de 23 golpes cada una con un pisón de 6.15 kg, para conseguir una energía de 623.33 kN m/m³ que fue calculada para corresponder con la de la norma aplicable que se mencionó.

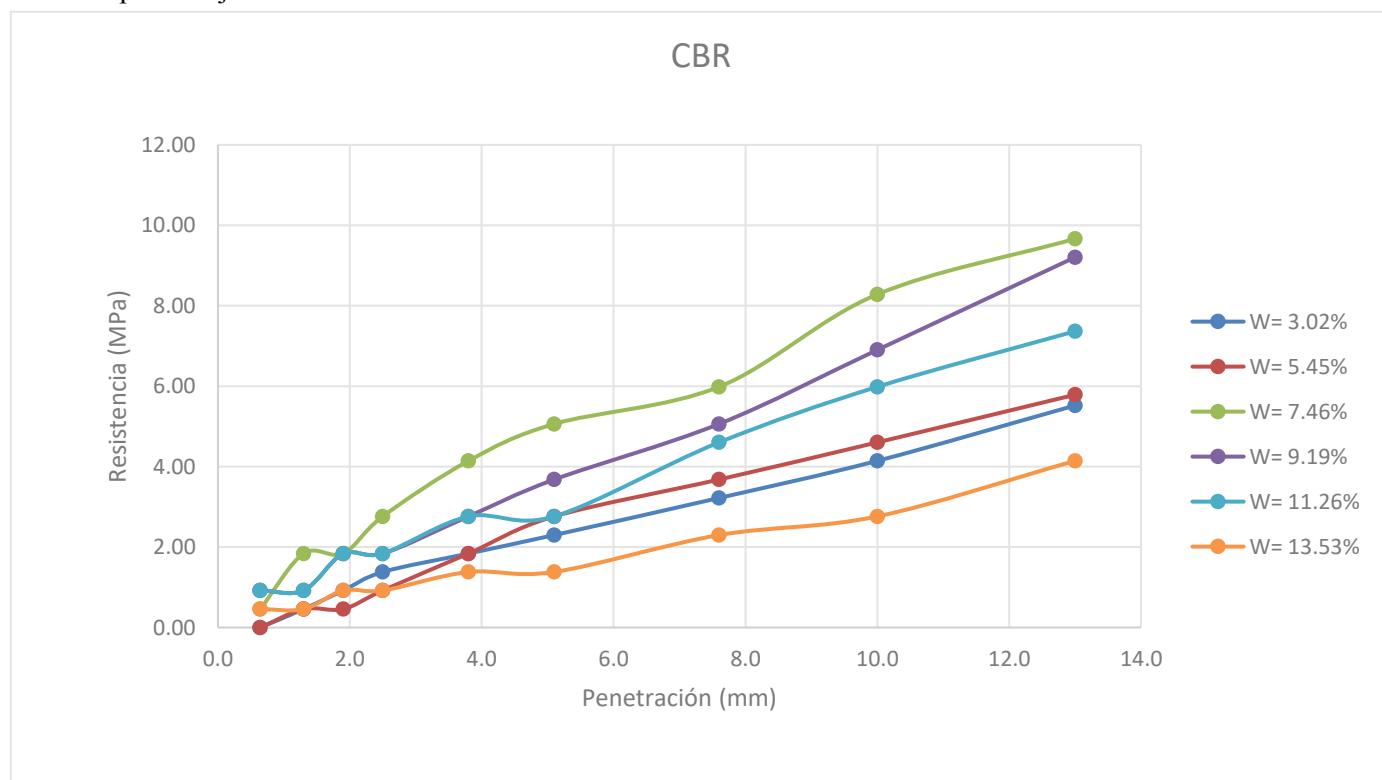


Figura 5: Grafica resistencia vs penetración de las pruebas de CBR al banco “La luz” con 6 diferentes porcentajes de humedad.

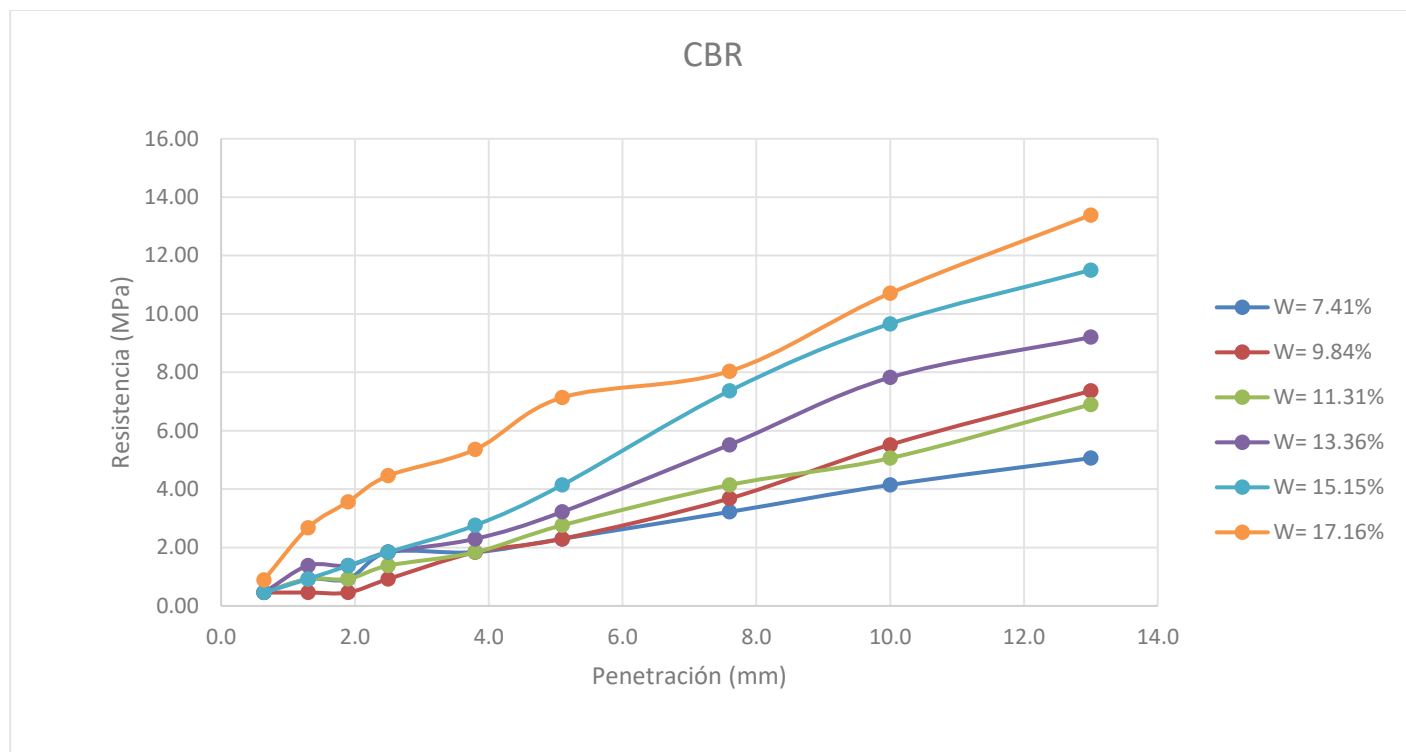


Figura 6: Grafica resistencia vs penetración de las pruebas de CBR al banco “REURBA” con 6 diferentes porcentajes de humedad.

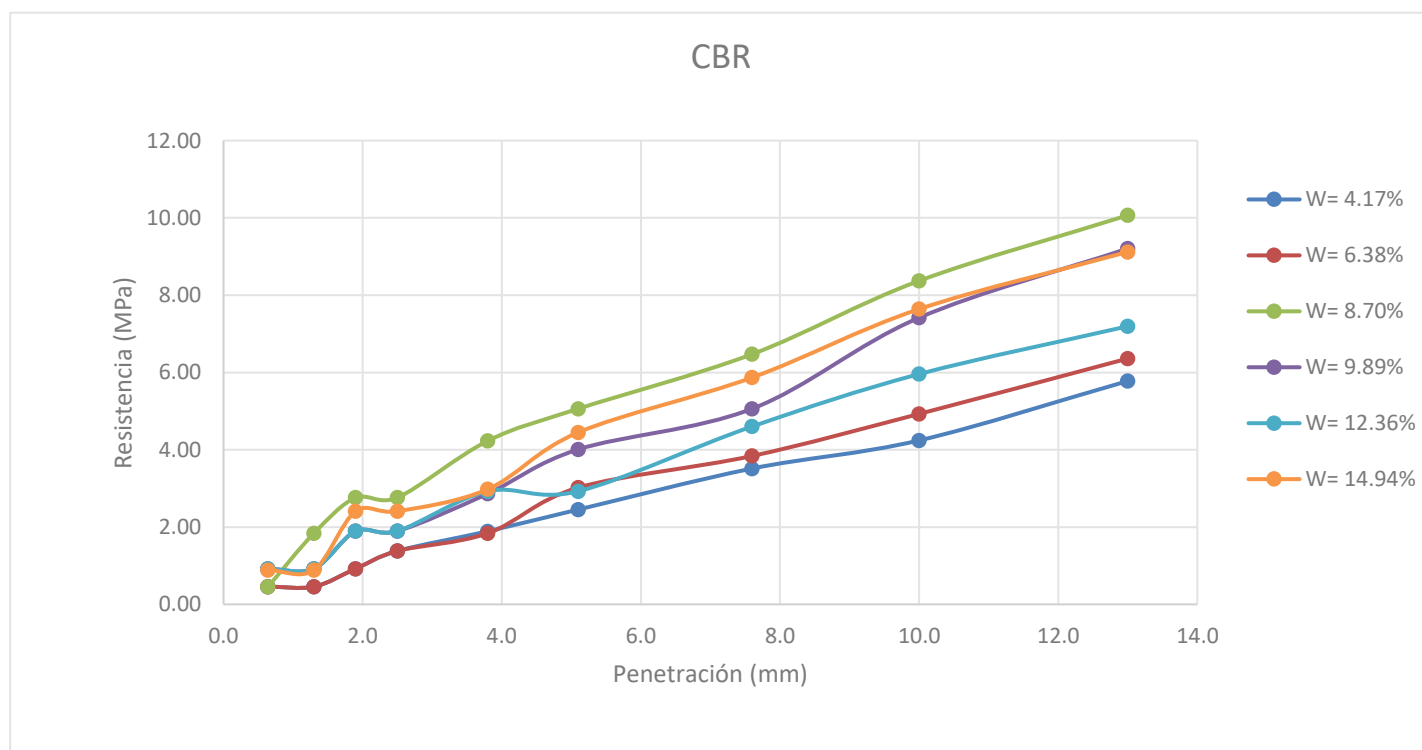


Figura 7: Grafica resistencia vs penetración de las pruebas de CBR al banco “AGC” con 6 diferentes porcentajes de humedad

Cuadro 7: Valores de CBR comparativos en bancos evaluados.

Banco	Humedad óptima (%)	CBR (%)	Interpretación
REURBA	≈8	>80	Supera en 10–15 % el valor mínimo; excelente capacidad de soporte.
AGC	≈10	70–75	Ligeramente inferior al límite inferior de tráfico pesado.
La Luz	≈12	75–85	Dentro del rango; comportamiento variable con humedad.

En síntesis, los resultados de granulometría, plasticidad, compactación y resistencia indicaron que el material reciclado REURBA cumplió con los criterios técnicos establecidos, presentando un desempeño comparable o superior al de los bancos de materiales vírgenes.

4. Discusión

Los resultados confirmaron que el material reciclado del banco REURBA cumplió con los criterios de la norma N-CMT-4-02-002/22 para bases hidráulicas de pavimentos, demostrando que los residuos de construcción y demolición pueden emplearse como sustitutos viables de los agregados vírgenes. La curva granulométrica bien graduada observada en la Figura 1, junto con el bajo índice de plasticidad mostrado en el Cuadro 1, favorecieron un comportamiento mecánico estable, lo que coincide con investigaciones previas que señalan la capacidad de los agregados reciclados para alcanzar propiedades comparables a materiales naturales [3].

Al comparar los valores obtenidos con los límites normativos, se observa que el CBR de REURBA (≈85 %) supera en un 10–15 % a los valores mínimos requeridos para tráfico pesado, mientras que los bancos AGC y La Luz se mantienen dentro del rango de aceptación, aunque con menor desempeño. Esto evidencia que el material reciclado no solo cumple, sino que ofrece márgenes de seguridad adicionales en resistencia y estabilidad.

Además de los resultados de granulometría, plasticidad, compactación y CBR, las pruebas complementarias de lajeo y alargamiento, equivalente de arena, permeabilidad y desgaste de Los Ángeles aportaron información relevante sobre el comportamiento mecánico y la durabilidad del material reciclado REURBA.

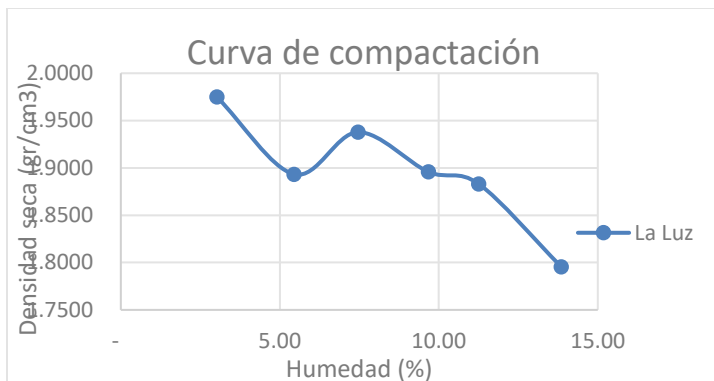


Figura 8: Curva de compactación de las pruebas de CBR al banco "La luz" con 6 diferentes porcentajes de humedad

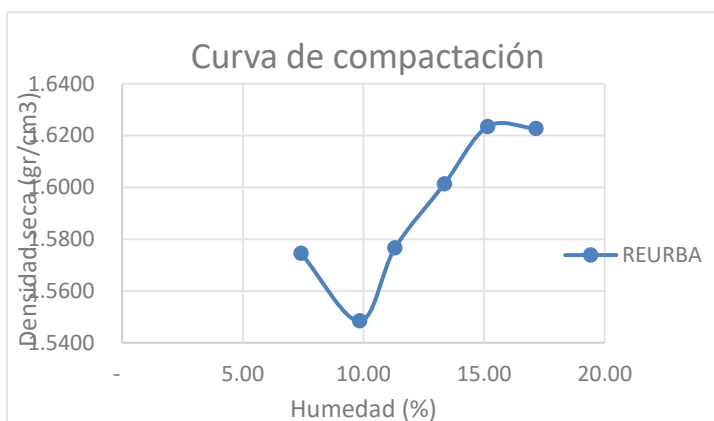


Figura 9: Curva de compactación de las pruebas de CBR al banco "REURBA" con 6 diferentes porcentajes de humedad

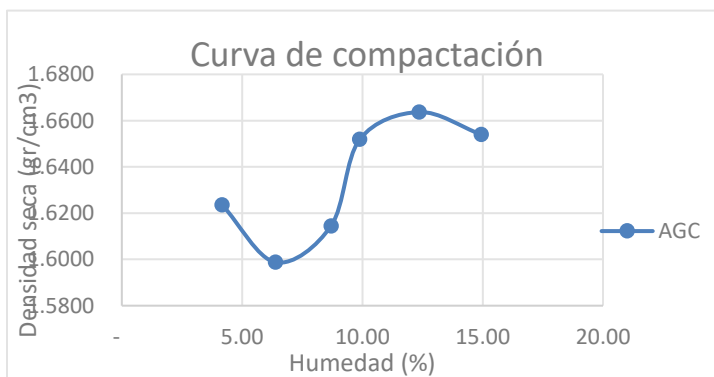


Figura 10: Curva de compactación de las pruebas de CBR al banco "AGC" con 6 diferentes porcentajes de humedad

El material reciclado alcanzó valores superiores al 80 %, considerados como aceptables para bases de tráfico pesado según la normativa [1]. El banco La Luz mostró un comportamiento variable con incrementos abruptos de resistencia en torno al contenido óptimo de humedad, mientras que AGC presentó valores más bajos y con menor sensibilidad a la humedad. La comparación de resultados se presenta en el Cuadro 7.

Los valores de lajeo (38.79 %) y alargamiento (10.93 %) se mantuvieron dentro de los límites establecidos por la normativa (<40 %), lo que demuestra que el agregado reciclado conserva una geometría adecuada para su uso en capas estructurales. Aunque la suma de ambos parámetros (49.72 %) se encuentra ligeramente por encima del valor combinado recomendado, cada índice por separado cumple con los criterios normativos, lo que indica que el material posee una forma de partículas equilibrada que favorece la compactación y la estabilidad estructural.

El equivalente de arena, con valores de 64 % antes de la compactación y 46 % después, confirmó que el material presenta un contenido de finos moderado y una limpieza aceptable. Esta disminución posterior a la compactación se atribuye al reacomodo de partículas, sin afectar el cumplimiento de los requisitos normativos (mínimo 40 %). En términos de desempeño, estos resultados reflejan una buena trabajabilidad del material y una adecuada adherencia entre partículas, condiciones que contribuyen a la durabilidad del pavimento.

El coeficiente de permeabilidad promedio de 5.6×10^{-3} cm/s clasificó al material como altamente permeable. Este comportamiento resulta favorable en bases hidráulicas, al permitir un drenaje eficiente y evitar la acumulación de agua en la estructura del pavimento. Sin embargo, su aplicación debe complementarse con subbases o sistemas de drenaje lateral que controlen el flujo de agua hacia la subrasante, previniendo pérdidas de soporte o erosión interna.

Por último, la prueba de desgaste de Los Ángeles arrojó una pérdida de 27.47 %, valor inferior al límite máximo de 30 % establecido por la N-CMT-4-04/02, lo que evidencia una buena resistencia del agregado reciclado frente a la abrasión e impacto. Este comportamiento garantiza la durabilidad del material bajo cargas repetidas y lo posiciona como un sustituto viable de agregados pétreos naturales.

En conjunto, los resultados de estas pruebas complementarias reafirman la calidad técnica del material REURBA, demostrando que posee las propiedades físicas y mecánicas necesarias para su aplicación en bases de pavimentos, con un desempeño comparable al de materiales vírgenes y ventajas ambientales significativas.

El CBR del material reciclado, mostrado en la Cuadro 7, superó el umbral mínimo del 80 %, lo que lo posiciona como apto para bases sometidas a tráfico pesado. Este

comportamiento fue superior al observado en el banco AGC y más consistente que en el banco La Luz. La Figura 9. evidenció que la resistencia máxima se alcanzó alrededor del 8 % de humedad, valor inferior al óptimo determinado por el Proctor (≈ 14 % en la Figura 2). Este hallazgo resulta relevante en términos de sustentabilidad, ya que implica la posibilidad de reducir el consumo de agua durante la compactación sin comprometer la capacidad de soporte, lo que representa un beneficio ambiental y económico directo.

Se observó que la resistencia aumentó conforme se aproximó la humedad al valor óptimo y disminuyó de forma notable al superarlo, lo que demuestra la sensibilidad del material frente a la variación hídrica. Este comportamiento se asocia con la microestructura del concreto reciclado, que tiende a absorber más agua en sus poros residuales, generando cambios en la cohesión y densidad aparente.

Desde la perspectiva de gestión de residuos, el empleo de agregados reciclados disminuye la necesidad de extraer materiales vírgenes, reduciendo con ello los impactos ambientales asociados a la explotación de bancos de préstamo y a la disposición en vertederos [4]. En este sentido, la incorporación de RCD en infraestructura vial se alinea con los principios de la economía circular, ya que reintegra materiales previamente desechados en procesos productivos, prolongando su ciclo de vida y reduciendo la huella de carbono de los proyectos [5].

Los resultados obtenidos son consistentes con estudios previos, como los de Silva et al. (2014) y Tam et al. (2018), quienes reportaron CBR superiores al 70 % en agregados reciclados de concreto. Esto respalda la veracidad de los resultados obtenidos y confirma la equivalencia del material REURBA con agregados naturales en términos de desempeño mecánico.

En conjunto, los resultados técnicos y las implicaciones ambientales respaldan la hipótesis de que el uso de residuos de construcción reciclados no solo es viable, sino que constituye una alternativa sustentable para bases hidráulicas en pavimentos, con potencial para su implementación a gran escala en proyectos viales.

5. Conclusión

- El material reciclado del banco REURBA presentó una curva granulométrica bien graduada, bajo índice de plasticidad y valores de CBR superiores al 80 %, cumpliendo con la norma N-CMT-4-02-002/22 para bases hidráulicas de pavimentos de tráfico pesado.

- El material reciclado REURBA presentó índices de lajeo (38.79 %) y alargamiento (10.93 %) dentro de los límites permitidos, confirmando una geometría de partículas adecuada para su estabilidad estructural.
- Los valores de equivalente de arena (64 % antes y 46 % después de compactar) se mantuvieron por encima del mínimo normativo, indicando un contenido de finos aceptable y una buena limpieza del material.
- La permeabilidad promedio de 5.6×10^{-3} cm/s clasificó al material como altamente drenante, lo cual es favorable para bases hidráulicas, siempre que se combine con un sistema de control de filtraciones.
- La pérdida por abrasión Los Ángeles del 27.47 % cumplió con los criterios de durabilidad, asegurando resistencia al desgaste durante la vida útil del pavimento.
- En conjunto, estas propiedades confirman la viabilidad técnica del material reciclado como base hidráulica, manteniendo la resistencia, estabilidad y durabilidad exigidas por las normas.
- La humedad que maximizó la resistencia (≈ 8 %) fue menor a la humedad óptima Proctor (≈ 14 %), lo que representa una oportunidad de ahorro de agua en campo sin comprometer la capacidad de soporte.
- En comparación con materiales vírgenes, el material reciclado mostró un desempeño técnico equivalente o superior, con la ventaja adicional de contribuir a la reducción de la extracción de recursos naturales y la disposición de residuos en vertederos.
- El uso de residuos de construcción como base de pavimentos constituye una alternativa sustentable, viable técnica y económicamente, alineada con los objetivos de la Agenda 2030 y con el modelo de economía circular en el sector de la construcción.

Fuentes de financiamiento

La presente investigación no recibió financiamiento específico de organismos de investigación ni de instituciones privadas. Sin embargo, los bancos de materiales vírgenes y el banco de reciclaje REURBA proporcionaron las muestras de material sin costo alguno, lo que permitió la realización de las pruebas de laboratorio. Adicionalmente, el autor contó con apoyo económico del Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías (CONACYT) mediante beca para estudios de maestría.

Agradecimientos

El autor agradece a los bancos de materiales vírgenes y al banco REURBA por la disposición de muestras para el desarrollo de la investigación. Asimismo, se reconoce al CONACYT por el otorgamiento de la beca que permitió llevar a cabo los estudios de posgrado.

Conflictos de interés

El autor declara que no existe ningún conflicto de interés relacionado con el desarrollo o los resultados de esta investigación.

Abreviaturas

Las siguientes abreviaturas se utilizan en este manuscrito:

RCD: Residuos de Construcción y Demolición

CBR: California Bearing Ratio

SUCS: Sistema Unificado de Clasificación de Suelos

SCT: Secretaría de Comunicaciones y Transportes

ASTM: American Society for Testing and Materials

REURBA: Banco de Residuos Urbanos de la Construcción (Querétaro)

6. Referencias bibliográficas

- [1] Secretaría de Desarrollo Sustentable del Estado de Querétaro, Norma Técnica Ambiental Estatal para el manejo de residuos de la construcción y demolición, Querétaro, México, 2018.
- [2] Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT), Norma N-CMT-4-02-002/22. Materiales para subbases y bases hidráulicas, México, 2022.
- [3] C. S. Poon, S. C. Kou, and L. Lam, "Use of recycled aggregates in molded concrete blocks," *Construction and Building Materials*, vol. 16, no. 5, pp. 281–289, 2002.
- [4] R. V. Silva, J. de Brito, and R. K. Dhir, "Properties and composition of recycled aggregates from construction and demolition waste suitable for concrete production," *Construction and Building Materials*, vol. 65, pp. 201–217, 2014.
- [5] V. W. Y. Tam, M. Soomro, and A. C. J. Evangelista, "A review of recycled aggregate in concrete applications (2000–2017)," *Construction and Building Materials*, vol. 172, pp. 272–292, 2018.
- [6] Naciones Unidas, Transformar nuestro mundo: la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible, Asamblea General de la ONU, 2015.

Influencia de la rugosidad del terreno en la presión de viento sobre cubiertas de arco circular

Influence of terrain roughness on wind pressure on circular arched roofs.

Maldonado-Fajardo, Misael

*Afiliación: Universidad Autónoma de Querétaro, Facultad de Ingeniería**

Santiago de Querétaro, Querétaro, México

mmaldonado40@alumnos.uaq.mx; ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-4217-8704>

Resumen: Este estudio investigó la influencia de la rugosidad del terreno en la distribución de presiones de viento sobre estructuras con cubierta de arco circular utilizando simulaciones numéricas de dinámica de fluidos computacional (CFD) validadas con datos experimentales de túnel de viento de un estudio de referencia. Se evaluaron los coeficientes de presión en la cubierta de las estructuras y se compararon de manera gráfica y cuantitativa. Los resultados mostraron que la rugosidad de terreno tuvo un impacto significativo en todos los casos estudiados, especialmente en la zona central y de sotavento donde los incrementos de la succión fueron mayores, en comparación con la zona de barlovento que se mantuvo con cambios de menor magnitud. Además, se encontró que la diferencia se vuelve más relevante para las geometrías con cubiertas de curvatura suave, donde las succiones incrementan hasta un 52 % en los terrenos de mayor rugosidad en comparación con los más lisos. Se concluyó que tanto la geometría como las características del terreno tienen un impacto importante en la distribución y magnitud de los coeficientes de presión y los efectos que generan deben ser considerados y analizados durante el diseño de estas estructuras.

Palabras clave: Viento; Presión; Ingeniería estructural; Superficie rugosa; Dinámica de fluidos computacional

Abstract: This study investigated the influence of terrain roughness on the distribution of wind pressures on circular arch roof structures using computational fluid dynamics (CFD) numerical simulations validated with experimental wind tunnel data from a benchmark study. The pressure coefficients on the roof of the structures were evaluated and compared graphically and quantitatively. The results showed that terrain roughness had a significant impact in all the cases studied, especially in the central and leeward zone where the increases in suction were greater, compared to the windward zone which remained with changes of lesser magnitude. In addition, it was found that the difference becomes more relevant for geometries with smooth curvature decks, where the suctions increase up to 52 % in the rougher terrains compared to the smoother ones. It was concluded that both the geometry and the characteristics of the terrain have an important impact on the distribution and magnitude of the pressure coefficients and the effects they generate should be considered and analyzed during the design of these structures.

Keywords: Wind; Pressure; Structural Engineering; Rough Surface; Computational Fluid Dynamics

1. Introducción

La estimación de cargas por la influencia del viento en edificaciones juega un papel importante durante el diseño de los elementos estructurales que las componen, especialmente cuando se trata de construcciones ligeras como lo suelen ser las estructuras con cubierta de arco circular. Estas estructuras suelen tener aplicaciones generales gracias a su capacidad de cubrir grandes claros sin apoyos intermedios, usándose en

naves industriales, edificios deportivos, almacenes o hangares [1, 2].

La distribución de las presiones de viento sobre una edificación está altamente influenciada por varios factores como la geometría, ya que el flujo del viento responde a la forma de la estructura; y la rugosidad del terreno, que interrumpe los vórtices a gran escala provocando distorsiones en la presión del viento [3]. Para el diseño de estas estructuras, los códigos y estándares

[4, 5, 6] establecen metodologías simplificadas que trabajan con coeficientes de presión, estableciendo la distribución de las presiones y succiones en las diferentes caras de las estructuras basándose en la geometría de la estructura. Asimismo, establecen factores que amplifican la magnitud de las presiones como el de topografía local o el factor que toma en cuenta las características de exposición local basado en la altura de la edificación y la rugosidad del terreno. Sin embargo, estos factores únicamente amplifican la magnitud de las presiones sin tomar en cuenta la alteración en las distribuciones que pueden ocurrir.

La rugosidad del terreno resulta especialmente importante en la estimación de las cargas por viento. Se ha observado que el perfil de velocidad del viento sufre modificaciones debido a las características del terreno, donde terrenos en la categoría de rugosos (por ejemplo, zonas urbanas) disminuyen la velocidad del viento cerca del suelo y aumentan la intensidad de turbulencia, afectando la magnitud y distribución de las presiones sobre las estructuras [7, 8]. Además, se ha observado que la influencia de la rugosidad del terreno es más pronunciada en los edificios de poca altura situados cerca de la superficie del suelo, ya que están expuestos a una mayor turbulencia [9].

Se han realizado estudios que exploran el efecto de la rugosidad del terreno en las presiones de viento en las caras de las estructuras. Por ejemplo, Sun et al. [10] realizaron estudios en túnel de viento de estructuras de membranas soportadas por arcos ovalados, discutiendo la influencia de la relación de altura respecto al claro, dirección del viento y la rugosidad de terreno en la distribución de la presión media, fluctuante y pico de los coeficientes de presión de viento. En este estudio se consideraron tres tipos de terrenos: a) liso, sin obstáculos significativos; b) rugoso, con obstáculos que asemejan densa vegetación o zonas urbanas; c) flujo en túnel de viento vacío, asemejando condiciones de un flujo completamente laminar. Los resultados del estudio mostraron que en terreno rugoso los empujes y succiones disminuyeron significativamente en comparación con los terrenos lisos, encontrando valores de -1.4 en la zona sotavento en terrenos lisos, mientras que en terrenos rugosos se obtuvieron valores de -0.8 .

En otro estudio del 2024 [9], estudió cómo afectan las características del terreno en las presiones media, fluctuante y pico en edificios de baja altura. Se evaluaron 50 diferentes morfologías de terrenos, ca-

tegorizándolas en cuatro tipos de exposición conforme estándares internacionales [4, 11, 5], donde dicha categorización se estableció en relación a la longitud de rugosidad de superficie (z_0). En el experimento se encontró que en los terrenos más rugosos la magnitud de la presión media incrementa hasta un 20 % en comparación con terrenos más lisos, encontrando también un incremento en la turbulencia del viento con valores más grandes de z_0 .

En un estudio del 2018 [12], se observó la influencia de la turbulencia generada por la rugosidad del terreno en las presiones media y fluctuante en edificios de baja altura. Mediante experimentos en túnel de viento se observó que la desviación estándar de las presiones aumentó significativamente en terrenos rugosos, obteniendo valores al rededor de 0.8 en comparación con terrenos más lisos con solamente 0.25, demostrando un aumento en la fluctuación de la presión. Además se encontró un aumento en los coeficientes de presión pico de succión para los terrenos más rugosos.

Abdi y Bitsuamlak [13] exploraron cómo las condiciones de frontera como el valor de z_0 y la intensidad de turbulencia alteran el perfil del flujo dentro del dominio. En el estudio proponen emplear bloques de rugosidad inspirado en la metodología de túnel de viento, logrando una representación más precisa de los efectos de rugosidad en el flujo del viento, pero aumentando significativamente el costo computacional. Sin embargo, también se observó que con una función de pared compatible se logra un buen desarrollo del perfil a lo largo del dominio, especialmente cerca de la capa límite.

Dentro de los estudios que han explorado en la influencia de la rugosidad del terreno en las presiones de estructuras de baja altura, se ha encontrado una tendencia de cambio en magnitud y distribución de las presiones de viento conforme cambia la composición del terreno en el entorno del objeto de estudio. Sin embargo, la mayor parte de los estudios se han realizado en estructuras regulares con aristas rectas, donde la tendencia de cambio suele ser de incremento con terrenos más rugosos, contrario a estudios en estructuras mas irregulares o curvas [10], ya que la respuesta del viento depende directamente de la geometría con la que se trabaja. Por esto, este estudio pretende explorar en la respuesta del viento en estructuras de arcotecho ante diferentes rugosidades de terreno, permitiendo conocer el efecto en las cargas por

viento que son de gran relevancia durante el diseño estructuras de este tipo de estructuras.

Este estudio tiene como objetivo principal evaluar cómo la rugosidad del terreno influye en la magnitud y distribución de las presiones de viento sobre las estructuras con cubiertas de arco circular mediante simulaciones numéricas de dinámica de fluidos computacional (CFD). La validación de las simulaciones CFD se realizó con resultados de túnel de viento de un estudio previo [14], mismo que ha sido utilizado para validar estudios subsecuentes [15, 16, 17].

El resto de este trabajo se organiza en tres principales secciones: 1) materiales y métodos; 2) resultados obtenidos, 3) discusiones; 4) conclusiones y recomendaciones.

2. Materiales y métodos

Para el desarrollo de esta investigación se siguió una metodología establecida en cuatro pasos: 1) Validación de configuración de simulaciones de dinámica de fluidos computacional (CFD), 2) Configuración del modelo CFD y, 3) Modelación de los diferentes casos de estudio.

2.1. Validación de modelo numérico

En este estudio se evaluó la influencia de la rugosidad de terreno en la distribución y magnitud de las presiones de viento en tres casos diferentes de estructuras cerradas con cubierta de arco circular, como la que se muestra en la Fig. 1, donde B es el largo, H es la altura total, h es la altura de muro y D es la longitud del claro. Los tres casos utilizados en este estudio, se basaron en un estudio previo [14], donde se investigó la influencia del número de Reynolds (Re) en la distribución de la presión. Estos casos corresponden con las relaciones de altura de cubierta entre claro libre $R/D = 1/2, 1/3$ y $1/6$, cuyas dimensiones a escala real corresponden con las que se muestran en la Tabla 1.

Para replicar el comportamiento del fluido del estudio en túnel de viento, se hizo uso de la condición de similitud de Reynolds [18], bajo un $Re = 2,28 \times 10^5$ que corresponde con una velocidad de 20 m/s a una escala de longitud de 1:100. Para el modelo numérico CFD se utilizó una escala real, cuya velocidad corresponde a 0.20 m/s de acuerdo con la condición de similitud de Reynolds, descrita en la ecuación (1).

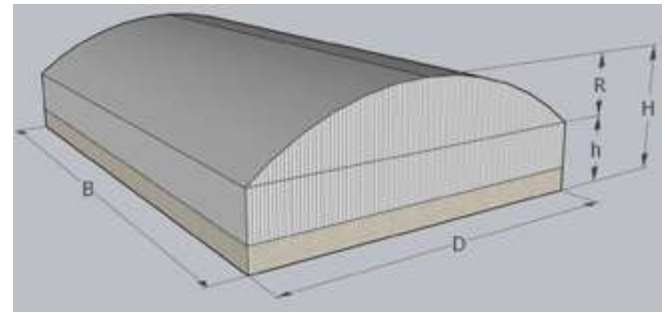


Figura 1: Representación geométrica de una estructura con cubierta de arco circular.

Tabla 1: Configuraciones geométricas utilizadas en las simulaciones CFD para replicar el estudio en túnel de viento de referencia [14].

Geom.	D	R	h	H	R/D	B/D
	Claro (m)	Altura de cubierta (m)	Altura de muro (m)	Altura total (m)	Alto-ancho	Largo-ancho
G_1	60	30	6	36	1/2	1
G_2	60	20	6	26	1/3	1
G_3	60	10	6	16	1/6	1

$$\frac{Re_p}{Re_m} = \frac{\left(\frac{\rho v y}{\mu}\right)_p}{\left(\frac{\rho v y}{\mu}\right)_m} = 1 \quad (1)$$

Donde los subíndices p representan el prototipo a escala real y los subíndices m el modelo escalado. El resto de variables son la densidad del aire (ρ), la velocidad del fluido (v), la viscosidad dinámica (μ), y la longitud (y), donde ρ y μ son propiedades del fluido que no cambian para el prototipo y el modelo.

Para poder comparar los resultados del estudio de referencia, en el cual los resultados se mostraron como coeficientes de presión (C_p), los resultados de la simulación CFD también se obtuvieron en C_p adimensionales. Para el cálculo de C_p obtenidas de las simulaciones se utilizó la ecuación (2).

$$C_p = \frac{p - p_{ref}}{0,5 \rho U_{ref}^2} \quad (2)$$

Donde p es la presión local, p_{ref} la presión de referencia del flujo libre (generalmente presión atmosférica) y U_{ref} es la velocidad de referencia.

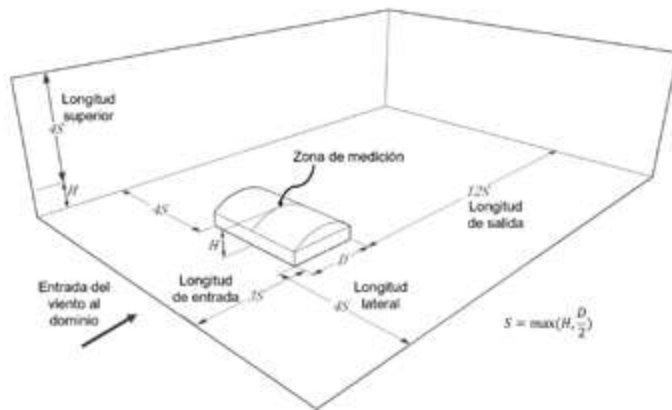


Figura 2: Tamaño del dominio utilizado en este estudio.

2.2. Modelo numérico

La primera parte de este trabajo consistió en establecer que la configuración de las simulaciones de dinámica de fluidos computacional (CFD) lleven a resultados similares a los obtenidos en el estudio de referencia en túnel de viento [14]. La obtención de dicha configuración se obtuvo mediante una exhaustiva exploración y análisis de sensibilidad desarrollada por los autores, trabajo que está en proceso de publicación a la fecha de escrito este trabajo. En dicho trabajo, se estableció tamaño de dominio, resolución de mallado y modelo de turbulencia que mejores resultados proporcionan a este tipo de estructuras.

El tamaño del dominio se seleccionó basado en las dimensiones de la estructura, tal como se muestra en la Fig. 2. La densidad del mallado también se basó en las dimensiones de la estructura, donde la zona más fina se configuró bajo un tamaño de $0,0125W$, donde la variable W se definió como el promedio de H y $D/2$, alcanzando un total de elementos de aproximadamente 1.35 millones de celdas para el caso de la geometría G_1. El tipo de elemento de mallado utilizado fue el poli-hexaédrico, configuración que combina elementos poliédricos y hexaédricos conforme recomendaciones de estudios previos [19]. Asimismo, se seleccionó el modelo de turbulencia $k - \epsilon$ Realizable, que mostró una mejor precisión y robustez en el cálculo de presiones en estructuras con arcotechos.

Para este estudio se ha realizado un análisis en estado estacionario, basado en el algoritmo SIMPLEC (Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations - Consistent) que es una mejora del algoritmo SIMPLE, ofreciendo mayor velocidad de convergencia [20].

Tabla 2: Características de la simulación numérica y valores constantes de las condiciones de frontera.

Parámetro de entrada	Valor	Unidad
Algoritmo numérico	SIMPLEC	-
Discretización	Segundo orden	-
Aceleración gravitatoria	9.81	m/s^2
Densidad del aire	1.225	kg/m^3
Velocidad del viento de referencia	0.20	m/s
Altura de referencia	6	m
Longitud de la rugosidad de superficial	Variable	m
Viscosidad del aire	$1,789 \times 10^{-5}$	kg/ms

Además, se utilizó discretización de segundo orden para mejorar la precisión. [21]. Se estableció un criterio de convergencia de 1×10^{-4} , siguiendo las recomendaciones de [22]. Los valores de las constantes de entrada se resumen en la Tabla 2. En este tipo de análisis, la ecuación de conservación de la energía no se incluye en el proceso de solución, ya que su influencia en la predicción de la presión del viento es insignificante [23].

2.3. Diseño experimental

El estudio se condujo bajo las tres geometrías validadas en la sección anterior. Para cada caso se realizó una evaluación bajo cuatro diferentes tipos de terreno, consistentes con las categorías de terreno mostradas en los códigos y manuales ASCE-7 y CFE-2020 [4, 6]. Dichas rugosidades de terreno se caracterizaron mediante la longitud de rugosidad z_0 , cuyo valor depende de las características de terreno y fue asignado para las cuatro categorías según recomendaciones de estudios previos [24, 9, 13]. Los valores de z_0 según la categoría de terreno, se muestra en la Tabla 3.

La altura de rugosidad del terreno influye directamente en la velocidad del viento [9], comúnmente descrita mediante la función logarítmica de la ecuación (3). Este perfil describe el cambio en la velocidad respecto a la altura, y se ve alterado por el valor de z_0 , generando perfiles de viento con alta turbulencia en terrenos rugosos con valores altos de z_0 .

$$U(y) = \frac{u^*}{K} \ln \left(\frac{z + z_0}{z_0} \right). \quad (3)$$

Donde U_{ref} es la velocidad del viento a la altura

Tabla 3: Clasificación de terrenos y valores de rugosidad (z_0) utilizados en el estudio.

Categ.	Descripción	Ejemplos de Terreno	z_0 (m)
1	Terreno abierto prácticamente plano	Campo abierto, superficie marina	0.0002
2	Terreno plano con pocas obstrucciones	Campos agrícolas, pastizales, zonas rurales	0.03
3	Terreno cubierto por numerosas obstrucciones	Suburbios con edificios bajos y vegetación dispersa	0.25
4	Terreno con numerosas obstrucciones largas y altas	Áreas urbanas densas con edificios altos	1.0

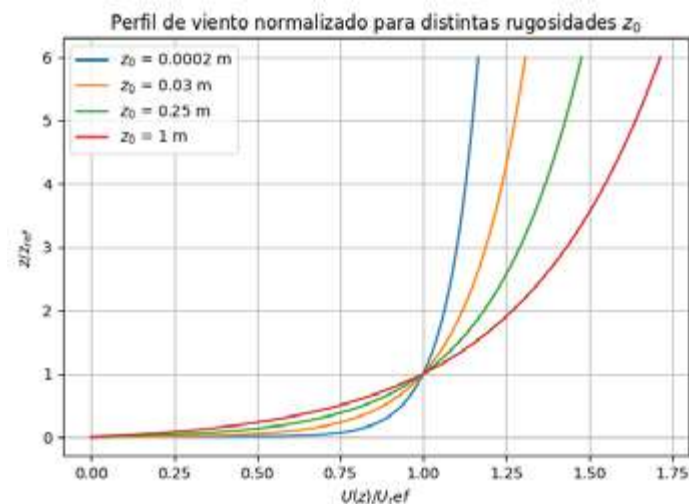


Figura 3: Perfiles de viento calculados con la ecuación 3 para las diferentes rugosidades de terreno por evaluar.

de referencia z_{ref} , u^* la velocidad de fricción y K la constante de Von Karman igual a 0.41. Derivado de esta función y de las rugosidades propuestas para realizar las evaluaciones de este estudio, se obtienen los diferentes perfiles de viento necesarios para establecer las condiciones de frontera en el modelo numérico CFD. Dichos perfiles se muestran en la Fig. 3.

3. Resultados

3.1. Validación de modelo numérico

Con la configuración establecida en la sección anterior se obtuvieron presiones en la cubierta y se evaluaron contra los resultados del experimento en túnel de viento del estudio de referencia [14]. En la Fig. 4 se muestra la distribución de presión en el centro de la estructura para tres diferentes alturas. Se puede observar de manera visual que tienen una buena concordancia en cuanto a distribución y magnitud. Asimismo, se incluyeron métricas estadísticas como el coeficiente de correlación R^2 y el error relativo residual (RSR) para evidenciar de manera cuantitativa la similitud entre las presiones calculadas por CFD y las mediciones experimentales en túnel de viento.

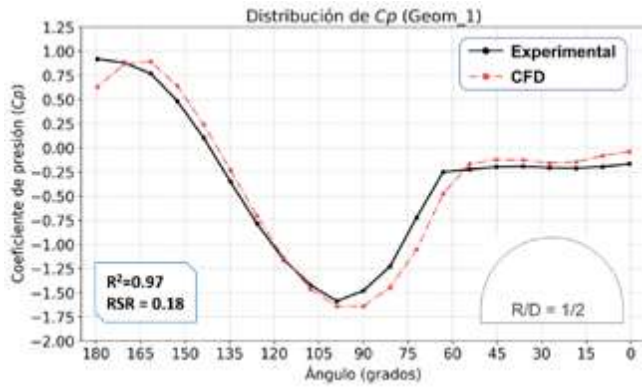
Los índices R^2 y RSR indican una excelente concordancia entre las simulaciones CFD y las mediciones experimentales en las geometrías G_1 y G_2 con correlaciones cercanas a 1 y errores relativos muy bajos. Por otro lado, la tercera geometría muestra una R^2 de

0.82, reflejando una dispersión más alta de los valores esperados. De manera general, el modelo CFD reproduce con una buena aproximación la distribución y magnitud de las presiones y succiones en estos ejemplos de estructuras de arcotechos, validando su uso para analizar los diferentes tipos de rugosidad de terreno.

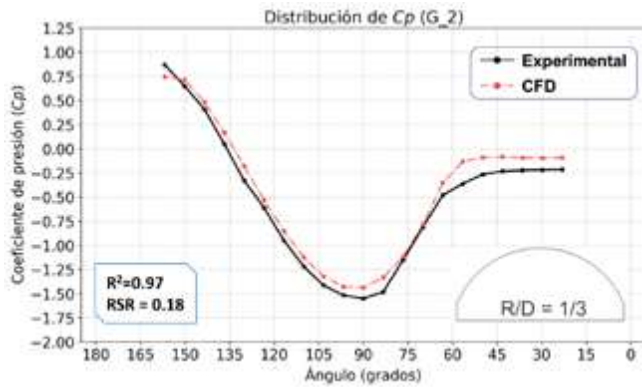
3.2. Evaluación de las rugosidades

Bajo la configuración de la simulación numérica validada en la sección anterior, se desarrollaron simulaciones a las tres geometrías bajo los cuatro perfiles de viento mostrados en la Fig. 3. Como resultados de la simulación CFD se obtienen presiones en el dominio, donde la superficie de la cubierta es la más relevante en este estudio. En la Fig. 5, se pueden observar mapas de contorno de C_p obtenidos de las simulaciones CFD para la geometría G_1, en ella se puede observar una simetría en la distribución de las presiones en el eje B, donde el centro muestra los valores más críticos en ambos casos. También es notable una diferencia en la ubicación de los coeficientes negativos máximos que indican el punto de succión máxima, mostrando un ligero desplazamiento en la dirección del flujo.

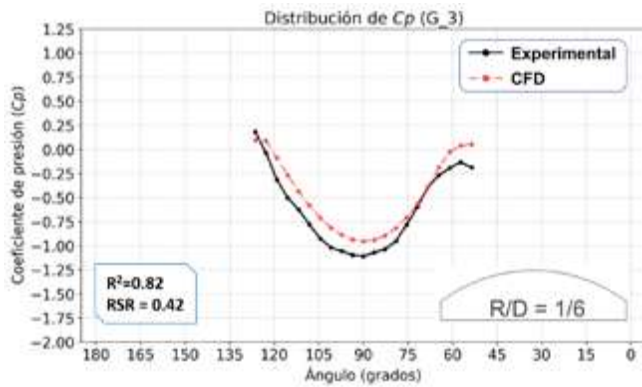
Para realizar una comparación más detallada en el cambio en la distribución y magnitudes se graficaron los coeficientes de presión a lo largo de la cubierta en la parte central de la estructura, esto se muestra en la Fig. 6. En la gráfica se puede apreciar un notable cambio entre las lecturas para las diferentes rugosi-



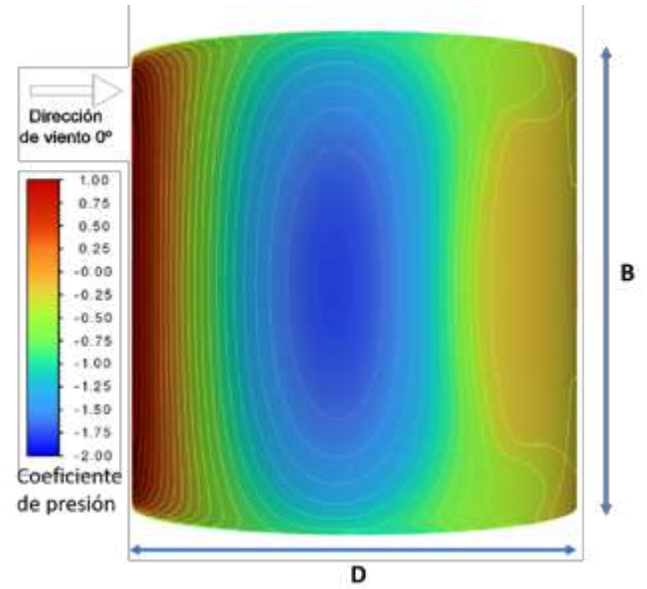
(a)



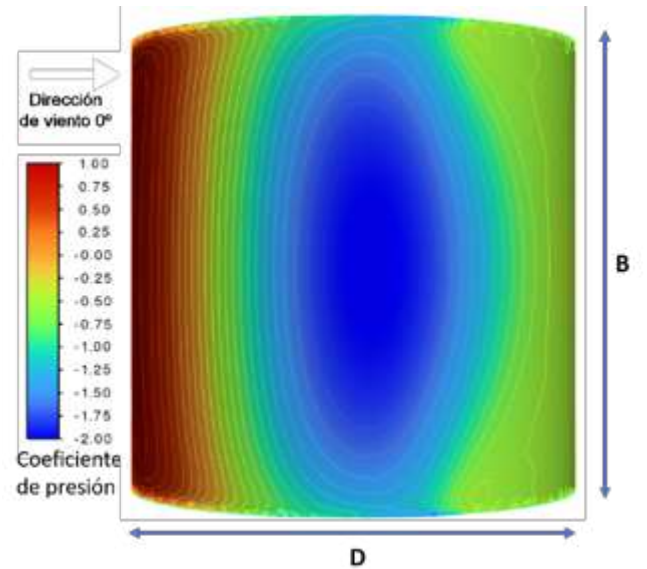
(b)



(c)



(a)



(b)

Figura 5: Mapas de contorno de los valores de C_p calculados por CFD para la geometría G.1 con flujo perpendicular a la cumbrera: (a) Terreno liso ($z_0 = 0,0002m$), (b) Terreno rugoso ($z_0 = 1m$).

Figura 4: Comparación de valores de C_p calculados por CFD contra medidos experimentalmente en túnel de viento con flujo perpendicular a la cumbrera: (a) G.1, (b) G.2, (c) G.3.

Tabla 4: Valores máximo, mínimo y promedio de C_p en el eje central de la cubierta por geometría y rugosidad z_0 .

Caso	z_0	Máximo	Mínimo	Promedio
G.1	0.0002	0.89	-1.64	-0.35
	0.03	0.88	-1.82	-0.45
	0.25	0.82	-1.87	-0.49
	1	0.89	-1.90	-0.50
G.2	0.0002	0.75	-1.44	-0.43
	0.03	0.70	-1.55	-0.50
	0.25	0.69	-1.70	-0.57
	1	0.75	-1.87	-0.64
G.3	0.0002	0.10	-0.95	-0.47
	0.03	0.11	-1.13	-0.58
	0.25	0.17	-1.44	-0.75
	1	0.28	-1.39	-0.72

dades. En los tres casos es notable un cambio en la magnitud de los coeficientes junto con una ligera modificación en la distribución. En las geometrías 1 y 2 la distribución muestra un ligero desfase en dirección al viento, así como un aumento de la succión máxima en la cumbrera conforme la rugosidad aumenta. En la geometría 3 la diferencia es visiblemente más grande en las succiones de la cumbrera y la zona sotavento, mientras que la zona barlovento se mantiene sin cambios significativos.

En la Tabla 4 se presentan los valores máximo, mínimo y promedio en de los C_p para los diferentes tipos de rugosidades evaluados. En el caso de la primera geometría el valor máximo positivo, que representa un empuje, se mantiene sin cambios significativos, contrario al mínimo que representa la succión máxima, que muestra incremento conforme el terreno es más rugoso, con una diferencia de 0.26. La segunda geometría muestra un comportamiento similar, con un incremento máximo de 0.43 en la succión para el caso de más rugosidad. Finalmente el tercer caso mostró cambios más grandes, con incrementos de 0.18 y 0.49 de empuje y succión respectivamente, siendo esta la geometría con mayor variación. La tabla también proporciona el promedio de C_p , mostrando un aumento en la succión a medida que rugosidad incrementa.

Asimismo, la Tabla 5 muestra el promedio de las lecturas de C_p obtenidas pero distribuido por zonas, semejantes a las descritas en el manual CFE-2020 [6].

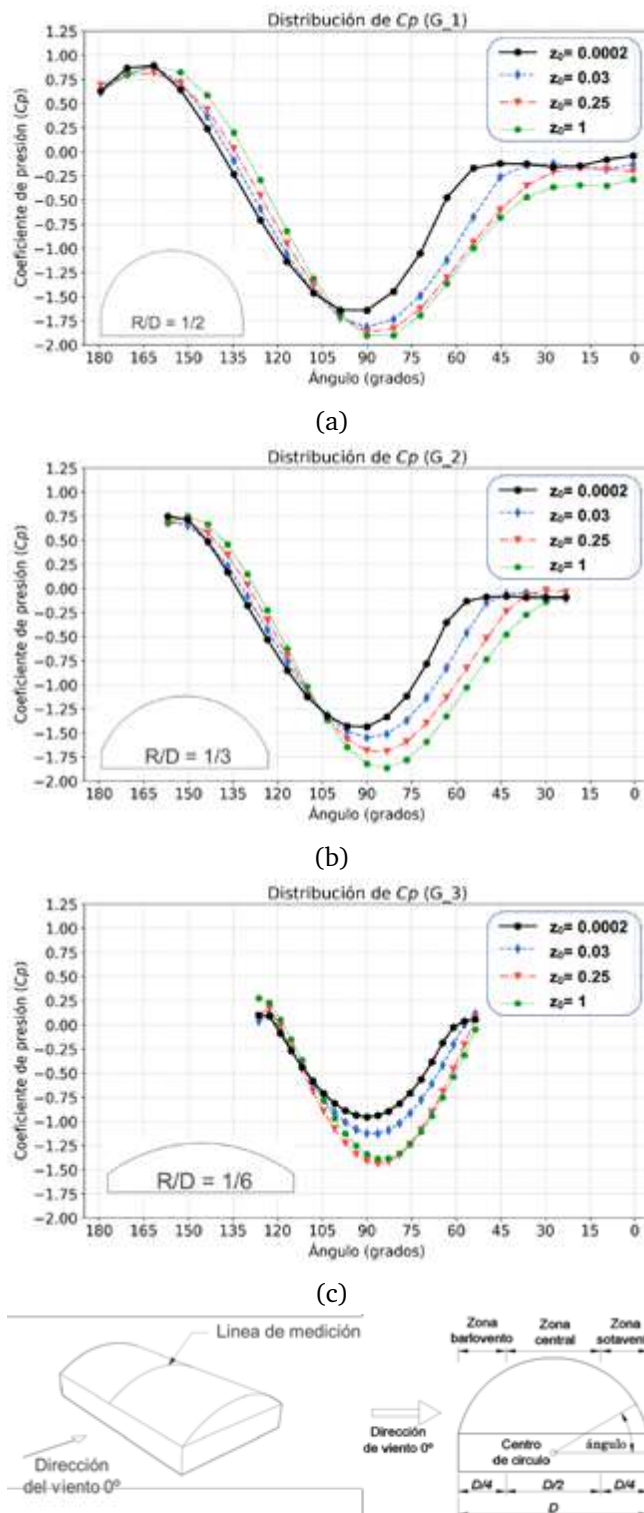


Figura 6: Comparación de valores de C_p calculados por CFD para distintas rugosidades de terreno con flujo perpendicular a la cumbrera: (a) G.1, (b) G.2, (c) G.3.

Tabla 5: Valores promedio de C_p dividido por zonas de la cubierta para las diferentes geometrías y rugosidades z_0 .

Caso	z_0	Barlovento	Central	Sotavento
G.1	0.0002	0.33	-1.27	-0.12
	0.03	0.39	-1.49	-0.24
	0.25	0.43	-1.53	-0.38
	1	0.52	-1.53	-0.50
G.2	0.0002	0.23	-1.08	-0.10
	0.03	0.26	-1.23	-0.15
	0.25	0.33	-1.35	-0.29
	1	0.41	-1.45	-0.46
G.3	0.0002	-0.20	-0.85	-0.18
	0.03	-0.20	-1.01	-0.32
	0.25	-0.19	-1.27	-0.55
	1	-0.09	-1.20	-0.62

En la geometría G.1, la zona barlovento aumenta hasta 0.19 puntos conforme la rugosidad crece. La zona central tiene un incremento súbito a partir de la segunda rugosidad para mantenerse relativamente estable en las rugosidades más altas. Respecto a la zona sotavento, presenta un incremento similar conforme la rugosidad aumenta, aumentando aproximadamente el valor inicial hasta llegar a más de cuatro veces la succión del terreno más liso.

La segunda geometría presenta un comportamiento similar, con un aumento de empuje de 0.18 en la zona de barlovento, así como un incremento máximo de 0.37 en la succión de la zona central, mientras que en sotavento el incremento fue de 0.36. La última geometría es el único caso que presenta succiones en la zona barlovento, presentando valores que permanecen constantes excepto en el caso con mayor rugosidad, donde la succión disminuye de -0.19 a -0.09. La zona central presenta un incremento similar al de los casos anteriores, sin embargo el caso de mayor succión fue tercera rugosidad con un valor de -1.27, mientras que la zona sotavento si presentó su valor máximo en la cuarta rugosidad, donde incrementó de 0.44. De forma general, todas las geometrías tuvieron un incremento general de la succión en la zona central y sotavento, así como un ligero aumento de presión en la zona barlovento.

4. Discusión

4.1. Validación del modelo CFD

La validación del modelo numérico CFD se realizó comparando los coeficientes de presión C_p obtenidos usando el modelo de turbulencia $k - \epsilon$ Realizable con los datos experimentales del estudio de referencia [14] para tres geometrías usadas en el estudio con relaciones $R/D = 1/2, 1/3$ y $1/6$. En todos los casos la comparación se realizó sobre 21 puntos de medición distribuidos a lo largo de la cubierta, siguiendo la cantidad y ubicación de puntos utilizados en el estudio de referencia.

El tamaño del dominio seleccionado no generó alteraciones en el flujo debido a la longitud de entrada o salida del dominio. Respecto a las distancias laterales, se establecieron con un radio de bloqueo de 3,45 %, menor al límite establecido de 5 % en las recomendaciones de otros estudios [25, 23, 19].

Bajo la configuración seleccionada, los resultados mostraron una alta concordancia entre el modelo CFD y los datos experimentales en las geometrías 1 y 2, obteniendo métricas de $R^2 = 0,97$ y $RSR = 0,18$. Indicando que el modelo de turbulencia Realizable reproduce adecuadamente la distribución y magnitud de las presiones, asegurando que los análisis con diferentes rugosidades pueden presentar resultados suficientemente realistas.

En la tercera geometría se obtuvieron métricas que indican un menor desempeño. Se obtuvo en los resultados CFD una ligera subestimación de la succión respecto al túnel de viento. Esto puede atribuirse al tipo de curvatura más abierta que genera flujos con zonas de separación más extensas, donde los modelos estacionaron y la simplificación de los modelos $k - \epsilon$ de las fluctuaciones generan subestimaciones en las succiones [19].

De manera general, los resultados obtenidos de la comparación proporcionan una alta correlación del CFD con datos experimentales, así como las distribuciones semejantes. Esto valida su uso para desarrollar análisis con algunas variaciones como lo es el estudio de diferentes rugosidades de terreno.

4.2. Efecto de rugosidad del terreno en los C_p

Los resultados muestran que la rugosidad del terreno influye de manera importante en la magnitud de la succión, principalmente en las zona central y

sotavento. Mientras que en la zona de barlovento se observó un ligero incremento en la presión positiva. Esta tendencia coincide con lo descrito en los estudios [12, 9], donde la succión aumentó de manera significativa con el incremento de la rugosidad. También se encontró que los resultados del estudio de [10] mostró tendencias contrarias a este estudio, posiblemente debido a las diferencias en la geometría estudiada, ya que en el presente estudio se analizaron estructuras con curvatura cóncava, mientras que en el otro estudio usaron estructuras con curvas ligeramente convexas. Asimismo, el análisis de los valores promedio de C_p presenta una tendencia general de aumento en la succión total de la cubierta con el incremento de los valores de z_0 .

Adicionalmente, se observó que la magnitud de los cambios producidos por las diferentes rugosidades depende de la relación R/D de la geometría que se evalúa. Una relación baja de R/D muestra incrementos más grandes en la succión, mientras que las relaciones más altas mostraron un aumento, aunque considerablemente menor entre más alta es la relación. Una posible explicación a este fenómeno es el efecto combinado de la curvatura del arco y turbulencia producida por la rugosidad, donde ambas favorecen al efecto de la separación del flujo y por lo tanto, al incremento de los efectos de succión.

Estos resultados destacan la importancia de considerar la rugosidad del terreno en el diseño estructural de arcotechos, especialmente cuando se trabaja con relaciones R/D bajas, ya que este factor genera cambios significativos en las presiones por viento que se traducen en posibles subestimaciones en las cargas para los elementos estructurales. Estos estudios pueden permitir un análisis y diseño más seguro de las estructuras, complementando las recomendaciones disponibles en los códigos y manuales, especialmente en zonas urbanas donde la densidad de obstrucciones se relaciona a una alta rugosidad y con esto mayor turbulencia y efectos de succiones en este tipo de estructuras.

5. Conclusión

El modelo numérico de dinámica de fluidos computacional (CFD) basado en el modelo de turbulencia $k - \epsilon$ Realizable demostró una precisión aceptable para reproducir los efectos de presiones debido al flujo de viento sobre estructuras cerradas con cubierta de arco circular en distintas geometrías. Con esto se

logró realizar una evaluación sobre la influencia de la rugosidad del terreno en las presiones de viento en la cubierta, destacando que las zonas más afectadas fueron la zona central y de sotavento, que aumentan en gran medida conforme el terreno se considera más rugoso. Este efecto se encontró más pronunciado conforme la curvatura de la cubierta se vuelve más suave. Los resultados encontrados proporcionan información relevante sobre el impacto del entorno en el comportamiento de las cargas por viento que actúan en las estructuras, y que sus efectos deben ser considerados durante el diseño estructural de los elementos, considerando los efectos locales y globales.

Dentro de las limitaciones de este estudio, se destaca el uso de un análisis estacionario y el número de rugosidades de terreno considerados, así como la naturaleza del mismo al ser considerado solo de tipo homogéneo. Se recomienda para futuros trabajos el uso de simulaciones transitorias para evaluar los efectos sobre los coeficientes de presión pico y fluctuantes. También se recomienda aumentar el número de geometrías, así como evaluar el efecto de heterogeneidad del terreno por medio de métodos como el modelado de bloques.

Agradecimientos

Se agradece a la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI) por la realización de este proyecto.

Conflictos de interés

“Los autores declaran que no existen conflictos de interés.”

Abreviaturas

Las siguientes abreviaturas se utilizan en este manuscrito:

B: Largo de estructura

CFD: Dinámica de Fluidos Computacional

C_p : Coeficiente de presión

D: Claro de cubierta

H: Altura total de la estructura

h: Altura de muro de la estructura

R: Altura de cubierta

6. Referencias bibliográficas

Referencias

- [1] J. Yao, M. Peng, J. Huang, Q. Zhang, and Y. Zhou, "Numerical simulation study on wind pressure coefficient of variable cross-section arched roof," *Results in Engineering*, vol. 21, p. 101844, Mar. 2024.
- [2] A. K. Jha, A. Sinha, and R. Raj, "Effect of wind loads on low-rise pitched and circular arch roof structures: a comparative study based on numerical simulation," *cea*, vol. 10, pp. 1129–1141, May 2022.
- [3] Y. Chang, L. Zhao, Y. Liu, H. Liao, and Y. Ge, "Wind pressure characteristics of a short circular cylinder in supercritical regime using a novel force measurement method," *Physics of Fluids*, vol. 37, p. 035206, Mar. 2025.
- [4] A. S. of Civil Engineers (ASCE), *Minimum Design Loads and Associated Criteria for Buildings and Other Structures*. No. v.ASCE/SEI 7-22 in Standards Ser, Reston: American Society of Civil Engineers, 1st ed ed., 2021.
- [5] E. C. for Standardization (CEN), "EN 1991-1-4: Eurocode 1: Actions on structures - Part 1-4: General actions - Wind actions," 2020.
- [6] C. F. de Electricidad (CFE), "Manual de diseño de obras civiles: diseño por viento," 2020.
- [7] L.-S. An, N. Alinejad, and S. Jung, "Experimental study on the influence of terrain complexity on wind pressure characteristics of mid-rise buildings," *Engineering Structures*, vol. 321, p. 118907, Dec. 2024.
- [8] J. Singh and J. M. Alam, "Large-Eddy Simulation of Utility-Scale Wind Farm Sited over Complex Terrain," *Energies*, vol. 16, p. 5941, Jan. 2023. Publisher: Multidisciplinary Digital Publishing Institute.
- [9] L.-S. An and S. Jung, "Experimental investigation on influence of terrain complexity for wind pressure of low-rise building," *Journal of Building Engineering*, vol. 83, p. 108350, Apr. 2024.
- [10] X. Sun, K. Arjun, and Y. Wu, "Investigation on wind tunnel experiment of oval-shaped arch-supported membrane structures," *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, vol. 206, p. 104371, Nov. 2020.
- [11] N. R. C. of Canada (NRC), "National Building Code of Canada 2020," Mar. 2022.
- [12] P. L. Fernández-Cabán and F. J. Masters, "Effects of Freestream Turbulence on the Pressure Acting on a Low-Rise Building Roof in the Separated Flow Region," *Front. Built Environ.*, vol. 4, Apr. 2018. Publisher: Frontiers.
- [13] D. Abdi and G. Bitsuamlak, "Assessing the effect of roughness boundary conditions on simulating atmospheric boundary layer flow," in *Research-Gate*, 2012.
- [14] Y. Qiu, Y. Sun, Y. Wu, and Y. Tamura, "Modeling the mean wind loads on cylindrical roofs with consideration of the Reynolds number effect in uniform flow with low turbulence," *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, vol. 129, pp. 11–21, June 2014.
- [15] Y. Qiu, Y. Sun, Y. Wu, B. San, and Y. Tamura, "Surface roughness and Reynolds number effects on the aerodynamic forces and pressures acting on a semicylindrical roof in smooth flow," *Journal of Structural Engineering*, vol. 144, p. 04018140, Sept. 2018. Publisher: American Society of Civil Engineers.
- [16] B. San, C. Xu, and Y. Qiu, "Three-Dimensional Aerodynamic Optimization of Single-Layer Reticulated Cylindrical Roofs Subjected to Mean Wind Loads," *Advances in Civil Engineering*, vol. 2019, no. 1, p. 4156319, 2019. eprint: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1155/2019>.
- [17] Y. Sun, Y. Wu, Y. Qiu, and Y. Tamura, "Effects of free-stream turbulence and Reynolds number on the aerodynamic characteristics of a semicylindrical roof," *Journal of Structural Engineering*, vol. 141, p. 04014230, Sept. 2015. Publisher: American Society of Civil Engineers.
- [18] M. A. Vergara Sánchez, *Técnicas de modelación en hidráulica*. México: Alfaomega, 1993. OCLC: 40983902.

- [19] K. Wijesooriya, D. Mohotti, C.-K. Lee, and P. Mendis, "A technical review of computational fluid dynamics (CFD) applications on wind design of tall buildings and structures: Past, present and future," *Journal of Building Engineering*, vol. 74, p. 106828, Sept. 2023.
- [20] M. Zeng and W. Tao, "A comparison study of the convergence characteristics and robustness for four variants of SIMPLE-family at fine grids," *Engineering Computations*, vol. 20, pp. 320–340, May 2003.
- [21] P.-E. Bournet and T. Boulard, "Effect of ventilator configuration on the distributed climate of greenhouses: A review of experimental and CFD studies," *Computers and Electronics in Agriculture*, vol. 74, pp. 195–217, Nov. 2010.
- [22] J. M. F. Oro, *Técnicas numéricas en ingeniería de fluidos: Introducción a la dinámica de fluidos computacional (CFD) por el método de volúmenes finitos*. Reverte, Jan. 2012. Google-Books-ID: x9zeDwAAQBAJ.
- [23] R.-w. Kim, I.-b. Lee, and K.-s. Kwon, "Evaluation of wind pressure acting on multi-span greenhouses using CFD technique, Part 1: Development of the CFD model," *Biosystems Engineering*, vol. 164, pp. 235–256, Dec. 2017.
- [24] J. M. G. Díaz, "Cuantificación del perfil del viento hasta 100 m de altura desde la superficie y su incidencia en la climatología eólica," *Terra. Nueva Etapa*, vol. XXIX, no. 46, pp. 81–101, 2013. Publisher: Universidad Central de Venezuela.
- [25] F.-Q. Meng, B.-J. He, J. Zhu, D.-X. Zhao, A. Dar-ko, and Z.-Q. Zhao, "Sensitivity analysis of wind pressure coefficients on CAARC standard tall buildings in CFD simulations," *Journal of Building Engineering*, vol. 16, pp. 146–158, Mar. 2018.

O

Metodología para el análisis espacial: estrategias y tácticas de vida cotidiana para el proyecto arquitectónico

Methodology for spatial analysis: everyday life strategies and tactics for architectural design

Flores Montero, Jorge Andrés, Loredo Cansino, Reina.
Posgrado de Ingeniería, Doctorado en Innovación, Tecnología y Hábitat
Universidad Autónoma de Querétaro
Querétaro, México

jorge.andres.flores@uaq.edu.mx; (ORCID: [https://orcid.org/0009-0003-4719-5140])
reina.loredo@uaq.mx; (ORCID: [https://orcid.org/0000-0003-4190-6565])

Resumen: El presente trabajo consiste en una alternativa metodológica para el análisis del espacio desde una mirada transversal de la vida cotidiana, con el fin de enriquecer el entendimiento del mismo hacia la investigación proyectual arquitectónica mediante un enfoque crítico y situado. Esta propuesta se construye a partir del análisis crítico de cuatro referentes teóricos interdisciplinarios de ciencias como la filosofía, sociología, geografía y antropología que soportan el ejercicio metodológico presentado. Con base en lo anterior, se diseña una propuesta metodológica que articula tres escalas de análisis: macro, meso y micro. De esta manera, se presenta un ejercicio configurado en tres grandes momentos operacionales catalogados como: registro de información, análisis relacional e integración crítica. Como resultado, se obtiene un marco metodológico capaz de articular categorías conceptuales y observaciones empíricas del espacio, ofreciendo una herramienta de análisis flexible y adaptable a contextos diversos, siendo especialmente útil para entender la complejidad y divergencia en territorios del Sur Global.

Palabras clave: ARQ, Metodología, Análisis espacial, Estrategias y tácticas, Diseño arquitectónico, Sur Global.

Abstract: The present work proposes a methodological alternative for analysing space from a cross-sectional perspective of everyday life, with the aim of enriching our understanding of it in architectural design research through a critical and situated approach. The proposal is grounded in a critical analysis of four interdisciplinary theoretical references from sciences such as philosophy, sociology, geography, and anthropology that provide a foundation for this methodological exercise. In light of the aforementioned elements, the methodological proposal articulates three scales of analysis: macro, meso and micro. Furthermore, this exercise is presented as a series of three major operational moments, catalogued as follows: The processes of information recording, relational analysis and critical integration are of particular significance in this context. The result is a methodological framework capable of articulating conceptual categories and empirical observations of space, offering a flexible and adaptable tool for analysis in diverse contexts, which is particularly useful for understanding the complexity and divergence in territories of the Global South.

Keywords: ARQ, Methodology, Spatial analysis, Strategies and tactics, Architecture design, Global South.

1. Introducción

Tradicionalmente, los estudios sobre el espacio arquitectónico y urbano se han producido dentro de marcos y enfoques centrados especialmente en su dimensión material o técnica. Shields [1] señala que si bien, estos marcos son importantes para la disciplina, suelen privilegiar abstractas lógicas de diseño y la planificación territorial sobre los diversos modos en que los sujetos habitan, experimentan e incluso, transforman el

espacio de manera cotidiana. Como consecuencia, el concepto del espacio se suele entender simplemente como un objeto o soporte físico, en lugar de un proceso social en constante cambio y construcción.

Por consecuencia, en la actualidad diversas disciplinas y corrientes más allá del diseño y la arquitectura –como lo son la sociología, la antropología, la geografía crítica, entre otras– apuntan la necesidad de ampliar tal aproximación hacia una mirada sociocultural del espacio;

en otras palabras, considerar la incorporación de las prácticas sociales, la cultura y las dinámicas cotidianas como elementos clave que constituyen el espacio.

Por ejemplo, Shields [1] brinda una mirada sociológica y crítica acerca de la espacialización debido a que el autor considera los espacios como los productos de diversas interacciones culturales, procesos sociales y relaciones de poder; por consecuencia, el autor amplía el sentido espacial de la arquitectura y el urbanismo al considerarlos como fenómenos sociales y culturalmente situados.

Desde un enfoque antropológico y metodológico, Low [2] plantea la idea de que la etnografía del espacio y del lugar puede constituir una herramienta fundamental para observar cómo la cultura se espacializa y se articula con la vida cotidiana. Así, su propuesta permite registrar diversas prácticas, narrativas y experiencias de los individuos que construyen el sentido de los lugares; lo anterior puede revelar a su vez las dinámicas sociales que configuran una espacialidad que va más allá de lo físico y objetual.

Finalmente, desde las ciencias sociales y dentro del marco de la microescala, se encuentra el trabajo de Certeau [3] sobre el estudio de la cotidianidad y las microhistorias. En su obra el autor distingue entre las *Estrategias*, a las cuales define como las acciones y decisiones institucionales que delimitan, regulan y planifican el espacio, y las *Tácticas*, que corresponden a las apropiaciones creativas, disruptivas y a los usos cotidianos de los individuos para adaptarse, resignificar, transformar o resistirse a las estrategias. Así, esta perspectiva posibilita comprender que el habitar implica también los usos, resistencias, significados y prácticas de las personas; éstos usualmente desbordan los límites de las formas arquitectónicas y, además, no siempre se alinean con las intenciones de las instituciones, los proyectistas o con los marcos regulatorios.

Debido a lo anterior, se retoman los trabajos de Shields [1], Low [2] y Michel de Certeau [3] como herramientas teóricas sobre el estudio de la espacialización social, de la cultura y de las prácticas cotidianas; lo anterior para construir un marco conceptual que soporte el análisis del espacio bajo una mirada amplia y compleja que contemple las estrategias y tácticas de la vida cotidiana para posibilitar el entendimiento de este más allá de la dimensión física y objetual.

Cabe añadir que este trabajo está orientado hacia la reflexión del proyecto arquitectónico; por lo cual, durante su desarrollo se hizo evidente esclarecer la relación existente entre las formas en que se diseña el mundo, el espacio con las prácticas cotidianas y las estructuras

sociales en las que estas dinámicas se desarrollan. Por ello, se volvió necesario hacer referencia a la dimensión ontológica del diseño, a su papel en la configuración de las sociedades y el espacio mismo, recurriendo por consecuencia a la obra de Escobar [4].

En este sentido, Escobar [4] enfatiza que, especialmente en los contextos marcados por las lógicas capitalistas y desarrollistas del Sur Global, las decisiones de diseño, planificación y desarrollo no son neutrales, sino que obedecen a intereses de índole económica y política. Para el autor, estas lógicas (que afectan al diseño) estructuran el entramado social y territorial, determinando especialmente la forma en que se configura y diseña el espacio de ciudades, barrios y territorios rurales. Por consecuencia, esta planificación condiciona directamente la vida cotidiana de individuos y comunidades, lo que genera tensiones y discrepancias entre las estrategias institucionales y las prácticas creativas de los habitantes.

Es en este marco que, las tácticas cotidianas se posicionan como formas de resistencia y resignificación frente a espacios que, a menudo, están planificados para reproducir determinadas lógicas de poder y acumulación, en lugar de responder a las necesidades y saberes locales. De acuerdo con esto, resulta necesario cuestionar los marcos epistemológicos que históricamente han definido qué se entiende por espacio, diseño y desarrollo. Interrogar estas categorías implica situar la práctica proyectual dentro de sus condiciones históricas y políticas.

Así, reposicionar la centralidad de la vida cotidiana en las reflexiones y el análisis sobre el espacio resulta particularmente relevante en contextos del Sur Global; en esta región los modelos de desarrollo, las políticas urbanas y las dinámicas del mercado suelen entrar en conflicto con las prácticas locales. Entendiendo además que, aquí el Sur Global se asume como una posición epistémica y política, un espacio de enunciación y de resistencia, desde el cual es posible generar otras lecturas del espacio. En otras palabras, retomar la mirada de lo cotidiano permite problematizar las categorías tradicionales que son usualmente utilizadas para analizar el espacio urbano y arquitectónico; así, con ello, abrir la posibilidad de construir nuevas y alternativas categorías de estudio sensibles a las experiencias, prácticas y resistencias de quienes habitan el territorio.

Es así como, desde esta mirada ampliada y compleja del espacio, en este trabajo se presenta una propuesta metodológica para el análisis espacial en la cual se transversaliza la vida cotidiana mediante la observación y registro de las tensiones existentes entre las estrategias y tácticas en la forma en que plantea De Certeau [3]. Para realizar esto, en términos operacionales se retoma el

planteamiento de Halvorsen, Mançano y Torres [5]; dichos autores sugieren que para el estudio de los fenómenos sociales complejos, —como puede ser este caso—, es pertinente un análisis multidimensional y multiescalar.

Por ello, tanto para construir el marco conceptual como para constituir la propuesta metodológica, este estudio opera bajo tres escalas de trabajo. Éstas son la escala macro, meso y micro. De acuerdo a Terven Salinas y Vázquez Estrada [6], la primera tiene que ver con el propio sistema económico y político, las leyes que los estructuran, así como cánones y normativas que estructuran el diseño y planeación de los territorios. La segunda se refiere a todo lo representado por instituciones y actores, los cuales se encargan de ejecutar mediante proyectos y programas de intervención del espacio las decisiones parlamentarias. Finalmente, la tercera tiene que ver con las experiencias, narrativas e intervenciones locales por parte de los propios individuos y colectivos en el territorio. Además, cada una de estas escalas se encuentra interconectada, por lo que su estudio no debe ser lineal.

Cabe aclarar que diferentes elementos y actores partícipes del territorio y el espacio no mencionados anteriormente pueden ser estudiados de esta manera, incluyendo el medio natural, el tejido sociocultural, elementos construidos, entre otros. Por lo cual, esta forma de análisis debe tomarse sólo como una alternativa útil a este estudio, para estructurar e interconectar los diferentes niveles de acción que tienen las instituciones y actores sobre el territorio y el espacio.

2. Materiales y métodos

El diseño metodológico de este trabajo se basa en el análisis crítico de literatura proveniente de diferentes campos de las ciencias sociales y los estudios del espacio, elegida por su pertinencia y escala de aplicación. El propósito fue articular un marco metodológico e interpretativo que sirva de soporte para vincular la espacialización de la vida cotidiana con los procesos de diseño arquitectónico. Así como reconocer las mediaciones ontológicas, políticas y culturales que intervienen en dicha relación. Desde una mirada crítica y decolonial, la metodología no se plantea como una secuencia neutra de métodos, sino como una práctica situada que reconoce su propia implicación en las relaciones de poder que analiza. Esto significa asumir que toda observación espacial está medida por una posición geopolítica y cultural del autor y la autora.

De esta manera, se seleccionaron cuatro referentes. En primer lugar en el ámbito de la escala macro, Rob Shields

[1], cuya obra permitió entender la idea de espacialización como un proceso social y simbólico que estructura la experiencia del espacio; también se menciona a Arturo Escobar [4], quien aporta una crítica a las lógicas capitalistas y desarrollistas que configuran tanto el diseño del mundo como las formas en que se produce la vida cotidiana en contextos del Sur Global. En segundo lugar a nivel meso se considera a Setha Low [2], cuya propuesta de análisis etnográfico de la producción social del espacio y del espacio acuerpado resulta clave para captar las prácticas y usos cotidianos en su complejidad. Finalmente, a nivel de lo micro se recurre a De Certeau [3], cuya distinción entre estrategias y tácticas ofrece una herramienta para reconocer la tensión entre decisiones de poder y prácticas de los habitantes.

El análisis de estas perspectivas se realizó mediante la organización de conceptos en diferentes matrices, esto para identificar categorías comunes y no afines entre la literatura revisada y contrastar entre las diferentes aproximaciones conceptuales. Como resultado se construyó una propuesta metodológica de carácter cualitativo e interpretativo; ésta permite entender la vida cotidiana como un espacio de tensiones entre el diseño hegemónico y la planificación y las prácticas de resistencia de los individuos y comunidades. Así, se posibilita el que esta propuesta pueda ser replicada en diversos contextos del Sur Global.

3. Resultados y discusión

Como se menciona anteriormente, se realizó un análisis de la literatura seleccionada, el cual permitió construir una serie de matrices conceptuales que sintetizan los aportes de los autores revisados. De esta manera, dichas matrices constituyen por sí mismas un primer resultado de la propuesta metodológica; ya que a partir de este ejercicio analítico fue posible identificar categorías, convergencias y tensiones entre los autores y sus conceptos, así como ejes transversales que relacionan y fundamentan la propuesta de análisis espacial.

La primera matriz (Tabla 1) trabajada fue la de conceptos y categorías clave, la cual evidenció que cada autor aborda la relación que existe entre el espacio y la vida cotidiana desde diferentes niveles de análisis. Shields [1], por ejemplo, propone una mirada conceptual de la espacialización como un proceso simbólico y cultural. Por su parte, Escobar [4] añade una dimensión ontológica de la relación del diseño y el espacio, evidenciando cómo las lógicas capitalistas y desarrollistas configuran la manera en que se diseña el mundo. En otro sentido, Low [2] se centra en un enfoque empírico mediante conceptos como la producción social del espacio, la idea del espacio

encarnado y el trabajo etnográfico en campo. Y finalmente, De Certeau [3] aporta una perspectiva empírico-conceptual al abordar las discrepancias entre las

estrategias del poder y las tácticas de resistencia de los individuos espacializadas en la vida cotidiana.

Tabla 1. Matriz de análisis de principales conceptos abordados por diferentes autores

<i>Autor</i>	<i>Categorías Principales</i>	<i>Nivel de Análisis</i>	<i>Escala de Análisis</i>	<i>Aporte Principal</i>
Rob Shields [1]	Espacialización social, topologías culturales, producción simbólica del espacio.	Conceptual	Macro	Permite entender el espacio como producto de procesos sociales y simbólicos.
Arturo Escobar [4]	Ontología del diseño, lógicas capitalistas, mundos posibles (pluriversos), autonomía.	Ontológico	Macro	Problematiza cómo el diseño está atravesado por las estructuras hegemónicas y propone alternativas pluriversales.
Setha Low [2]	Producción social del espacio, etnografía espacial, prácticas corporales y su espacialización.	Empírico-metodológico	Meso y Micro	Ofrece herramientas metodológicas para analizar la espacialización de la cultura y observar las prácticas corpóreas y sus significados.
Michel de Certeau [3]	Vida Cotidiana, estrategias, tácticas, prácticas de resistencia.	Empírico-conceptual	Meso y Micro	Permite analizar la tensión y discrepancias entre decisiones de poder y acciones cotidianas de los habitantes.

En segundo lugar, se puede observar la matriz de coincidencias y diferencias (Tabla 2); dicha matriz permite identificar las superposiciones y contraposiciones significativas entre las principales propuestas conceptuales identificadas. Mencionando un ejemplo, tanto Shields [1] como Low [2] coinciden en entender el espacio como el resultado de procesos sociales, sin embargo, difieren en su aproximación. Shields [1] hace hincapié en el aspecto simbólico-cultural, mientras que Low [2] se centra en el entendimiento de la cultura

espacializada a través de una mirada etnográfica de la producción social y del espacio encarnado. Del mismo modo, Escobar [4] y De Certeau [3] reconocen ambos el papel de las estructuras de poder, aunque desde ángulos distintos. Escobar [4] a través de la macrocrítica al capitalismo y De Certeau [3] mediante el estudio de las microhistorias de resistencia cotidiana. Cabe aclarar que estas tensiones o discrepancias no se consideran como incompatibilidades, sino como oportunidades de complementariedad hacia la propuesta metodológica.

Tabla 2. Matriz de coincidencias y diferencias entre categorías transversales

<i>Aportes Conceptuales</i>	<i>Coincidencias</i>	<i>Diferencias</i>
Espacialización Social	Shields y Low coinciden en que el espacio es resultado de diversos procesos sociales.	Low prioriza lo etnográfico (meso y micro), Shields lo social en su carácter simbólico y cultural (macro).
Lógicas de Poder	Escobar y De Certeau reconocen la influencia de estructuras dominantes.	Escobar se centra en la crítica al capitalismo (macro y meso). De Certeau en la micro resistencia cotidiana (micro).
Apropiación y Resistencia	Escobar plantea el diseño como campo ontológico y determinante en la estructuración del sistema mundo.	Diferencia con enfoques más empíricos (Low, De Certeau) que no problematizan lo ontológico del diseño y sus afectaciones al espacio.
Vida Cotidiana y Resistencias	De Certeau y Low coinciden en observar prácticas cotidianas y sus discrepancias.	Low trabaja la espacialización de la cultura desde lo descriptivo y el espacio encarnado, mientras que De Certeau desde la teoría de la producción espacial.

Finalmente, se puede observar la matriz de ejes transversales (Fig.1), la cual sintetiza las relaciones entre los conceptos clave de los diferentes autores en un diálogo que da forma al marco conceptual para la propuesta metodológica. En este sentido, el eje de Hegemonía y diseño surge de la articulación entre Escobar [4] y Shields [1]; éste posibilita entender cómo el diseño se encuentra atravesado por las estructuras políticas y económicas hegemónicas. El eje de *Vida Cotidiana*, por su parte, surge de la interrelación entre todos trabajos revisados, los cuales aportan herramientas conceptuales y metodológicas que sirven para registrar y analizar las prácticas situadas en los contextos locales, de ahí su gran importancia. El eje

de Apropiación y resistencia aborda la crítica ontológica de Escobar [4] con la teoría de lo cotidiano propuesta por De Certeau [3]; de esta forma, se abre un potencial campo de estudio sobre cómo las comunidades del Sur Global negocian, disputan y resignifican cotidianamente los espacios que habitan.

De esta manera, este marco conceptual híbrida las ideas de los autores integrando una mirada amplia y compleja del concepto del espacio. Es decir, reconoce la espacialización como un fenómeno multiescalar dentro de un abordaje que combina la crítica ontológica, el análisis conceptual y la observación etnográfica.

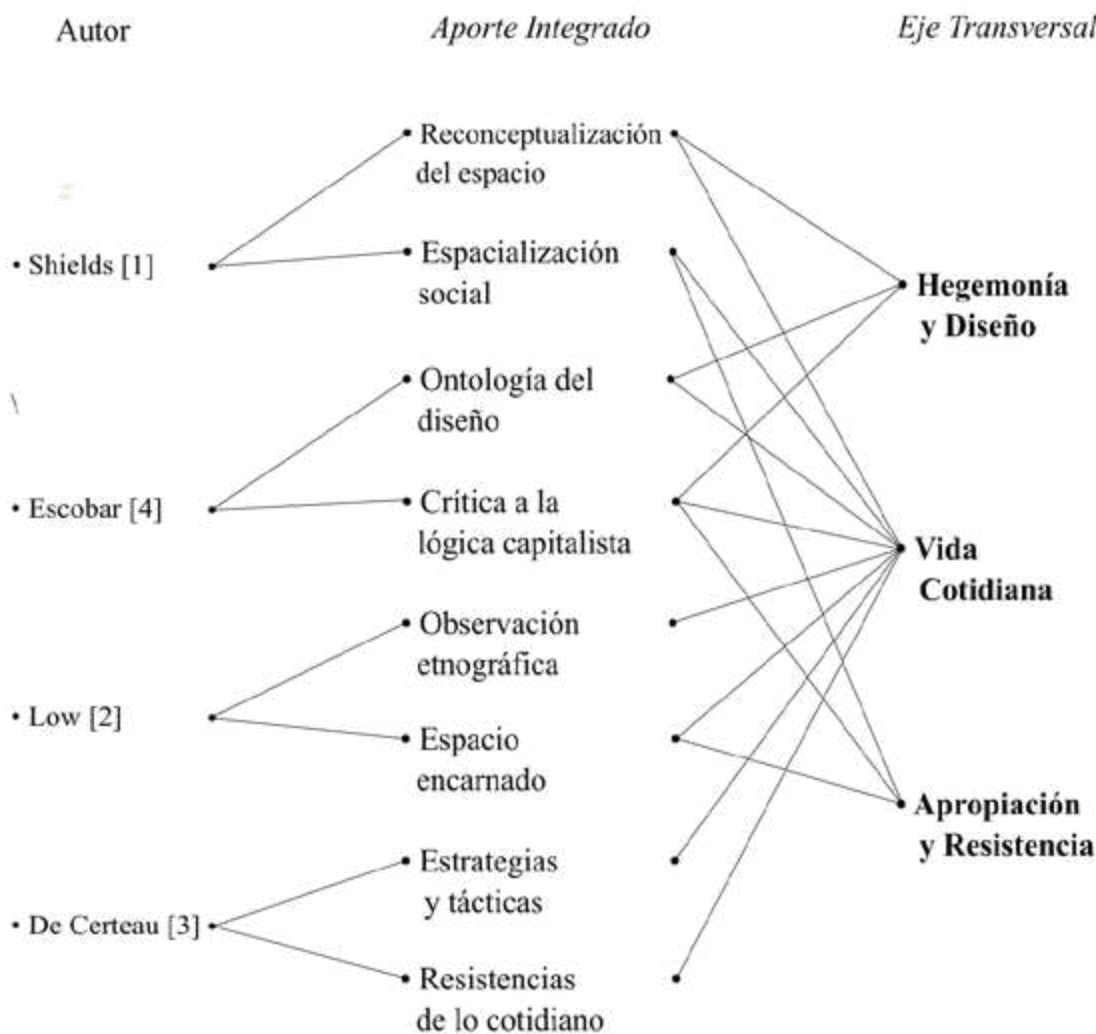


Figura 1. Matriz de Análisis de Ejes Transversales en relación con autores y aportes integrados.

3.1. Propuesta Metodológica

Como se mencionó anteriormente, la propuesta metodológica construida en este estudio se fundamenta en

la articulación de los cuatro referentes teóricos revisados; los cuales conforman el marco conceptual que guía esta mirada ampliada y alternativa para el estudio y comprensión del espacio en relación con la vida cotidiana.

En este sentido, la propuesta se estructura en tres escalas complementarias de análisis para facilitar su estudio denominadas como macro, meso y micro. A su vez, cada escala está asociada a técnicas específicas y a ejes transversales identificados en la matriz analítica (espacialización, producción social del espacio, prácticas cotidianas y ontología del diseño).

En la escala micro, fundamentada predominantemente en el marco teórico propuesto por De Certeau [3], se procura identificar y examinar las contraposiciones entre las estrategias desplegadas por las instituciones y las tácticas de resistencia o adaptación espacializadas por los habitantes, las cuales reconfiguran de manera significativa la materialidad y la experiencia de los espacios. Para abordar esta escala, la propuesta se sustenta en la implementación de técnicas cualitativas que incluyen la observación directa sistemática, la elaboración de descripciones situadas y densas, y la realización de microcartografías. Así, este conjunto de procedimientos tiene como finalidad registrar y documentar de manera detallada y profunda los procesos socioespaciales de las apropiaciones cotidianas de los lugares.

La escala meso, basada en su mayoría en la propuesta de Low [2], integra la observación participante y recorridos etnográficos que permiten registrar cómo se producen socialmente los espacios a partir de la experiencia corporal y simbólica. El espacio encarnado constituye aquí un eje fundamental para comprender la mediación entre prácticas cotidianas, memoria colectiva y entorno material.

La escala macro se desarrolla principalmente a partir de las aportaciones de Shields [1] y Escobar [4]. Shields propone una lectura crítica de la espacialización social, entendida como la producción diferenciada de espacialidades por medio de relaciones de poder y discursos. Por su parte, Escobar aporta la perspectiva ontológica del diseño, la cual problematiza cómo las lógicas capitalistas y desarrollistas configuran modos de habitar y organizar el espacio, frecuentemente en contradicción con las prácticas locales. Así, en esta escala se analizan documentos normativos, planes urbanos y marcos regulatorios, así como comparaciones con estudios en el Sur Global. Esta estructura metodológica, al articular lo macro, lo meso y lo micro, no pretende reproducir una jerarquía analítica tradicional. Por el contrario, busca desafiar la linealidad moderna que entiende las escalas como niveles de control. En su lugar, se propone un enfoque relacional donde cada escala es permeable y

mutuamente constitutiva, con la intención de construir epistemologías pluriversales que reconozcan la existencia de múltiples modos de espacializar [4].

Respecto a la operacionalización de la propuesta, se contemplan tres momentos de trabajo: (1) Recolección de información, donde se combina observaciones de campo, registros etnográficos y análisis documental; (2) Análisis relacional, el cual posibilita contraponer y cruzar descubrimientos y saberes entre las tres escalas para identificar coincidencias y disyuntivas; e (3) Integración crítica, enfocada en articular los resultados interconectados en diferentes escalas con el marco conceptual de los ejes transversales para construir una lectura situada del espacio estudiado, conectando así procesos de espacialización con los marcos conceptuales de los cuatro autores y los ejes transversales propuestos.

En la Tabla 3 se puede apreciar el caso propuesto del eje transversal de *Vida Cotidiana y Resistencia*. En éste se observa a través de una matriz cómo durante los tres momentos metodológicos el marco conceptual transversalizado se relaciona con las tres diferentes escalas de trabajo; lo anterior con el objetivo de generar una lectura situada e interrelacionada del espacio y las estrategias y tácticas de la vida cotidiana. Cabe resaltar que esta alternativa propuesta no es un método rígido. Esto se debe a que durante los tres momentos siempre cabe la posibilidad de que el investigador o diseñador decida cómo y en qué momento aplicar determinadas técnicas. Además, este ejercicio es plenamente de carácter crítico, interpretativo y constructivo, por lo que estas aproximaciones al espacio no pretenden ser universalistas; por el contrario, dichas aproximaciones buscan producir un conocimiento situado basado en marcos conceptuales que sirvan de sustento para entender el espacio y su relación con la vida cotidiana.

Cabe agregar que, el aporte central de esta propuesta metodológica consiste en su carácter relacional. Esto debido a que no analiza de manera aislada los ejes transversales, ni las escalas de trabajo. Por el contrario, las relaciona dinámicamente en cada momento metodológico. Así, se construye un marco metodológico que puede ser replicable y flexible que posibilita estudiar cómo los procesos espaciales en contextos del Sur Global se encuentran, en este caso, atravesados por constantes resistencias y negociaciones de lo cotidiano, por tensiones entre la planificación institucional y las prácticas cotidianas de diversas maneras y a diferentes escalas.

Tabla 3. Momentos operacionales de la propuesta metodológica del eje transversal de *Vida Cotidiana y Resistencia*

<i>Eje Transversal</i>	<i>Momento</i>	<i>Descripción</i>	<i>Relación con escalas de trabajo</i>	<i>Técnicas</i>
Vida Cotidiana y Resistencia	Momento (1): Recolección de información.	Revisión de diferentes fuentes primarias y secundarias de información documental y de campo de las tres escalas de trabajo (macro, meso y micro).	Micro: a partir del registro de experiencias y prácticas cotidianas en el espacio. Meso: mediante la observación directa del espacio (infraestructuras, servicios, etc.) y el registro de interacciones sociales. Macro: a través de la revisión marcos normativos, planes urbanos y otros documentos regulatorios.	Observación directa, esquemas y croquis espaciales, notas de campo y fotografías, recorridos etnográficos, talleres colectivos, entrevistas, entre otros.
	Momento (2): Análisis relacional.	Sobreposición entre estrategias institucionales y tácticas locales, así como la decodificación de prácticas y significados estableciendo interrelaciones entre las tres escalas de trabajo (macro, meso y micro).	Micro: donde se decodifican las prácticas y significados cotidianos. Meso: donde se interpretan las dinámicas sociales y culturales de los espacios encarnados. Macro: donde se da lectura a estructuras normativas y discursos que condicionan el espacio.	Codificación de entrevistas, análisis comparativo de registros fotográficos, cartografías críticas, análisis comparativo entre estrategias y tácticas, mapas y croquis de resistencias, entre otros.
	Momento (3): Integración crítica.	Articulación entre el marco conceptual de las estrategias y tácticas con posibles categorías descubiertas para contrastar y articular una lectura crítica y situada del espacio.	Micro: al interpretar las prácticas cotidianas en su dimensión corporal. Meso: al situar dichas prácticas en el entramado de relaciones sociales y culturales y el territorio local. Macro: al confrontarlas con las estructuras de espacialización social y las lógicas de diseño capitalista.	Categorizaciones temáticas, codificación de términos, articulaciones multiescalares, cartografías críticas, lectura crítica situada, narrativas analíticas relacionadas a los marcos conceptuales, entre otros.

4. Conclusión

El trabajo aquí presentado responde a la necesidad de entender el espacio en toda su complejidad, tanto en sus dimensiones físicas como culturales y sociales. Así, esta propuesta se alza como una alternativa metodológica para el análisis espacial; esta alternativa articula de manera relacional y complementaria las tres escalas de trabajo —

micro, meso y macro—, así como el marco teórico y conceptual basado en los aportes de De Certeau, Low, Shields y Escobar. De esta manera se posibilita una lectura espacializada, crítica y situada de la vida cotidiana como punto donde se encuentran, negocian y transforman las tensiones entre estrategias institucionales y tácticas locales dentro de un marco ontológico del diseño. No obstante,

este ejercicio también evidenció los límites de los marcos teóricos revisados ya que la mayoría de estas aproximaciones surge en el Norte Global. Por consecuencias, este sesgo geográfico y epistémico plantea la necesidad de dialogar con más referentes latinoamericanos, comunitarios o pueblos originarios.

En este sentido, el aporte principal de esta propuesta reside en su flexibilidad, su carácter manipulable y su capacidad de réplica, aunque cabe aclarar, sin caer en pretensiones universalistas o en la búsqueda de un modelo estandarizado, ni mucho menos normativo. En otras palabras, en este trabajo se concibe una herramienta metodológica fundamentalmente adaptable, cuya estructura le confiere la versatilidad necesaria para ser implementada en una diversidad de contextos socioespaciales. Así, la propuesta resulta particularmente valiosa para su aplicación en contextos particulares y heterogéneos que caracterizan a ciertos territorios, como lo puede ser el Sur Global.

Por otra parte, la propuesta también contribuye en la construcción de posibles estudios comparativos y sistemáticos orientados a profundizar en el análisis de las complejas interrelaciones existentes entre el diseño arquitectónico, las prácticas sociales y los procesos de resistencia y apropiación cotidiana que se sitúan en el espacio.

Además, el estudio permitió identificar cómo las estrategias institucionales y las tácticas locales se entrecruzan en negociaciones y disputas que son materializadas en el propio espacio en diferentes escalas; donde todas las escalas pueden ser analizadas y entretejidas, revelando así dinámicas espaciales que suelen mantenerse invisibilizadas por los enfoques de análisis más tradicionales. Por el contrario, la propuesta metodológica aquí presentada, al integrar el registro de diferentes escalas, el análisis relacional y la interpretación crítica aporta una mirada situada que reconoce la agencia de los actores locales sobre el espacio y los procesos territoriales.

Como conclusión, este estudio no sólo contribuye al debate teórico, sino que abre posibilidades prácticas hacia investigaciones interdisciplinarias y proyectos de diseño comprometidos con la complejidad de los territorios habitados. Así, este trabajo fortalece el campo del análisis de los procesos de espacialización especialmente en los contextos del Sur Global. Por último, se evidenció la existencia de una interrelación entre las estrategias institucionales y las tácticas locales, revelando la necesidad de más espacios de reflexión y crítica en torno al espacio y la vida cotidiana. Desde esta lectura crítica, de

reconocer que producir conocimiento sobre el espacio también implica disputar el poder de definirlo. Las metodologías no son solo instrumentos analíticos, sino prácticas que pueden reproducir o tensionar las lógicas coloniales del saber. Por ello, la propuesta busca contribuir a un desplazamiento epistemológico: del espacio como objeto de estudio al espacio como campo de diálogo entre saberes, prácticas cotidianas y resistencias.

Agradecimientos

El autor y la autora expresan su más sincero agradecimiento a la Secretaría de Ciencia, Humanidades Tecnología e Innovación (SECIHTI), así como a la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Querétaro (UAQ), por el invaluable apoyo institucional y los recursos financieros y logísticos brindados, los cuales fueron fundamentales para la realización y culminación exitosa del presente estudio.

Conflictos de interés

El autor y la autora del presente trabajo declaran de manera explícita y voluntaria la inexistencia de cualquier conflicto de interés, ya sea de naturaleza económica, profesional, personal o intelectual, el cual pudiera haber influido de manera directa o indirecta en el diseño de la investigación, la recolección e interpretación de los datos y en los resultados aquí publicados, así como en el desarrollo de las conclusiones aquí presentadas.

Se declara que durante la preparación de este manuscrito/estudio, los autores utilizaron ChatGPT para Mac, Versión 1.2025.238 DeepSeek-V3 con el propósito de revisar y mejorar la claridad, coherencia, gramática y ortografía del texto. Los autores han revisado y editado el contenido generado y asumen plena responsabilidad por el contenido de esta publicación.

5. Referencias bibliográficas

- [1] R. Shields, *Spatial questions: cultural topologies and social spatialisations*. Los Angeles: Sage, 2013.
- [2] S. M. Low, *Spatializing culture: The ethnography of space and place*. London: Routledge, 2016.
- [3] M. de Certeau, *La invención de lo cotidiano. Artes de*

hacer, 1a ed., vol. Vol.1. México, D.F.: Universidad Iberoamericana, Departamento de Historia: Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Occidente, 1996.

- [4] A. Escobar, *Designs for the pluriverse: radical interdependence, autonomy, and the making of worlds*. en *New ecologies for the twenty-first century*. Durham: Duke University Press, 2018.
- [5] S. Halvorsen, B. Mançano Fernandes, y F. V. Torres,

«Movimientos socioterritoriales. Casos de América Latina y Europa», *Geograficando*, vol. 17, n.º 2, p. e097, nov. 2021, doi: 10.24215/2346898Xe097.

- [6] A. Terven Salinas y A. Vázquez Estrada, «Indígenas en la ciudad. La espacialización de la cultura y sus implicaciones en la construcción del indio como sujeto de derecho en Querétaro, México», *Gazeta de Antropología*, jun. 2016, doi: 10.30827/Digibug.42870.

Optimización de sistemas fotovoltaicos en terrenos irregulares mediante modelado computacional y algoritmos heurísticos.

Optimization of photovoltaic systems on uneven terrain using computational modeling and heuristic algorithms.

Iturralde Carrera, Luis Angel*, Cruz Reyes, Gabriel Alejandro, Rodríguez Resendiz, Juvenal*, Valdivia Nodal, Yarelis*, Constantino Robles, Carlos* y Díaz Tato, Leonel***.**

Afiliación: Facultad de Ingeniería, Facultad de Ingeniería**, Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica****

Universidad o Institución: Universidad Autónoma de Querétaro, Universidad de Anáhuac**, Universidad Autónoma de Nuevo León****

Ciudad y País: Santiago de Querétaro, San Nicolás de los Garza***, México.*

luisiturralde97@ieee.org, gabriel.cruz36@anahuac.mx, juvenal@uaq.edu.mx, cconstantino30@alumnos.uaq.mx, yarelisvaldivia83@gmail.com, leonel.diazat@uanl.edu.mx; ORCID : (0000-0003-0775-2160), (0000-0002-5595-9329), (0009-0003-4187-0029), (0000-0001-8598-5600), (0009-0004-5490-9946)

Resumen: El presente estudio desarrolla un modelo computacional predictivo para optimizar la orientación y disposición de paneles solares en terrenos irregulares, integrando simulaciones en PVsyst con análisis estadístico y algoritmos de optimización bioinspirados. A partir de un enfoque heurístico-paramétrico, se evaluaron múltiples configuraciones de inclinación y azimut con el objetivo de maximizar la producción energética específica y el rendimiento global del sistema (PR). El modelo, validado con datos climáticos de Veracruz, México, identifica un ángulo óptimo de orientación de aproximadamente 267.3° , asociado a un PR estimado de 0.8318. Los resultados demuestran la influencia significativa del azimut sobre la eficiencia energética y confirman la coherencia entre los métodos de simulación, análisis estadístico y optimización computacional. Asimismo, el modelo propuesto reduce los tiempos de planificación y costos de instalación al eliminar la necesidad de ensayos físicos preliminares, ofreciendo una herramienta escalable y reproducible para el diseño técnico de sistemas fotovoltaicos. Como trabajo futuro, se propone la ampliación del modelo hacia un enfoque multivariable que integre inclinación, condiciones climáticas y tipo de tecnología fotovoltaica, fortaleciendo su aplicabilidad en entornos reales y su contribución a la planificación sostenible de la energía solar.

Palabras clave: Optimización fotovoltaica; Modelado computacional; Algoritmo de polinización de flores; Eficiencia energética; Análisis estadístico; Rendimiento global (PR).

Abstract: This study develops a predictive computational model to optimize the orientation and layout of solar panels on uneven terrain, integrating PVsyst simulations with statistical analysis and bio-inspired optimization algorithms. Using a heuristic-parametric approach, multiple tilt and azimuth configurations were evaluated with the aim of maximizing specific energy production and overall system performance (PR). The model, validated with climate data from Veracruz, Mexico, identifies an optimal orientation angle of approximately 267.3° , associated with an estimated PR of 0.8318. The results demonstrate the significant influence of azimuth on energy efficiency and confirm the consistency between simulation methods, statistical analysis, and computational optimization. Furthermore, the proposed model reduces planning times and installation costs by eliminating the need for preliminary physical testing, offering a scalable and reproducible tool for the technical design of photovoltaic systems. As future work, we propose expanding the model to a multivariable approach that integrates inclination, climatic conditions, and type of photovoltaic technology, strengthening its applicability in real environments and its contribution to sustainable solar energy planning.

Keywords: Photovoltaic optimization; Computational modeling; Flower pollination algorithm; Energy efficiency; Statistical analysis; Overall performance (PR).

1. Introducción

El incremento sostenido en la demanda global de energía y la urgencia por mitigar las emisiones de gases de efecto invernadero han impulsado una transición energética sin precedentes hacia fuentes renovables, entre las cuales la energía solar fotovoltaica (FV) se ha consolidado como una de las más prometedoras por su modularidad, escalabilidad y bajo impacto ambiental [1, 2]. La expansión de sistemas FV en entornos urbanos, industriales y rurales ha evidenciado la importancia crítica del diseño geométrico de las instalaciones, dado que la inclinación, orientación, sombreado y condiciones geográficas determinan directamente la captación de radiación solar y, por ende, la eficiencia global del sistema [3, 4, 5].

Diversos estudios han demostrado que desviaciones angulares inadecuadas pueden generar pérdidas energéticas de entre 15 % y 30 % en la producción anual [6, 7]. Esta variabilidad impacta de manera directa en los costos de operación, el retorno de inversión y la vida útil de los componentes, particularmente en configuraciones de gran escala donde los efectos acumulativos resultan significativos [8, 9, 10]. Por esta razón, el diseño óptimo de la orientación e inclinación de los paneles solares se ha convertido en un tema central en la ingeniería fotovoltaica moderna [11].

En los últimos años, diferentes enfoques metodológicos se han empleado para abordar este desafío. Sánchez et al. [12] propusieron un sistema de control angular automatizado basado en seguimiento solar diario, logrando un incremento del 18 % en eficiencia respecto a configuraciones fijas. González y Martínez [13] analizaron la instalación de sistemas FV en un complejo comercial urbano, demostrando la influencia combinada de la inclinación, el tipo de módulo y la orientación sobre la productividad energética y la rentabilidad. Otros trabajos, como el de Ramírez et al. [12], enfatizan la necesidad de integrar modelos de simulación multiparamétrica que consideren factores topográficos, climáticos y tecnológicos desde la fase de diseño preliminar. Asimismo, la incorporación de algoritmos de optimización metaheurísticos como Algoritmos Genéticos, Particle Swarm Optimization (PSO) o Simulated Annealing ha mostrado resultados alentadores para la determinación automática de configuraciones óptimas [14, 15, 16].

Pese a los avances, persiste la ausencia de una herramienta integral que unifique los parámetros

geométricos, geográficos y climáticos en un solo entorno computacional, con capacidad de adaptación a terrenos irregulares y distintas condiciones de radiación solar. En este contexto, el presente estudio tiene como finalidad diseñar e implementar una herramienta basada en modelado matemático y simulaciones computacionales que permita optimizar el posicionamiento de paneles solares en función de la radiación global incidente, el ángulo azimutal, la inclinación del terreno y la ubicación geográfica. Para ello, se integrarán las capacidades del software PVsyst (v. 8.0.13) con algoritmos de optimización desarrollados en Python, posibilitando el análisis sistemático de configuraciones múltiples y la identificación de aquella que maximice la producción energética específica (kWh/kWp) [17, 18].

Este artículo contribuye al campo de la energía fotovoltaica al presentar una herramienta computacional avanzada para la optimización del posicionamiento de paneles solares, destacando los siguientes objetivos principales:

- **Desarrollo de un entorno de simulación interactivo** que permite al usuario ingresar parámetros del sitio, como coordenadas geográficas, topografía, irradiancia y temperatura, para obtener un análisis comparativo del rendimiento energético en distintas orientaciones e inclinaciones.
- **Implementación de un algoritmo heurístico-paramétrico** capaz de evaluar múltiples combinaciones angulares mediante simulaciones automatizadas, identificando la disposición con el menor nivel de pérdidas energéticas.
- **Validación del modelo** mediante la comparación entre configuraciones optimizadas y estándares, empleando como métricas el rendimiento anual y el índice de rendimiento (*Performance Ratio*, PR).
- **Reducción significativa de los tiempos de planificación, costos de instalación y errores** derivados de configuraciones subóptimas, mediante una metodología precisa, escalable y libre de pruebas físicas preliminares.
- **Contribución al cierre de la brecha** entre el potencial teórico de captación solar y su aprovechamiento real, fortaleciendo la planificación sostenible y la eficiencia en el sector de energía fotovoltaica.

El objetivo principal de este estudio es desarrollar y validar una herramienta computacional para la optimización del posicionamiento de paneles solares, basada en modelado matemático y simulaciones en PVsyst. Esta herramienta permitirá analizar y comparar el rendimiento energético de un sistema fotovoltaico en función de su orientación e inclinación, considerando parámetros específicos del sitio como coordenadas geográficas, topografía, irradiancia y temperatura ambiental. De manera particular, el estudio busca identificar la configuración angular que maximice la producción energética específica (kWh/kWp) y minimice las pérdidas del sistema, mediante la aplicación de un algoritmo heurístico-paramétrico. Asimismo, pretende reducir los tiempos de planificación y los costos asociados a la etapa de diseño, ofreciendo una metodología reproducible, escalable y libre de ensayos físicos preliminares que contribuya a mejorar la eficiencia y sostenibilidad de las instalaciones fotovoltaicas.

2. Metodología

El desarrollo metodológico de este estudio se basa exclusivamente en **modelado matemático y simulaciones computacionales**, sin la intervención de pruebas experimentales o prototipos físicos. Este enfoque permite una evaluación precisa, reproducible y escalable del comportamiento energético de sistemas fotovoltaicos (FV) bajo distintas configuraciones geométricas, climáticas y topográficas. El proceso metodológico se estructura en cinco fases principales: diagnóstico energético, formulación del modelo matemático, simulación computacional, optimización paramétrica y validación de resultados.

La Figura 1 muestra el mapa bibliométrico generado con VOSviewer 1.6.20, a partir de la búsqueda avanzada en Scopus con los términos incluidos en la cadena de consulta mostrada en el Listado ???. El análisis abarca publicaciones entre 2018 y 2025 relacionadas con la optimización de sistemas fotovoltaicos, considerando orientación, inclinación, modelado matemático, y técnicas de optimización bioinspiradas.

Se identifican agrupamientos temáticos centrados en *solar photovoltaic system*, *optimization*, *tilt angle*, *PVsyst software*, y *energy efficiency*, los cuales constituyen los ejes principales de investigación. Los términos periféricos como *renewable energy*, *simulation*, y *mathematical modeling* refuerzan la orientación hacia estrategias computacionales y predictivas aplicadas a

la mejora del rendimiento fotovoltaico.

The search string used in Scopus was the following:

```
TITLE-ABS-KEY( ("photovoltaic system".OR
"solar panel".OR "PV system".OR "PV
installation".OR "solar energy optimiza-
tion") AND (.orientation optimization.OR
.azimuth optimization.OR "tilt angle".OR
"panel positioning".OR "terrain irregular".OR
"slope analysis") AND (computational
modeling.OR "PVsyst".OR "simulation".OR
"parametric model".OR "mathematical
modeling".OR .ANOVA.OR "Tukey test".OR
"Flower Pollination Algorithm".OR "bio-
inspired optimization".OR "polynomial
regression".OR "predictive model*") AND
(.energy efficiency.OR "performance ratio".OR
"kWh/kWp".OR .energy yield.OR "solar resour-
ce assessment") ) AND PUBYEAR >2018
AND PUBYEAR <2026
```

2.1. Enfoque general

El procedimiento se sustenta en la metodología propuesta en la Figura 2, la cual integra la **revisión del sistema energético existente**, la **evaluación de oportunidades de ahorro energético** conforme a la norma **ISO 50001:2018**, y el **diseño óptimo del sistema solar fotovoltaico (SSFV)** considerando tanto criterios de desempeño técnico como impacto ambiental.

En las etapas iniciales se analizan los **datos meteorológicos** del sitio (Veracruz, México) obtenidos de la base de datos de *PVsyst* y *Meteonorm*, los cuales incluyen irradiancia global, temperatura ambiente y velocidad del viento, fundamentales para la modelación energética.

2.2. Herramientas computacionales

Para el desarrollo del modelo se emplean herramientas especializadas que permiten integrar el análisis fotovoltaico, el procesamiento de datos y la optimización matemática (Tabla 1).

2.3. Desarrollo del modelo computacional

La formulación del modelo matemático se basa en la ecuación fundamental de producción energética de un sistema fotovoltaico:

$$E_{\text{total}} = A \cdot G_{\text{opt}} \cdot \eta_{\text{sistema}} \quad (1)$$

donde:

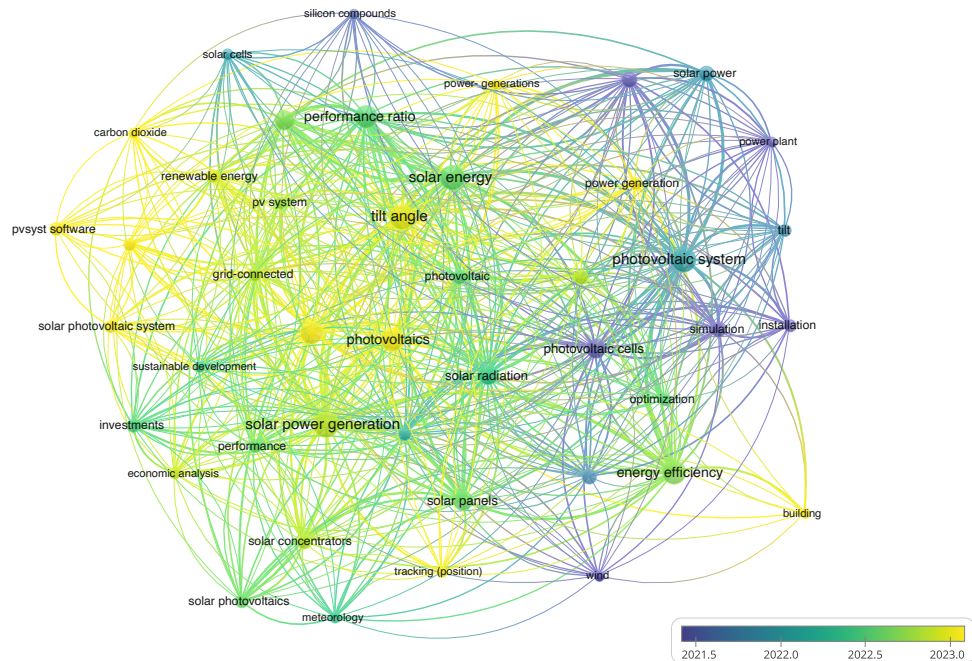


Figura 1: Mapa bibliométrico generado con VOSviewer 1.6.20 a partir de la base de datos Scopus.

- E_{total} representa la energía anual generada [kWh],
- A es el área efectiva del campo fotovoltaico [m^2],
- G_{opt} corresponde a la irradiancia optimizada sobre el plano del colector [kWh/m^2],
- η_{sistema} es la eficiencia global del sistema, que incluye las pérdidas ópticas, térmicas y eléctricas.

Posteriormente, se desarrolla un **modelo de optimización heurístico-paramétrico** en *Python*, el cual evalúa combinaciones de ángulos de inclinación y orientación mediante iteraciones sucesivas, maximizando la producción energética específica (kWh/kWp). Cada configuración es procesada automáticamente en *PVsyst* y los resultados exportados son sometidos a análisis estadístico (ANOVA de un factor y prueba de Tukey) para determinar diferencias significativas entre configuraciones.

2.4. Integración de simulaciones y validación

El flujo metodológico (Figura 2) inicia con la recopilación de datos climáticos y geométricos del sitio, continúa con la simulación energética para distintas

orientaciones y culmina con la identificación de la disposición óptima del sistema FV.

Los resultados obtenidos son validados comparando las configuraciones optimizadas con una orientación estándar sur, tomando como criterios el **índice de rendimiento (PR)**, la **eficiencia global** y la **energía específica**. Además, se incluyen indicadores complementarios como la reducción potencial de emisiones de CO_2 y el impacto económico asociado a la mejora del rendimiento, lo que permite una evaluación integral técnica y ambiental del diseño propuesto.

2.5. Consideraciones finales

El enfoque adoptado garantiza un proceso reproducible, libre de sesgos experimentales y adaptable a distintos contextos geográficos. La metodología propuesta no solo busca maximizar la eficiencia energética, sino también minimizar los costos de instalación y el impacto ambiental mediante la reducción de emisiones derivadas del uso de combustibles fósiles. De este modo, el modelo computacional desarrollado constituye una herramienta robusta para el diseño inteligente de sistemas solares en edificaciones sostenibles.

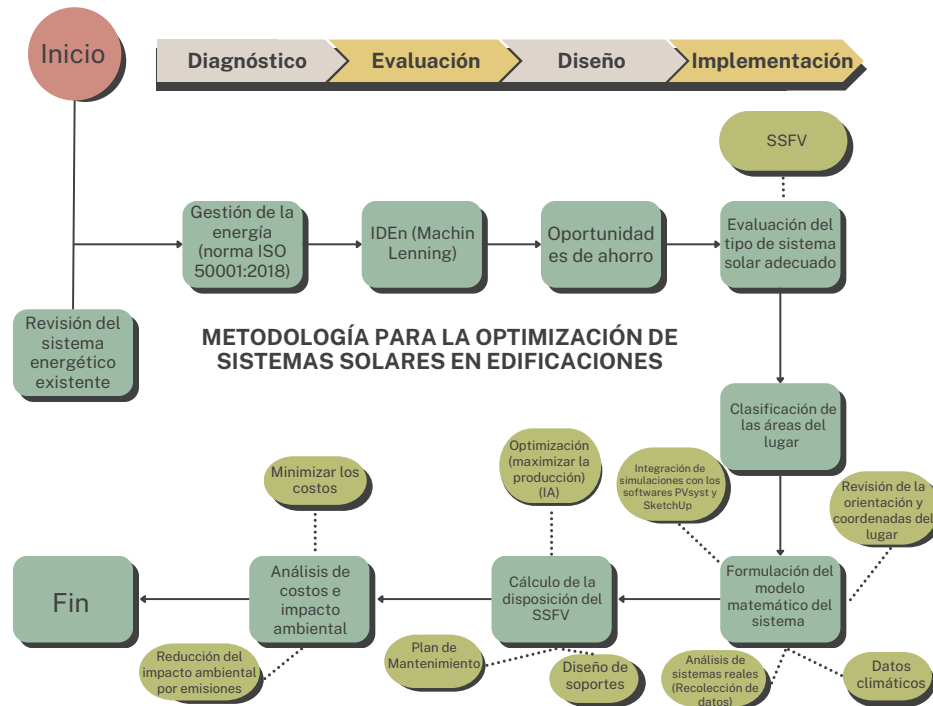


Figura 2: Flujo metodológico para la optimización de sistemas solares fotovoltaicos en edificaciones.

2.6. Análisis de trayectorias solares para la ubicación de estudio

El estudio de las trayectorias solares es esencial para la determinación de la orientación y el ángulo de inclinación óptimos de los módulos fotovoltaicos. En la Figura 3 se presenta el diagrama solar correspondiente a la ciudad de Veracruz, México, generado mediante el software *PVsyst V8.0.11*. Este análisis permite comprender la variación de la altura solar y el desplazamiento aparente del Sol a lo largo del año, lo cual resulta indispensable en el diseño de sistemas fotovoltaicos con alto aprovechamiento energético.

El gráfico muestra con claridad los recorridos solares característicos de cada época del año, desde los solsticios de verano e invierno hasta los equinoccios. Esta información proporciona una base geométrica para la evaluación del recurso solar y para la posterior simulación del rendimiento energético de los paneles fotovoltaicos en distintas configuraciones de inclinación y orientación.

3. Resultados

3.1. Proceso de simulación y configuración de parámetros en PVsyst

En la Figura 4 se presenta la etapa inicial de configuración de las condiciones geométricas del sistema fotovoltaico en el software *PVsyst*. En esta fase se definieron los parámetros del campo solar, incluyendo la inclinación y el azimut del plano del generador, con el propósito de establecer la orientación base para el análisis de rendimiento anual. Esta simulación preliminar permitió observar el efecto de la posición angular sobre la captación de radiación y sentó las bases para la calibración posterior del modelo.

La Figura 4 ilustra el proceso de definición de la orientación del campo fotovoltaico. Este paso metodológico es crucial, ya que de la inclinación y el azimut depende la cantidad de irradiancia incidente sobre los módulos y, por ende, la precisión del modelo energético. Con estos valores se configuraron las condiciones de partida para las simulaciones comparativas realizadas posteriormente.

En la Figura 5 se muestran los resultados gráficos generados tras la ejecución de las simulaciones anuales

Tabla 1: Resumen del software técnico utilizado en el proyecto.

Software	Función principal	Salida esperada
PVsyst 8.0.13	Simulación del rendimiento energético del sistema FV según orientación e inclinación.	Producción energética anual, pérdidas y rendimiento global (PR).
Python 3.10	Desarrollo del algoritmo de optimización paramétrica con análisis estadístico (ANOVA, Tukey) y validación comparativa.	Curvas de optimización y validación estadística.
Excel 365	Procesamiento, limpieza y visualización básica de datos exportados desde PVsyst.	Tablas comparativas y gráficas auxiliares.
MATLAB 2022a	Ajuste de modelos matemáticos para la representación continua de la variable $PR(\text{azimut})$.	Ecuación polinómica y curva óptima.

en *PVsyst*. En esta etapa se obtuvieron los diagramas de entrada y salida del sistema, la proporción de rendimiento (PR) y las distribuciones de potencia, elementos que permiten evaluar de forma global la consistencia del modelo y la respuesta energética ante diferentes escenarios de radiación y temperatura.

La Figura 5 evidencia cómo las simulaciones en *PVsyst* permiten representar el comportamiento integral del sistema. Estos resultados son empleados dentro de la metodología como validación visual del rendimiento energético, antes de formular el modelo matemático de optimización. El objetivo principal en esta fase es establecer relaciones de coherencia entre las variables simuladas sin enfocarse en los valores numéricos.

Finalmente, la Figura 6 presenta la localización geográfica de referencia seleccionada para el desarrollo del estudio. El sitio de Veracruz, México, fue definido como punto de análisis climático y solar, proporcionando los datos meteorológicos necesarios para alimentar las simulaciones energéticas y garantizar la representatividad del modelo propuesto.

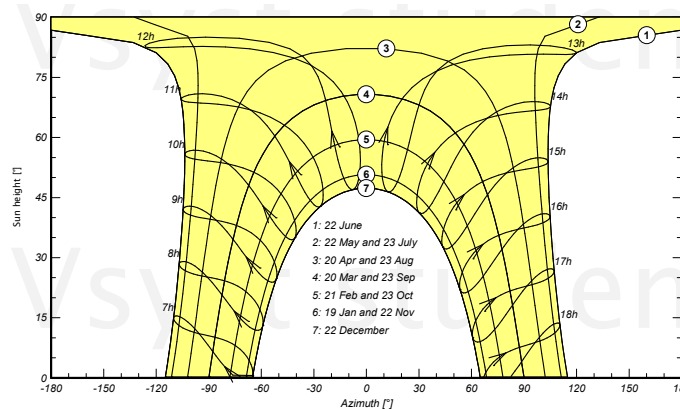


Figura 3: Trayectorias solares generadas en PVsyst V8.0.11 para la ciudad de Veracruz (Lat. 19.20° N, Long. -96.14° W, Alt. 20 m). Se observan las variaciones de altura solar respecto al azimut durante los solsticios y equinoccios, empleadas como referencia en el análisis de orientación fotovoltaica.

La Figura 6 sirve como referencia espacial dentro de la metodología, ya que define las condiciones de latitud, longitud y altitud que determinan la trayectoria solar y la irradiancia global disponible. Esta información permite integrar de forma coherente los resultados de simulación con las condiciones reales del sitio de estudio.

La selección del inversor es un paso decisivo para garantizar una transferencia óptima de energía y el máximo rendimiento del generador fotovoltaico (FV). Como se resume en los criterios de diseño, el inversor debe cumplir con tres aspectos principales: relación de potencia nominal, compatibilidad eléctrica y topología del sistema.

En cuanto al dimensionamiento de potencia, para un generador con una potencia nominal de 7.0 kWp, el uso de un inversor de 6.0 kWac da como resultado una relación DC/AC de 1.16, la cual se encuentra dentro del rango recomendado de 1.1–1.25 sugerido por [19] y [20]. Esta configuración ligeramente sobredimensionada permite un mejor aprovechamiento del inversor en niveles bajos de irradiancia, minimizando las pérdidas por clipping durante las horas pico y manteniendo una alta eficiencia de conversión a lo largo del día.

Respecto a la compatibilidad eléctrica, se verificó que el voltaje en el punto de máxima potencia (V_{mp}) y el voltaje en circuito abierto (V_{oc}) de las cadenas

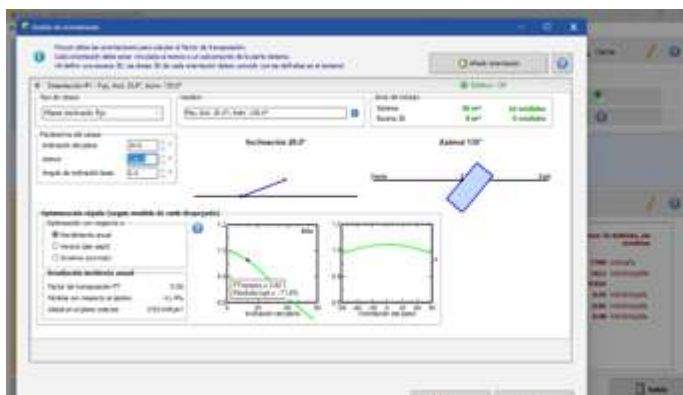


Figura 4: Configuración del ángulo de inclinación y orientación del campo fotovoltaico en PVsyst, con valores de 20° y 130° respectivamente, empleados en la simulación base.



Figura 6: Ubicación geográfica de referencia del estudio: Veracruz, México, empleada como fuente de datos climáticos y de radiación solar para la simulación en PVsyst.

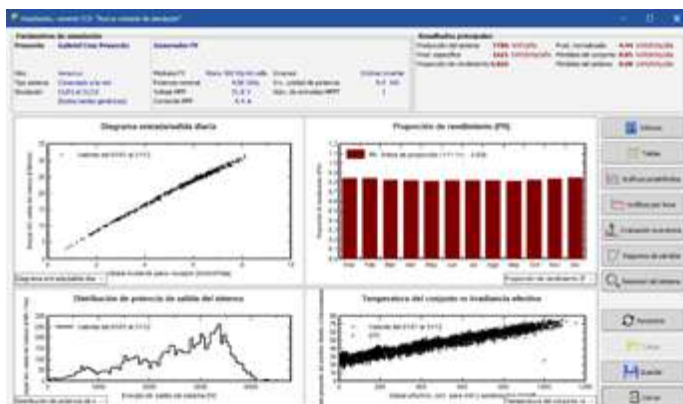


Figura 5: Resultados de simulación obtenidos en PVsyst, que incluyen los diagramas de irradiancia, rendimiento y temperatura operativa del sistema fotovoltaico.

de módulos permanecen dentro de la ventana de seguimiento del punto de máxima potencia (MPPT) del inversor. De igual forma, las corrientes de las cadenas se mantienen por debajo de los límites de corriente del inversor, evitando reducciones por sobrecorriente. Finalmente, considerando la configuración modular (dos cadenas de seis módulos), se prefiere una topología con entradas MPPT múltiples, que permite la optimización independiente del punto de operación de cada cadena, tal como se discute en [21].

En el modelo simulado, se emplearon dos inversores de 3.0 kWac conectados en paralelo para manejar el arreglo de 7.0 kWp en corriente continua, garantizando redundancia y un funcionamiento eficiente bajo condiciones de sombreado parcial o desajuste.

El Tabla 2 resume los parámetros nominales del sistema fotovoltaico simulado en PVsyst. La configuración seleccionada reproduce un generador distribuido a pequeña escala, típico de aplicaciones residenciales o educativas en climas tropicales. La capacidad nominal total en corriente continua (7.0 kWp) y la capacidad en corriente alterna (6.0 kWac) resultan en una relación DC/AC de diseño coherente con las recomendaciones internacionales para maximizar la producción anual de energía [22]. El ángulo de inclinación de 20° y el barrido de azimut de 0° a 360° permiten realizar un análisis paramétrico completo de la producción energética dependiente de la orientación.

El rango de azimut óptimo (130°–145°) corresponde a orientaciones hacia el sureste, las cuales alcanzan la mayor producción anual de energía inyectada a la red ($E_{\text{grid}} \approx 11,338$ kWh/año) y los mayores factores de rendimiento (PR de hasta 0.831). Estos resultados coinciden con los datos locales de trayectoria solar para Veracruz, donde la irradiancia matutina predomina debido a una menor nubosidad en horas de la tarde. Por el contrario, los azimuts comprendidos entre 0° y 30° muestran una producción inferior, lo que valida la influencia de la orientación sobre el factor de rendimiento anual, tal como lo reporta [23].

La Tabla 3 presenta los balances mensuales de energía y los indicadores de desempeño calculados mediante PVsyst. La irradianción global anual en el

Tabla 2: Resumen técnico del sistema fotovoltaico simulado.

Elemento	Especificación
Ubicación	Veracruz, México
Software	PVsyst 8.0.13
Módulo	JinkoSolar JKM580M-7RL4-V
Potencia nominal por módulo	580 Wp
Número de módulos	12 (2 arreglos de 6)
Potencia nominal total (Pnom)	7.0 kWp
Área del generador	33 m ²
Inversores	2 × 3.0 kWac
Potencia total AC	6.0 kWac
Relación Pnom/Inversor	1.16
Ángulo de inclinación	20° fijo
Azimut simulado	0°–360° cada 5°
Rango del factor de rendimiento (PR)	0.825–0.831
Orientaciones óptimas	130°–145°
Máximo E_{grid}	≈ 11,338 kWh/año
Orientaciones menos eficientes	0°–30°

plano horizontal (GlobHor) alcanza aproximadamente 1816 kWh/m², mientras que la irradiación efectiva sobre el plano del colector (GlobEff) es de 1669 kWh/m². Estos valores corresponden al potencial solar local de la región del Golfo, y son consistentes con los datos satelitales NASA-SSE reportados por [24].

La producción anual de energía del arreglo (E_{array}) es de 12,188 kWh, de los cuales 11,737 kWh se inyectan a la red (E_{grid}), lo que resulta en un factor de rendimiento global de 0.828. Se observan variaciones estacionales debidas tanto a la irradiancia como a los efectos de la temperatura ambiente: la mayor generación ocurre entre abril y julio, coincidiendo con una alta irradiación y temperaturas moderadas. Por el contrario, los meses de invierno (diciembre–enero) presentan una generación reducida debido a los días más cortos y a la menor altura solar.

El PR mensual estable (0.825–0.837) indica una eficiencia consistente del sistema a lo largo del año, confirmando que el dimensionamiento del inversor y la configuración de inclinación fija mantienen un adecuado comportamiento térmico. Estos resultados se encuentran dentro del rango típico de PR (0.80–0.85)

para sistemas bien diseñados de inclinación fija en climas tropicales, tal como lo validan los estudios de referencia de [25] y [26].

3.2. Análisis estadístico de los datos del sistema fotovoltaico

El análisis de datos mediante estadística descriptiva e inferencial permite identificar relaciones, tendencias y comportamientos que no son evidentes únicamente a partir de los valores energéticos. En el contexto de los sistemas fotovoltaicos, las herramientas estadísticas como los mapas de correlación, el análisis de varianza (ANOVA) y las pruebas post-hoc son esenciales para validar el impacto de variables de diseño —como la orientación o la irradiancia— sobre el desempeño global del sistema [22, 26]. Este enfoque aporta una visión cuantitativa que complementa las simulaciones en PVsyst, asegurando coherencia entre los resultados teóricos y el comportamiento esperado en condiciones reales de operación.

3.3. Mapa de calor de correlación

La Figura 7 presenta el mapa de calor de correlación entre las principales variables numéricas analizadas: irradiancia global incidente (*GlobInc*), irradiancia efectiva (*GlobEff*), energía del arreglo (E_{array}), energía inyectada a red (E_{grid}), rendimiento global (PR) y ángulo de orientación (Grados).

Se observó una correlación casi perfecta ($r = 0.99$) entre E_{array} y E_{grid} , lo que confirma la coherencia energética del modelo y la estabilidad del inversor bajo diferentes condiciones de irradiancia [25]. Asimismo, la correlación alta entre *GlobInc* y *GlobEff* ($r = 0.84$) demuestra que las pérdidas ópticas y angulares fueron mínimas, validando la correcta configuración geométrica del sistema.

Por otro lado, la correlación entre el ángulo de orientación (Grados) y el rendimiento (PR) fue moderada ($r = 0.58$), lo que indica que la variación del azimut tiene un efecto directo, aunque no dominante, sobre la eficiencia global. Este comportamiento coincide con lo reportado por [23] y [24], quienes encontraron que desviaciones de más de 30° en orientación pueden reducir el rendimiento entre un 2 % y un 4 %. En conjunto, el análisis de correlación demuestra que la irradiancia sigue siendo la variable con mayor peso estadístico, mientras que la orientación actúa como factor de ajuste fino para maximizar el desempeño energético del sistema.

Tabla 3: Balances mensuales e indicadores de desempeño del sistema fotovoltaico simulado.

Month	GlobHor (kWh/m ²)	DiffHor (kWh/m ²)	T Amb (°C)	GlobInc (kWh/m ²)	GlobEff (kWh/m ²)	E _{array} (kWh)	E _{grid} (kWh)	PR (ratio)
Enero	124.0	57.50	22.10	91.0	84.9	543	523	0.825
Febrero	127.8	55.90	22.40	100.0	94.8	604	582	0.837
Marzo	175.5	75.60	24.40	151.7	146.3	912	881	0.835
Abril	186.8	75.90	26.30	174.2	170.1	1042	1006	0.830
Mayo	195.8	81.40	28.20	194.9	191.2	1157	1118	0.824
Junio	183.1	85.10	28.10	187.1	183.5	1114	1077	0.827
Julio	193.3	80.90	28.10	196.0	192.2	1165	1126	0.825
Agosto	181.6	84.70	28.10	174.4	171.0	1041	1006	0.828
Septiembre	148.3	73.40	27.60	135.1	132.4	795	768	0.827
Octubre	136.1	64.40	26.10	117.1	114.4	688	663	0.826
Noviembre	122.5	58.20	24.10	98.9	96.6	587	566	0.827
Diciembre	121.6	58.00	22.60	89.2	86.9	540	521	0.825
Total	1816.4	—	25.6	1709.6	1669.3	12188	11737	0.828

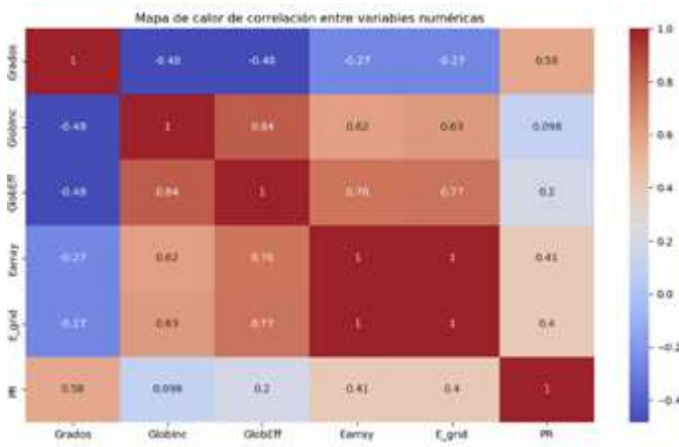


Figura 7: Mapa de calor de correlación entre variables clave del sistema fotovoltaico.

3.4. Análisis de varianza (ANOVA) y prueba de Tukey

Para verificar si las diferencias observadas en el rendimiento (PR) entre grupos de orientación son estadísticamente significativas, se aplicó un análisis de varianza (ANOVA) de un factor, seguido de la prueba post-hoc de Tukey para comparaciones múltiples (Figuras 8 y 9).

El ANOVA arrojó un estadístico $F = 36,91$ con $p = 5,53 \times 10^{-18}$, lo que confirma diferencias altamente significativas entre los distintos intervalos de orientación. Esto indica que el azimut tiene un efecto sistemático sobre el desempeño global, validando que el

```

=== ANOVA para PR ===
              df      sum_sq      mean_sq      F      PR(>F)
C(Grados_cat)  5.0    0.000104    2.000008e-05    36.918952    5.531989e-18
Residual       67.0    0.000038    5.635285e-07      NaN      NaN

```

Figura 8: Análisis de varianza (ANOVA) del rendimiento (PR) por grupos de orientación.

rendimiento del sistema no es homogéneo en todo el rango angular [26].

La prueba de Tukey permitió identificar qué grupos presentan diferencias estadísticamente relevantes. Los rangos de 120° – 180° y 180° – 240° exhiben los valores medios de PR más altos (0.830–0.831), mientras que las orientaciones 0° – 120° presentaron eficiencias menores (0.827–0.828). Esto demuestra que las orientaciones sureste y sur son las más favorables para las condiciones solares de Veracruz, resultado coherente con la trayectoria solar y la distribución estacional de irradiancia.

En general, el análisis estadístico confirma que el comportamiento del PR se alinea con el modelo polinómico previo y con los resultados de simulación en *PVsyst*, fortaleciendo la validez del método de optimización angular empleado [21, 22].

3.5. Modelo polinómico y optimización del rendimiento

El análisis de optimización se realizó a partir de los resultados estadísticos del rendimiento energético (PR) en función del ángulo de orientación. Con base en los valores obtenidos mediante *PVsyst*, se ajustó

Multiple Comparison of Means - Tukey HSD, FWER=0.05

group1	group2	meandiff	p-adj	lower	upper	reject
(-0.36, 60.0]	(60.0, 120.0]	-0.0001	0.9998	-0.001	0.0008	False
(-0.36, 60.0]	(120.0, 180.0]	-0.0005	0.5739	-0.0014	0.0004	False
(-0.36, 60.0]	(180.0, 240.0]	0.0018	0.0	0.0009	0.0026	True
(-0.36, 60.0]	(240.0, 300.0]	0.0029	0.0	0.002	0.0038	True
(-0.36, 60.0]	(300.0, 360.0]	0.0012	0.0029	0.0003	0.0021	True
(60.0, 120.0]	(120.0, 180.0]	-0.0004	0.7506	-0.0013	0.0005	False
(60.0, 120.0]	(180.0, 240.0]	0.0018	0.0	0.0009	0.0027	True
(60.0, 120.0]	(240.0, 300.0]	0.003	0.0	0.0021	0.0039	True
(60.0, 120.0]	(300.0, 360.0]	0.0012	0.0016	0.0004	0.0021	True
(120.0, 180.0]	(180.0, 240.0]	0.0022	0.0	0.0014	0.0031	True
(120.0, 180.0]	(240.0, 300.0]	0.0034	0.0	0.0025	0.0043	True
(120.0, 180.0]	(300.0, 360.0]	0.0017	0.0	0.0008	0.0026	True
(180.0, 240.0]	(240.0, 300.0]	0.0012	0.004	0.0003	0.0021	True
(180.0, 240.0]	(300.0, 360.0]	-0.0006	0.4092	-0.0015	0.0003	False
(240.0, 300.0]	(300.0, 360.0]	-0.0017	0.0	-0.0026	-0.0009	True

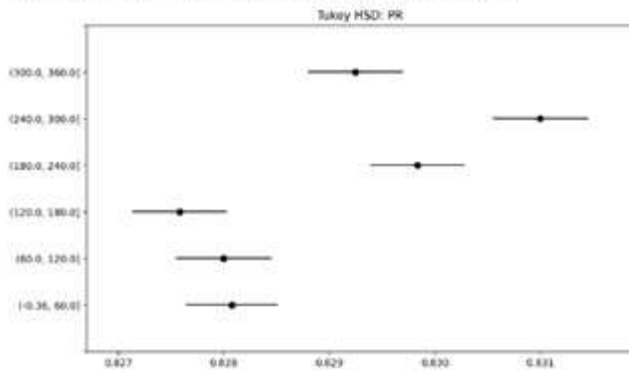


Figura 9: Comparaciones múltiples de Tukey para el rendimiento (PR) por orientación.

un modelo polinómico de sexto orden que describe la variación del PR con respecto al azimut (x), permitiendo representar la tendencia global y los puntos de máximo rendimiento. Este tipo de modelos son ampliamente utilizados en estudios de regresión aplicada a sistemas fotovoltaicos por su capacidad de capturar no linealidades asociadas a efectos de irradiancia y geometría solar [23, 22].

El modelo obtenido se expresa mediante la ecuación 2:

$$PR(x) = 2 \times 10^{-16}x^6 - 2 \times 10^{-13}x^5 + 6 \times 10^{-11}x^4 - 5 \times 10^{-9}x^3 - 3 \times 10^{-7}x^2 + 4 \times 10^{-5}x + 0.8275 \quad (2)$$

El coeficiente de determinación del modelo es $R^2 = 0.846$, lo que indica un ajuste adecuado entre los valores simulados y los valores predichos, confirmando que el modelo describe correctamente la tendencia angular del rendimiento.

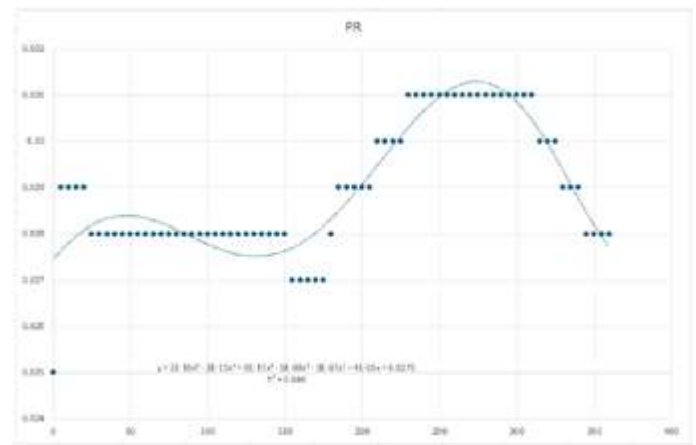


Figura 10: Curva polinómica ajustada para el rendimiento $PR(x)$ en función del azimut.

Una vez definido el modelo matemático, se aplicó el algoritmo *Flower Pollination Algorithm* (FPA) para determinar el máximo global del rendimiento dentro de un rango angular restringido. Este método metaheurístico, propuesto por Yang (2012) y ampliamente empleado en optimización energética por su rápida convergencia y simplicidad computacional, simula la polinización natural mediante balance entre exploración global y explotación local [27, 26].

El FPA se implementó en *MATLAB R2022a*, configurando una población de 80 soluciones y un máximo de 600 iteraciones. La función objetivo correspondió a la ecuación 2, limitada al dominio factible de 240° – 300° , donde se esperaba el máximo local según el análisis estadístico previo. Como resultado, se obtuvo un rendimiento máximo estimado de $PR_{\max} \approx 0.8318$ en $x \approx 267.3^\circ$.

La Figura 11 muestra la evolución del mejor valor de PR a lo largo de las iteraciones, evidenciando una rápida convergencia alrededor de la iteración 20, lo que indica estabilidad del algoritmo y la existencia de un máximo bien definido. Por su parte, la Figura 12 presenta la evolución del rendimiento promedio poblacional, donde se observa un incremento sostenido hasta alcanzar un estado de equilibrio, confirmando la efectividad del proceso de búsqueda global.

Finalmente, la Figura 13 muestra la función objetivo $PR(x)$ con la delimitación de la región factible (en verde) y el punto óptimo global identificado (en azul).

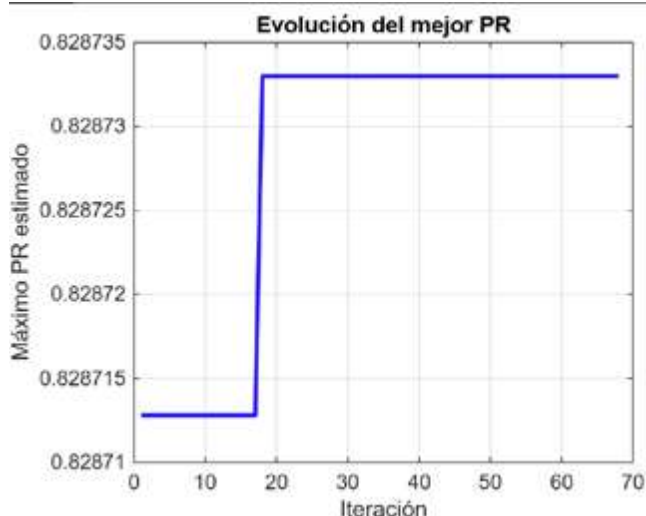


Figura 11: Evolución del mejor rendimiento (PR) por iteración durante la optimización FPA.

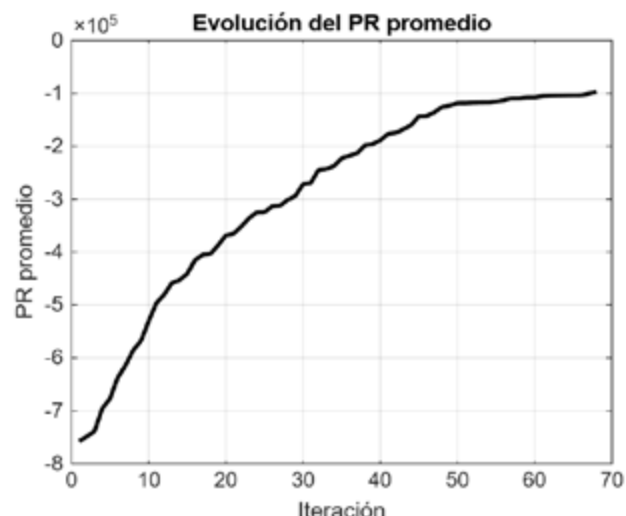


Figura 12: Evolución del rendimiento promedio poblacional (PR) durante la optimización.

La forma suave y unimodal del polinomio dentro del rango permitido facilita la búsqueda del máximo y demuestra que el valor de $x = 267,3^\circ$ corresponde efectivamente a la orientación más eficiente bajo las condiciones simuladas. Este resultado concuerda con el comportamiento esperado en zonas tropicales del hemisferio norte, donde ligeros desplazamientos hacia el suroeste pueden maximizar la captación solar anual [24, 25].

4. Discusión

La aplicación del algoritmo FPA sobre la función polinómica ajustada permitió automatizar la búsqueda del ángulo de orientación óptimo sin necesidad de generar nuevas simulaciones en PVsyst. A diferencia del análisis tradicional basado en tabulación de casos discretos, este enfoque ofrece una alternativa continua, capaz de explorar el espacio de soluciones con mayor resolución y eficiencia computacional. El modelo encontró un valor máximo de PR estimado de 0.8318 en la orientación 267.3° , consistente con el rango identificado estadísticamente como más eficiente. Esta coincidencia entre métodos fortalece la validez del modelo propuesto y lo posiciona como una herramienta confiable para la fase de diseño técnico. Además, la implementación de penalizaciones suaves permitió restringir la búsqueda dentro de márgenes realistas (240° – 300°), evitando resultados fuera de la zona óptima sin comprometer la exploración del algoritmo. Las gráficas generadas evidencian una rápida convergencia, mejora progresiva del promedio poblacional y estabilidad en el valor óptimo alcanzado, lo que respalda la elección del FPA como técnica bioinspirada eficaz para problemas de optimización univariable en ingeniería solar. Sin embargo, es importante reconocer que el modelo utilizado se basa en una función polinómica ajustada a datos simulados, por lo que su validez depende de la precisión de dichas simulaciones y de la representatividad del entorno modelado. Además, al centrarse únicamente en la variable azi-

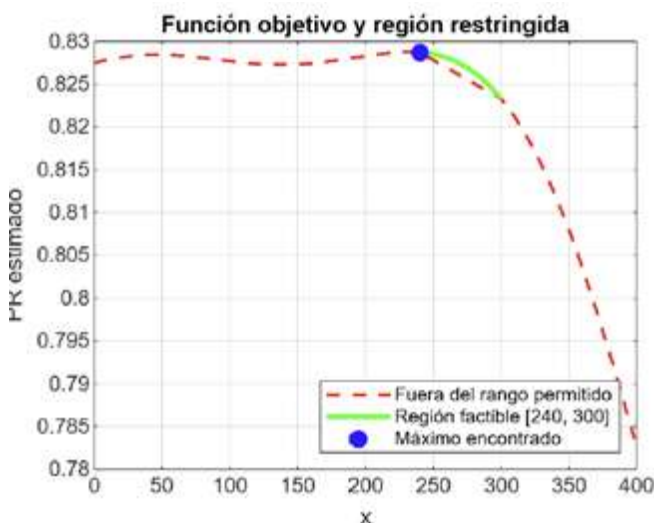


Figura 13: Función objetivo $PR(x)$ con región factible (verde) y óptimo global encontrado (punto azul).

Tabla 4: Comparación de trabajos recientes en optimización del posicionamiento y modelado digital de sistemas fotovoltaicos.

Autor / Año	Método o modelo	Características principales	Contribución / Limitaciones
Shirinyan et al. (2024) [28]	Modelado mediante ray tracing y análisis topográfico 3D	Evaluación del potencial solar urbano con modelado de radiación en entornos CAD 3D, considerando sombreados complejos a gran escala	Alta precisión espacial y representación geométrica, aunque con elevado costo computacional y dependencia de modelos urbanos detallados.
Zhou et al. (2024) [29]	Método estadístico de regresión multivariable	Ajuste empírico de la producción FV considerando irradiancia, inclinación y temperatura con datos de campo	Buen desempeño predictivo en entornos conocidos; limitado por su dependencia de calibración local y falta de extrapolación a nuevos escenarios.
Télesphore et al. (2025) [30]	Optimización mediante algoritmo genético (GA) y análisis GIS	Búsqueda simultánea de inclinación y orientación óptima con restricciones geométricas y climáticas locales	Cobertura multivariable con alta capacidad de exploración; sin embargo, requiere elevado tiempo de cómputo y ajuste del tamaño poblacional.
Angelova et al. (2024) [31]	Revisión de gemelos digitales aplicados a instalaciones FV	Integración de modelos CFD, monitoreo IoT y simulación en tiempo real para optimización energética	Visión integral del uso de gemelos digitales en energía solar; falta de estudios experimentales que validen el desempeño dinámico en campo.
Xiang et al. (2024) [32]	Modelo digital gemelo (DT) con red BiLSTM	Predicción a corto plazo de potencia FV combinando gemelo digital y aprendizaje profundo	Alta precisión predictiva en condiciones variables; limitada aplicabilidad en sistemas sin infraestructura de datos en tiempo real.
Este trabajo	Modelado computacional con función polinómica ajustada y optimización FPA	Búsqueda automatizada del ángulo azimutal óptimo sin simulaciones adicionales en PVsyst; penalización suave dentro del rango 240°–300°	Menor tiempo de cómputo y coincidencia con el PR máximo (0.8318); limitado a una variable pero con potencial de extensión multivariable y aplicación con datos reales.

Nota. Comparación entre diferentes enfoques de optimización y modelado digital aplicados a sistemas fotovoltaicos, considerando precisión, costo computacional y aplicabilidad industrial.

mutal con inclinación fija, se limita la aplicabilidad del algoritmo en escenarios donde múltiples parámetros interactúan simultáneamente. Para mitigar esta limitación, se propone extender el enfoque hacia modelos multivariantes que integren inclinación, climatología local, y tipo de tecnología fotovoltaica, así como aplicar la optimización sobre datos reales en campo, con el fin de fortalecer la transferencia del modelo hacia aplicaciones operativas.

El análisis comparativo de la Tabla 4 muestra que los métodos basados en simulación geométrica (ray tracing) y gemelos digitales ofrecen una alta precisión espacial, aunque con elevados requerimientos de hardware y tiempos de procesamiento. En contraste, los enfoques heurísticos como los algoritmos genéticos o el FPA permiten explorar el espacio de búsqueda

con mayor eficiencia, reduciendo la necesidad de simulaciones sucesivas.

El modelo propuesto combina simplicidad y precisión al utilizar una función polinómica ajustada que actúa como metamodelo, permitiendo la evaluación continua del rendimiento sin depender de herramientas externas. Si bien su alcance actual se limita a la variable azimutal, su coherencia con los resultados estadísticos y el potencial de ampliación multivariable respaldan su aplicabilidad como herramienta de apoyo en el diseño técnico de instalaciones fotovoltaicas en terrenos irregulares.

5. Conclusión

Este proyecto logró desarrollar e implementar un modelo computacional predictivo para optimizar la

orientación de sistemas fotovoltaicos en contextos con geometría de terreno irregular, utilizando simulaciones detalladas en PVsyst y técnicas avanzadas de análisis estadístico y computacional. Se cumplieron plenamente los objetivos establecidos, al demostrar que el ángulo azimutal influye significativamente en la eficiencia energética del sistema, validado tanto desde una perspectiva técnica como estadística y económica. La incorporación de un algoritmo de optimización bioinspirado (FPA), operando sobre una función polinómica ajustada del PR, permitió automatizar la búsqueda del ángulo óptimo de orientación sin necesidad de realizar simulaciones adicionales. El modelo identificó una orientación ideal de aproximadamente 267.3° , asociada a un PR estimado de 0.8318, dentro de una región factible definida por criterios de desempeño. Esta coincidencia entre los métodos estadísticos, simulados y computacionales, demuestra la consistencia del enfoque propuesto y su utilidad práctica como apoyo en la toma de decisiones de diseño técnico. Como siguiente paso, se propone ampliar el modelo hacia una estructura multivariable que considere parámetros adicionales como la inclinación del sistema, condiciones climatológicas locales y tipo de tecnología fotovoltaica utilizada. También se recomienda validar el algoritmo con datos reales en campo, para fortalecer su aplicabilidad en proyectos de ingeniería solar con relevancia social y económica.

Referencias

- [1] N. Rehman, M. Uzair, and U. Allauddin, "An optical-energy model for optimizing the geometrical layout of solar photovoltaic arrays in a constrained field," *Renewable Energy*, vol. 149, pp. 55–65, 2020.
- [2] N. Mignoni, R. Carli, and M. Dotoli, "Layout optimization for photovoltaic panels in solar power plants via a minlp approach," *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 2023.
- [3] Q. Zhong and D. Tong, "Spatial layout optimization for solar photovoltaic (pv) panel installation," *Renewable Energy*, vol. 150, pp. 1–11, 2020.
- [4] C.-V. Strejoiu, M. Osman, C. Panait, G. Lăzăroiu, and D. Stoica, "Optimizing solar photovoltaic systems: A geometric approach to enhance energy production and economic viability," 2024 *Advanced Topics on Measurement and Simulation (ATOMS)*, pp. 453–456, 2024.
- [5] C. Vassiliades, R. Agathokleous, G. Barone, C. Forzano, G. Giuzio, A. Palombo, A. Buonomano, and S. Kalogirou, "Building integration of active solar energy systems: A review of geometrical and architectural characteristics," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2022.
- [6] K. Kuterbekov, A. Kabyshev, K. Bekmyrza, M. M. Kubenova, and A. Ayalew, "How can solar panels collectors enhance energy efficiency? utilization of the novel optimization techniques," *International Journal of Low-Carbon Technologies*, 2024.
- [7] M. Naraghi and E. Atefi, "Optimum solar panel orientation and performance: A climatic data-driven metaheuristic approach," *Energies*, 2022.
- [8] G. Hailu and A. Fung, "Optimum tilt angle and orientation of photovoltaic thermal system for application in greater toronto area, canada," *Sustainability*, 2019.
- [9] K. E. N'tsoukpoe, "Effect of orientation and tilt angles of solar collectors on their performance: analysis of the relevance of general recommendations in the west and central african context," *Scientific African*, 2021.
- [10] S. Yoon, J. Park, C. Lee, S. Kim, Y. Choi, S. Kwak, H. Kim, and J. Kim, "Optimal orientation of solar panels for multi-apartment buildings," *Mathematics*, 2023.
- [11] M. Nfaoui and K. El-hami, "Optimal tilt angle and orientation for solar photovoltaic arrays: case of settat city in morocco," *International Journal of Ambient Energy*, vol. 41, pp. 214 – 223, 2020.
- [12] E. A. Martínez, H. Ríos, and M. Mera, "Robust tracking control design for unicycle mobile robots with input saturation," *Control Engineering Practice*, vol. 107, p. 104676, 2021.
- [13] B. Amiri, A. Gómez-Orellana, P. A. Gutiérrez, R. Dizène, C. Hervás-Martínez, and K. Dahmani, "A novel approach for global solar irradiation forecasting on tilted plane using hybrid evolutionary neural networks," *Journal of Cleaner Production*, vol. 287, p. 125577, 2021.

- [14] H. Atoui, O. Sename, V. Milanés, and J. Martínez, "Lpv-based autonomous vehicle lateral controllers: A comparative analysis," *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, vol. 23, pp. 13570–13581, 2022.
- [15] R. Jaiswal, M. Martínez-Ramón, and T. Busani, "Recent advances in silicon solar cell research using data science-based learning," *IEEE Journal of Photovoltaics*, vol. 13, pp. 2–15, 2023.
- [16] L. M. Fernández-Ahumada, J. Ramírez-Faz, R. López-Luque, M. Varo-Martínez, I. Moreno-García, and F. C. D. L. Torre, "A novel backtracking approach for two-axis solar pv tracking plants," *Renewable Energy*, vol. 145, pp. 1214–1221, 2020.
- [17] F. J. Gómez-Uceda, J. Ramírez-Faz, M. V. Martínez, and L. M. Fernández-Ahumada, "New omnidirectional sensor based on open-source software and hardware for tracking and backtracking of dual-axis solar trackers in photovoltaic plants," *Sensors (Basel, Switzerland)*, vol. 21, 2021.
- [18] E. Dulce-Chamorro and F. J. M. de Pisón, "An advanced methodology to enhance energy efficiency in a hospital cooling-water system," *Journal of building engineering*, vol. 43, p. 102839, 2021.
- [19] L. Carrasco, D. Ramos, and D. Montoro, "Optimal sizing of pv inverters considering dc/ac ratio and performance ratio indicators," *Renewable Energy*, vol. 139, pp. 1201–1211, 2019.
- [20] H. A. Kazem and A. H. Al-Badi, "Analysis of inverter sizing and performance ratio in grid-connected pv systems under desert conditions," *Energy Reports*, vol. 6, pp. 130–138, 2020.
- [21] A. Sharma, P. Tiwari, and D. Chauhan, "Multi-mppt topologies for partial shading mitigation in pv systems: A review," *Solar Energy*, vol. 221, pp. 530–548, 2021.
- [22] A. Diab, M. Abdel-Salam, and A. Ahmed, "Performance assessment of small-scale grid-tied pv systems in different climatic conditions," *Journal of Cleaner Production*, vol. 312, p. 127708, 2021.
- [23] S. Javed, Z. Ali, and S. Akhtar, "Impact of tilt and azimuth angle optimization on pv system performance in tropical climates," *Energy Conversion and Management*, vol. 205, p. 112400, 2020.
- [24] J. Santos, C. Rueda, and G. López, "Assessment of solar resource and pv system performance using satellite-based data in mexico," *Solar Energy*, vol. 241, pp. 321–333, 2022.
- [25] C. A. Ramos, M. G. Villalva, and J. R. Gazoli, "Long-term analysis of performance ratio in fixed-tilt pv systems under tropical climate conditions," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 149, p. 111365, 2021.
- [26] R. Kumar, R. Singh, and A. Bansal, "Performance evaluation of grid-connected photovoltaic systems in warm humid climates," *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, vol. 56, p. 102882, 2023.
- [27] J. Zhao, X. S. Yang, and M. Karamanoglu, "A review of nature-inspired optimization algorithms for engineering applications," *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, vol. 91, p. 103585, 2020.
- [28] E. Shirinyan, M. Stöckl, C. Kunze, and A. Afshari, "Large-scale solar potential analysis in a 3d cad environment: City-scale modelling of solar incident radiation for multifactor urban shading," *Remote Sensing*, vol. 16, no. 15, p. 2700, 2024.
- [29] H. Zhou, Y. Zhu, B. Liu, and X. Zhao, "Comprehensive evaluation methods for photovoltaic output forecasting: A case study in china," *Renewable Energy*, vol. 230, p. 120038, 2024.
- [30] N. C. Télesphore, A.-G. M. Richy, Z. Fiacre, K. Melhyas, D. K. B. Audace, A. D. Pierre, A. Isaac, S. G. Clarence, and F. François-Xavier, "Gis-based optimization of photovoltaic panel orientation in benin using genetic algorithms and k-means clustering," *Solar Compass*, p. 100142, 2025.
- [31] D. D. Angelova, D. C. Fernández, M. C. Godoy, J. A. Moreno, and J. F. G. González, "A review on digital twins and its application in the modeling of photovoltaic installations," *Energies*, vol. 17, no. 5, p. 1227, 2024.

- [32] C. Xiang, Y. Li, S. Wang, and T. Zhang, “Short-term photovoltaic power prediction based on a novel digital twin model and bilstm,” *Journal of Marine Science and Engineering*, vol. 12, no. 7, p. 1219, 2024.

