

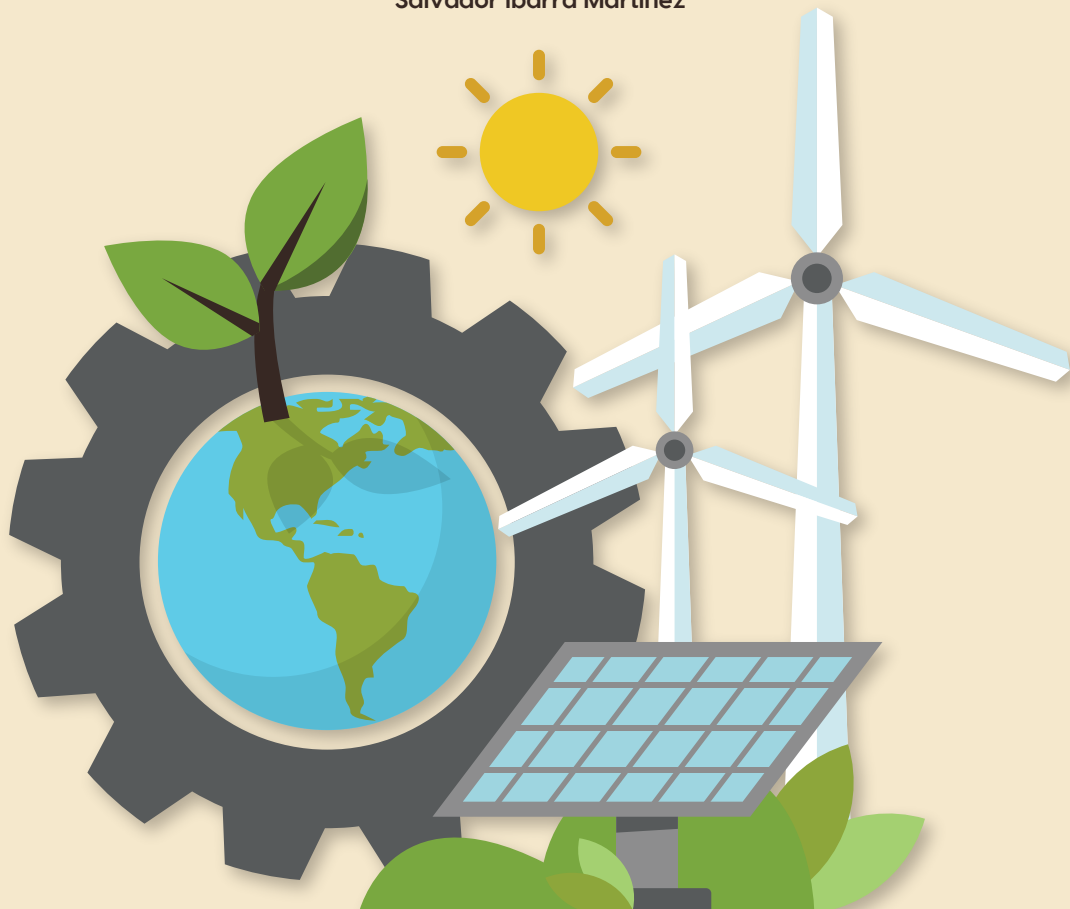
editorial
fontamara



VERDAD, BELLEZA, PROBIIDAD

Innovación para una ingeniería sostenible

Coordinadores:
Roberto Pichardo Ramírez
Esperanza Martínez Cano
Rocío del Carmen Vargas Castilleja
Salvador Ibarra Martínez



INNOVACIÓN PARA UNA INGENIERÍA SOSTENIBLE

Innovación para una ingeniería sostenible / Roberto Pichardo Ramírez, Esperanza Martínez Cano, Rocío del Carmen Vargas Castilleja, Salvador Ibarra Martínez, coordinadores.—Cd. Victoria, Tamaulipas : Universidad Autónoma de Tamaulipas; Ciudad de México: Editorial Fontamara, 2025. 137 págs. ; 17 x 23 cm.

1. Temas especiales de tecnología

LC: TA177.4 I5.6 2025

DEWEY: 604 TBC

Universidad Autónoma de Tamaulipas
Matamoros SN, Zona Centro
Ciudad Victoria, Tamaulipas C.P. 87000
D. R. © 2025

Consejo de Publicaciones UAT
Centro Universitario Victoria
Centro de Gestión del Conocimiento. Segundo Piso
Ciudad Victoria, Tamaulipas, México. C.P. 87149
Tel. (52) 834 3181-800 • extensión: 2905
cpublicaciones@uat.edu.mx • www.uat.edu.mx • https://libros.uat.edu.mx/

Libro aprobado por el Consejo de Publicaciones UAT
ISBN UAT: 978-607-69291-2-4

Editorial Fontamara, S.A. de C.V.
Av. Hidalgo No. 47-B, Colonia Del Carmen
Alcaldía de Coyoacán, 04100, CDMX, México
Tels. 555659-7117 y 555659-7978
contacto@fontamara.com.mx • coedicion@fontamara.com.mx • www.fontamara.com.mx
ISBN Fontamara: 978-968-9729-25-9

Se prohíbe la reproducción total o parcial de esta obra incluido el diseño tipográfico y de portada, sea cual fuera el medio, electrónico o mecánico, sin el consentimiento del Consejo de Publicaciones UAT.

Libro digital

Esta obra y sus capítulos fueron sometidos a una revisión de pares a doble ciego, la cual fue realizada por especialistas pertenecientes al Sistema Nacional de Investigadoras e Investigadores. Asimismo, fueron aprobados para su publicación por el Consejo de Publicaciones de la Universidad Autónoma de Tamaulipas y el Comité Interno de la editorial Fontamara.



INNOVACIÓN PARA UNA INGENIERÍA SOSTENIBLE

Roberto Pichardo Ramírez
Esperanza Martínez Cano
Rocío del Carmen Vargas Castilleja
Salvador Ibarra Martínez

COORDINADORES





MVZ MC Dámaso Leonardo Anaya Alvarado
PRESIDENTE

Dr. Fernando Leal Ríos
VICEPRESIDENTE

Dra. Dora María Lladó Lárraga
SECRETARIA TÉCNICA

Mtro. Eduardo García Fuentes
VOCAL

Dra. Rosa Issel Acosta González
VOCAL

CP Jesús Francisco Castillo Cedillo
VOCAL

MVZ Rogelio de Jesús Ramírez Flores
VOCAL

Comité Editorial del Consejo de Publicaciones de la Universidad Autónoma de Tamaulipas

Dra. Lourdes Arizpe Slogher • Universidad Nacional Autónoma de México | **Dr. Amalio Blanco** • Universidad Autónoma de Madrid, España | **Dra. Rosalba Casas Guerrero** • Universidad Nacional Autónoma de México | **Dr. Francisco Díaz Bretones** • Universidad de Granada, España | **Dr. Rolando Díaz Lowing** • Universidad Nacional Autónoma de México | **Dr. Manuel Fernández Ríos** • Universidad Autónoma de Madrid, España | **Dr. Manuel Fernández Navarro** • Universidad Autónoma Metropolitana, México | **Dra. Juana Juárez Romero** • Universidad Autónoma Metropolitana, México | **Dr. Manuel Marín Sánchez** • Universidad de Sevilla, España | **Dr. Cervando Martínez** • University of Texas at San Antonio, E.U.A. | **Dr. Darío Páez** • Universidad del País Vasco, España | **Dra. María Cristina Puga Espinosa** • Universidad Nacional Autónoma de México | **Dr. Luis Arturo Rivas Tovar** • Instituto Politécnico Nacional, México | **Dr. Aroldo Rodrigues** • University of California at Fresno, E.U.A. | **Dr. José Manuel Valenzuela Arce** • Colegio de la Frontera Norte, México | **Dra. Margarita Velázquez Gutiérrez** • Universidad Nacional Autónoma de México | **Dr. José Manuel Sabucedo Cameselle** • Universidad de Santiago de Compostela, España | **Dr. Alessandro Soares da Silva** • Universidad de São Paulo, Brasil | **Dr. Akexandre Dorna** • Universidad de CAEN, Francia | **Dr. Ismael Vidales Delgado** • Universidad Regiomontana, México | **Dr. José Francisco Zúñiga García** • Universidad de Granada, España | **Dr. Bernardo Jiménez** • Universidad de Guadalajara, México | **Dr. Juan Enrique Marciano Medina** • Universidad de Puerto Rico-Humacao | **Dra. Ursula Oswald** • Universidad Nacional Autónoma de México | **Arq. Carlos Mario Yori** • Universidad Nacional de Colombia | **Arq. Walter Debenedetti** • Universidad de Patrimonio, Colonia, Uruguay | **Dr. Andrés Piqueras** • Universitat Jaume I, Valencia, España | **Dra. Yolanda Troyano Rodríguez** • Universidad de Sevilla, España | **Dra. María Lucero Guzmán Jiménez** • Universidad Nacional Autónoma de México | **Dra. Patricia González Aldea** • Universidad Carlos III de Madrid, España | **Dr. Marcelo Urra** • Revista Latinoamericana de Psicología Social | **Dr. Rubén Ardila** • Universidad Nacional de Colombia | **Dr. Jorge Gissi** • Pontificia Universidad Católica de Chile | **Dr. Julio F. Villegas †** • Universidad Diego Portales, Chile | **Ángel Bonifaz Ezeta †** • Universidad Nacional Autónoma de México

Índice

- Capítulo 1.** Viabilidad técnica y ambiental del uso de pavimento asfáltico recuperado (RAP) como reemplazo del agregado mineral en mezclas asfálticas **9**
Juana Treviño Trujillo
Luis Álvaro Zavala Guerrero
Raúl Alejandro Morales Rivera
- Capítulo 2.** Optimización de hiperparámetros a red LSTM para pronóstico de ventas de una maderería en Tamaulipas **21**
Hyasseliny Alejandra Hurtado Mora
Alejandro Humberto García
Luis Jonás González del Ángel
- Capítulo 3.** Determinantes de la obesidad infantil en una escuela pública: un análisis mediante regresión logística binaria **39**
Dionicio Morales Ramírez
- Capítulo 4.** Hacia la reducción de emisiones de dióxido de carbono: optimización energética en planta STYROPEK Altamira **49**
Elvira Rolón Aguilar
Julio Cesar Pérez Deantes
Roberto Pichardo Ramírez

Capítulo 5. Biodigestores, una alternativa para el mejoramiento de la calidad de vida de los habitantes de zonas rurales en Veracruz **63**

Jannya Pancardo Pérez

María Dolores Gracia Guzmán

Julio Mar Ortiz

Capítulo 6. Análisis: implementación de la economía circular en la gestión industrial mediante sistemas de información **73**

José Luis Martínez Navarro

Paulina Fernández Izaguirre

Jesús Salvador Segura Morales

Capítulo 7. Monitoreo de la línea de costa en playa Velamar con DSAS y topografía GNSS **87**

María Luisa Berenice Benito Díaz

Esperanza Martínez Cano

Héctor Orlando Sánchez Velázquez

Capítulo 8. Medición de vivienda adecuada en Tamaulipas y entidades federativas a través de un indicador integrado **99**

Elda Margarita Hernández Rejón

Raúl Treviño Hernández

Jhonny Naim Manríquez García

Capítulo 9. Estimación de la configuración del lecho lacustre de la Laguna 3 de Mayo, Altamira, Tamaulipas **115**

Susan Margarita Maldonado Robert

Dora María Esther González Turrubiates

Marcos Nahum Gregorio Barranco

Capítulo 10. Evaluación multicriterio de sostenibilidad urbana en Ciudad Madero, Tamaulipas, México **125**

Yuridia Azucena Salmerón-Gallardo

Roberto Pichardo-Ramírez

Capítulo 1

Viabilidad técnica y ambiental del uso de pavimento asfáltico recuperado (RAP) como reemplazo del agregado mineral en mezclas asfálticas

Juana Treviño Trujillo¹
Luis Álvaro Zavala Guerrero¹
Raúl Alejandro Morales Rivera²

Resumen

El acelerado desarrollo de las sociedades modernas ha provocado un incremento considerable en la demanda de vías terrestres de comunicación, lo que conlleva a una mayor explotación de recursos no renovables como los agregados pétreos y los materiales asfálticos. En este contexto, la tecnología de reciclaje de pavimentos asfálticos recuperados (RAP, por sus siglas en inglés) es una alternativa sustentable para reutilizar estos materiales en la rehabilitación de carreteras. El objetivo de esta investigación ha sido evaluar la viabilidad técnica y ambiental del uso de 100 % de RAP como reemplazo del agregado mineral en mezclas asfálticas. Se recolectaron muestras de RAP de cinco ubicaciones diferentes en los estados de Tamaulipas y Veracruz (México). Estas muestras fueron caracterizadas mediante análisis granulométrico y determinación del contenido de asfalto. Posteriormente, se elaboraron y ensayaron especímenes de mezcla asfáltica con 100 % de RAP, adicionando diferentes tipos de asfalto como rejuvenecedor, evaluando sus propiedades mecánicas de estabilidad, flujo y contenido de vacíos, de acuerdo con la normativa vigente. Los resultados demostraron que las mezclas con 100 % de RAP cumplieron con los requisitos técnicos establecidos, con valores de estabilidad

¹ Profesores-investigadores de la Facultad de Ingeniería Tampico (FI), Universidad Autónoma de Tamaulipas. jmtrevino@docentes.uat.edu.mx, lazavala@docentes.uat.edu.mx

² Profesor de Horario Libre de la Facultad de Ingeniería Tampico (FI), Universidad Autónoma de Tamaulipas. ramorales@uat.edu.mx

y flujo dentro de los rangos aceptables. Se concluye que el uso de 100 % de RAP como reemplazo del agregado mineral en mezclas asfálticas es técnicamente viable y ambientalmente sostenible, al mitigar sus impactos asociados a la explotación de recursos naturales, representando una alternativa prometedora para la rehabilitación de pavimentos en México.

Palabras clave: sustentabilidad, pavimento asfáltico, vías terrestres.

Introducción

En las últimas décadas, el acelerado desarrollo de las sociedades modernas ha provocado un incremento considerable en la demanda de vías terrestres de comunicación. Esta situación ha llevado a una mayor explotación de recursos como los agregados pétreos y los cementos asfálticos, materiales fundamentales en la construcción de pavimentos (Kumari et al., 2019). Sin embargo, la obtención de estos materiales vírgenes se vuelve cada vez más complicada e implica la sobreexplotación de recursos que lamentablemente no son renovables (Mohammad et al., 2018).

En este contexto, la tecnología RAP es una alternativa sustentable para reutilizar estos materiales en la rehabilitación de carreteras. Esta es una capa asfáltica existente en un pavimento que ha sido retirada mediante procesos de fresado o demolición para ser triturada y aprovechada como agregado pétreo en nuevas mezclas del mismo tipo (Romeo et al., 2019).

El uso del RAP presenta múltiples beneficios, tanto a nivel técnico como ambiental (Al-Qadi et al., 2007). Desde el punto de vista técnico, puede ser utilizado como reemplazo parcial o total del agregado mineral en la elaboración de nuevas mezclas asfálticas, lo que permite conservar las propiedades mecánicas del pavimento y reducir los costos de construcción (Copeland, 2011). Además, su reciclaje disminuye la necesidad de explotación de bancos de material virgen, evitando los impactos asociados como el uso de explosivos, el ruido y las emisiones de gases (Hajj et al., 2009).

A pesar de las ventajas del reciclaje de RAP, en México esta práctica aún no se ha consolidado. Existe una brecha en el conocimiento sobre el desempeño de mezclas asfálticas elaboradas con 100 % de RAP, lo que limita su adopción a gran escala. Por lo tanto, el objetivo de esta investigación es evaluar la viabilidad técnica y ambiental del uso de 100 % de RAP como reemplazo del agregado mineral en mezclas asfálticas (Sánchez et al., 2013).

Metodología

La metodología de esta investigación se basó en una revisión bibliográfica exhaustiva sobre el manejo de residuos sólidos asfálticos (RSA) y el diseño de mezclas asfálticas, seguida por trabajo de campo en el que se identificaron sitios de recuperación de RAP. Se empleó la Metodología Marshall (IMT, 2016) para diseñar mezclas asfálticas, utilizando 100 % de RAP como agregado pétreo. Se llevaron a cabo ensayos de laboratorio para caracterizar los cementos asfálticos recuperados, siguiendo la normativa de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT) (Garnica y Díaz, 2004). Además, se realizaron pruebas de estabilidad y flujo en mezclas asfálticas con diferentes tipos de asfalto, incluyendo asfalto virgen y modificado, evaluando su rendimiento según el *Performance Grading* (PG). Finalmente, se desarrolló y propuso una metodología para la minimización de RSA, dividida en seis fases.

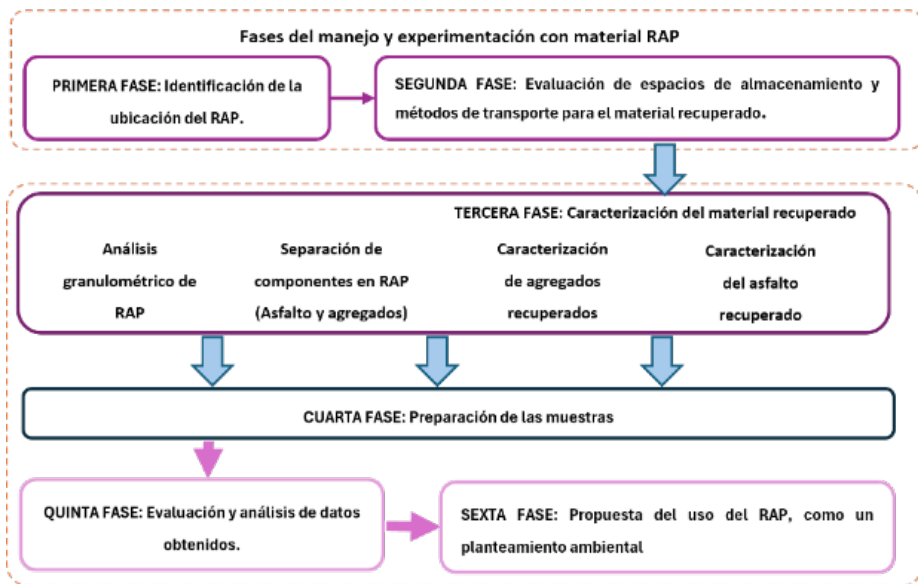


Figura 1. Fases del manejo y experimentación con material RAP

Fuente: elaboración propia.

Recolección y caracterización de muestras de RAP

Se recolectaron muestras de RAP de cinco ubicaciones diferentes, ubicadas en los estados de Tamaulipas y Veracruz en México.



Figura 2. Recolección de muestras en tramo de la carretera Tampico-Mante, km 49 del poblado de Esteros en Altamira, Tamaulipas

Fuente: autoría propia.

12

En cada sitio, se realizó el muestreo del material recuperado del proceso de fresado de la carpeta asfáltica, siguiendo los lineamientos de la norma M-MMP-4-04-001/02 de la SCT de México. Las muestras de RAP obtenidas fueron sometidas a los siguientes análisis de caracterización:

1. Análisis granulométrico: se determinó la distribución de tamaños de partícula del RAP, de acuerdo con la norma NMX-C-111-ONNCCE-2013.
2. Contenido de asfalto: se cuantificó el porcentaje de cemento asfáltico presente en el RAP, mediante el ensayo de extracción con solvente, según la norma NMX-C-497-ONNCE-2014.

Los resultados de estas pruebas de caracterización permitieron conocer las propiedades físicas iniciales de las muestras de RAP recolectadas (Tabla 1 y Figura 3).

Tabla 1. Resultados de la granulometría y contenido de asfalto de las muestras de RAP

Composición granulométrica							
Malla N°	MAall (mm)	Muestra de material recuperado, pavimento asfáltico					Especificación
		González-Hidalgo km 15+600	Tampico-Mante, km 49	Calle Chairel, Col. Pescadores	Estac. Fac. de Ingeniería, Tampico	Puente el Prieto, C. Anáhuac	
1"	25	98.00	100.00	100.00	100.00	88.50	100
¾"	19	92.00	100.00	92.00	94.00	79.80	100
½"	12.5	85.00	91.55	66.00	83.00	65.00	90-100
3/8"	9.5	80.00	71.22	51.00	74.00	53.80	76-90
¼"	6.3	74.00	55.27	34.00	59.00	38.80	56-69
4	4.75	70.00	49.29	26.00	50.00	31.90	45-59
10	2	60.00	39.78	8.00	31.00	15.70	25-35
20	0.85	48.00	30.35	3.00	21.00	8.60	15-22
40	0.425	20.00	16.05	1.00	13.00	3.90	11-16
60	0.25	5.00	11.54	1.00	10.00	2.40	8-13
100	0.15	1.00	4.33	0.00	3.00	1.00	5-10
200	0.075	0.50	1.60	0.00	1.00	0.40	2-6

Fuente: elaboración propia.

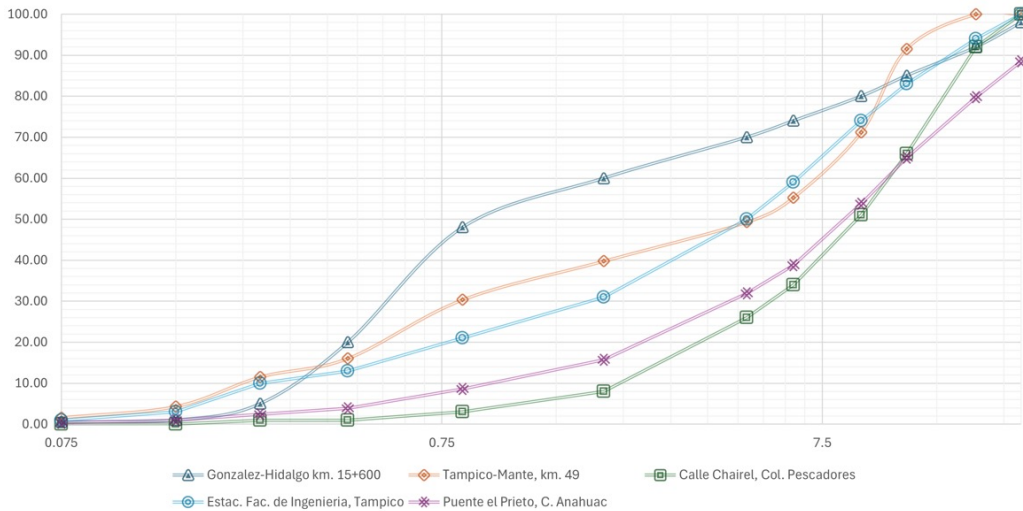


Figura 3. Curvas granulométricas de las muestras de RAP

Fuente: elaboración propia.

Elaboración y evaluación de especímenes con 100 % RAP

Con base en los resultados de caracterización (Garnica y Díaz, 2005), se elaboraron y evaluaron especímenes de mezcla asfáltica utilizando 100 % de RAP como reemplazo del agregado mineral. El procedimiento fue el siguiente:

1. Preparación de las muestras: el material RAP fue cribado por la malla de 1 pulgada (25 mm) para eliminar las partículas de mayor tamaño y asegurar la homogeneidad de la muestra.
2. Diseño de mezclas: se elaboraron especímenes Marshall con 100 % de RAP, adicionando diferentes tipos de asfalto como rejuvenecedor, en proporciones del 4 % en peso. Los asfaltos utilizados fueron:
 - Asfalto virgen
 - Asfalto modificado con elastómeros
 - Asfaltos de grado de desempeño PG 70-16, PG 76-16 y PG 82-16
3. Ensayos de laboratorio: los especímenes fueron sometidos a pruebas de laboratorio para determinar sus propiedades mecánicas, de acuerdo con la norma N-CMT-4-05-003-16 de la SCT:
 - Estabilidad Marshall (kg)
 - Flujo Marshall (mm)
 - Contenido de vacíos (%)

Los resultados de estos ensayos se compararon con los requisitos establecidos en la normativa vigente, con el fin de evaluar la viabilidad técnica del uso de 100 % de RAP en mezclas asfálticas.

Análisis de la viabilidad ambiental

Adicionalmente, se realizó una evaluación cualitativa del potencial de minimización de residuos sólidos asfálticos y mitigación de impactos ambientales asociados al uso de RAP, en comparación con la explotación de agregados vírgenes. Para ello, se consideraron aspectos ambientales relevantes, como el ahorro de recursos naturales, la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero y una disminución en la disposición de residuos asfálticos. Con la información obtenida en las etapas anteriores, se elaboró una propuesta integral para el manejo y aprovechamiento del RAP, considerando aspectos técnicos, ambientales y de gestión, que permitan promover su utilización en la rehabilitación de pavimentos en México.

Resultados y discusión

Caracterización de las muestras de RAP

Los resultados de los análisis de caracterización de las muestras de RAP recolectadas en los cinco sitios de estudio se presentaron en la Tabla 1 y Figura 1. Si bien la norma NMX-C-111-ONNCCE-2013 establece los requisitos granulométricos para mezclas asfálticas elaboradas con agregados vírgenes, las muestras de RAP analizadas presentaron una distribución de tamaños de partícula ligeramente fuera de esos parámetros, lo cual es esperable (Garnica y Díaz, 2004), ya que el material granular caracterizado proviene de la trituración de una mezcla asfáltica existente, cuya granulometría no necesariamente cumple con los requisitos para agregados nuevos. No obstante, los valores obtenidos se mantuvieron dentro de intervalos aceptables, lo que sugiere la posibilidad de reutilizar este material recuperado como sustituto del agregado mineral, considerando un tamaño nominal máximo de 25 mm. Respecto al contenido de asfalto, los valores oscilaron entre 3.46 % y 7.35 %, lo que indica la necesidad de adicionar rejuvenecedores para reincorporar estas muestras a nuevas mezclas asfálticas.

Desempeño de las mezclas con 100 % de RAP

Los resultados de los ensayos realizados a los especímenes elaborados 100 % con RAP y adicionados con diferentes tipos de asfalto, se presentan en la Tabla 2.

Tabla 2. Resultados de los especímenes con 100 % RAP y 4 % de asfalto adicionado

Características de la mezcla	Asfalto emulsionado. Carretera González-Hidalgo	Asfalto PG 82-16. Carretera Tampico-Mante	Asfalto PG 76-16. Calle Chairel	Asfalto virgen. Estacionamiento FIUAT	Asfalto PG 70-16. Carretera Puente Prieto-Anáhuac	Especificación
						N-CMT-4-05-003-16
Contenido óptimo de la mezcla (%)	✓	✓	✓	✓	✓	Dato informativo
Peso específico (kg/m ³)	2168	2369	2351	2257	2235	-
Vacios (%)	7.27	3.79	4.5	4.08	5.5	3-5
VMA (%)	10.74	10.67	11.35	12.5	11.26	14 mín.
VFA (%)	79.23	82.49	76.97	67.39	75.98	65-75
Estabilidad (kg)	871.7	952	1090	1015	1272	817 mín.
Flujo (mm)	6.9	8	8	4.09	4.4	2-3.5

Características de la mezcla	Asfalto emulsionado. Carretera González-Hidalgo	Asfalto PG 82-16. Carretera Tampico-Mante	Asfalto PG 76-16. Calle Chairel	Asfalto virgen. Estacionamiento FIUAT	Asfalto PG 70-16. Carretera Prieto-Anáhuac	Especificación
						N-CMT-4-05-003-16
Espécimen compactado con 75 golpes	✓	✓	✓	✓	✓	
Temperatura de compactación (°C)	160	160	160	160	160	

Fuente: elaboración propia.

Los datos muestran que las mezclas asfálticas elaboradas con 100 % de RAP y diferentes tipos de asfalto como rejuvenecedor cumplieron con los requisitos de estabilidad contenido de vacíos establecidos en la norma N-CMT-4-05-003-16 de la SCT (Figuras 4-7). Esto demuestra la viabilidad técnica del uso de RAP como reemplazo total del agregado mineral en la elaboración de nuevas mezclas asfálticas.

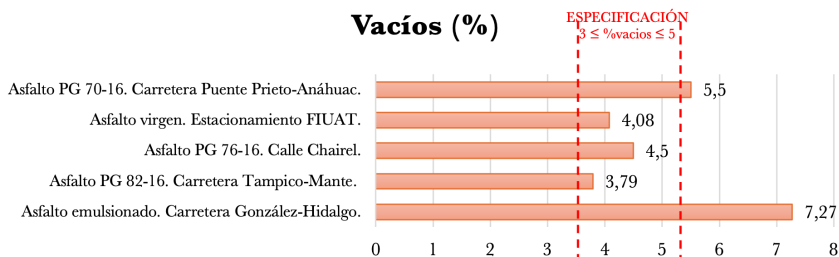


Figura 4. Porcentaje de vacíos de aire en la mezcla de los especímenes

Fuente: elaboración propia.

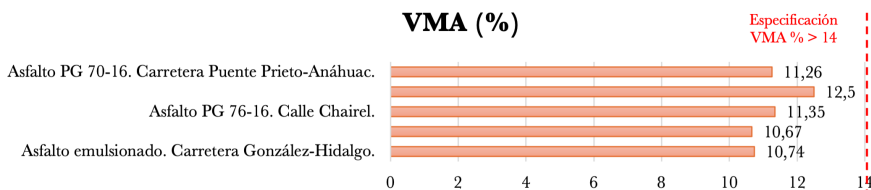


Figura 5. Volumen de vacíos en el agregado mineral

Fuente: elaboración propia.

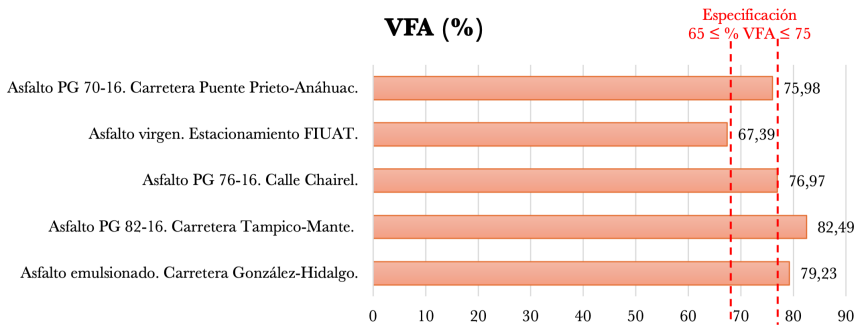


Figura 6. Volumen de vacíos llenos con asfalto

Fuente: elaboración propia.

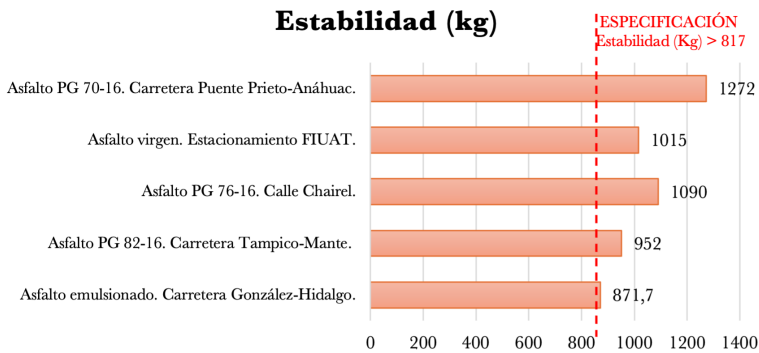


Figura 7. Flujo Marshall

Fuente: elaboración propia.

Además de los beneficios técnicos, presenta ventajas ambientales significativas (Zaumanis et al., 2014). Al reutilizar este material, se reduce la necesidad de explotar bancos de agregados vírgenes, evitando los impactos asociados a estas actividades, como el uso de explosivos, el ruido y las emisiones de gases. Asimismo, el reciclaje del RAP disminuye la cantidad de residuos sólidos asfálticos que de otra manera tendrían que ser dispuestos en rellenos sanitarios o sitios de disposición final. Esto contribuye a la minimización de los impactos ambientales y a la preservación de los recursos naturales.

Cabe destacar que, si bien esta investigación se limitó a cinco sitios de estudio, los resultados obtenidos pueden ser extrapolados a otras regiones, siempre y cuando se realice la debida caracterización del RAP disponible. Esto permitiría generar una base de datos regional que facilite la toma de decisiones y la implementación de esta práctica a mayor escala en México.

Conclusiones

Los principales hallazgos de esta investigación son:

1. Las muestras de RAP recolectadas en los cinco sitios de estudio presentaron una distribución granulométrica uniforme, con valores dentro de los parámetros establecidos para mezclas asfálticas densas. El contenido de asfalto de estas muestras varió entre 3.46 % y 7.35 %.
2. Los especímenes elaborados con 100 % de RAP y diferentes tipos de asfalto como rejuvenecedor cumplieron con los requisitos de estabilidad, flujo y contenido de vacíos establecidos en la normativa vigente. Esto demuestra la viabilidad técnica del uso de RAP como reemplazo total del agregado mineral en mezclas asfálticas.
3. Además de los beneficios técnicos, el uso de RAP en la construcción y rehabilitación de pavimentos presenta ventajas ambientales significativas, al reducir la necesidad de explotar bancos de agregados vírgenes y disminuir la cantidad de residuos sólidos asfálticos que requieren disposición final.
4. Los resultados contribuyen para promover el uso del RAP en la rehabilitación de pavimentos en México y a la transición hacia prácticas más sustentables en el sector de la construcción de infraestructura vial.

En relación con los objetivos planteados en esta investigación, se puede concluir lo siguiente:

El objetivo general de proponer una alternativa para minimizar la generación de residuos sólidos asfálticos (RSA) a través del uso de RAP como reemplazo del agregado mineral en mezclas asfálticas se cumplió satisfactoriamente. Los resultados demostraron la viabilidad técnica de este enfoque, al tiempo que se identificaron los beneficios ambientales asociados a la reducción de la explotación de recursos naturales y la minimización de los residuos asfálticos.

Respecto a los objetivos específicos, se logró: 1) determinar un procedimiento para la recuperación y reciclaje del RAP como agregado pétreo; 2) comparar las características de las muestras de RAP de diferentes sitios; 3) analizar el desempeño de mezclas con 100 % de RAP; y 4) realizar una evaluación predictiva de las propiedades de las mezclas con RAP, sentando las bases para su implementación.

Como recomendaciones a futuro, se plantea la necesidad de ampliar la base de datos regional sobre el desempeño del RAP, de modo que se facilite su adopción a mayor escala. Asimismo, es importante desarrollar estrategias de gestión y normatividad que incentiven el reciclaje de este material en la industria de la construcción de carreteras.

Referencias

- Al-Qadi, I. L., Elseifi, M. y Carpenter, S. H. (2007). *Reclaimed asphalt pavement: A literature review* (Research Report FHWA-ICT-07-001). Civil Engineering Studies, Illinois Center for Transportation. <https://apps.ict.illinois.edu/projects/getfile.asp?id=2960>
- Copeland, A. (2011). *Reclaimed asphalt pavement in asphalt mixtures: State of the practice* (Publication NO. FHWA-HRT-11-021). U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration. <https://highways.dot.gov/media/841>
- Garnica, P. y Díaz, H. (2004). *Parámetros volumétricos en aspectos del diseño volumétrico de mezclas asfálticas*. Instituto Mexicano del Transporte.
- _____. (2005). *Caracterización geomecánica de mezclas asfálticas*. Instituto Mexicano del Transporte.
- Hajj, E. Y., Pervaiz, M. y Sebaaly, P. E. (2009). Laboratory evaluation of mixes containing recycled asphalt pavement (RAP). *Road Materials and Pavement Design*, 10(3), 495-517. <https://doi.org/10.1080/14680629.2009.9690211>
- Instituto Mexicano del Transporte [IMT]. (2016). *Norma N-CMT-4-05-003-16. Materiales asfálticos, aditivos y mezclas. Diseño de mezclas asfálticas en caliente tipo Superpave*. <https://normas.imt.mx>
- Kumari, M., Gupta, R. y Jain, P. K. (2019). Effect of long-term ageing on properties of RAP inclusive WMA mixes. *Construction and Building Materials*, 206, 483-493. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.02.087>
- Mohammad, A., Farooq, A. y Shafique, M. S. (2018). Laboratory study on use of RAP in WMA pavements using rejuvenator. *Construction and Building Materials*, 168, 61-72. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.02.079>
- Romeo, E., Oreste, M. y Oliviero, R. (2019). Evaluation of long-term behaviour under traffic of cement treated mixture with RAP. *Construction and Building Materials*, 208, 421-426. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.03.045>
- Sánchez, J. D., Flores, R. y Rivera, F. (2013). Experiencia de reciclado en México: Evaluación de módulos resilientes para mezclas asfálticas fabricadas con 100% RAP [congreso]. *Congreso Iberoamericano del Asfalto (CILA 2013)*, Antigua, Guatemala.
- Zaumanis, M., Mallick, R. B. y Frank, R. (2014). 100% recycled hot mix asphalt: A review and analysis. *Resources, Conservation and Recycling*, 92, 95-114. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2014.07.007>

Capítulo 2

Optimización de hiperparámetros a red LSTM para pronóstico de ventas de una maderería en Tamaulipas

Hyasseliny Alejandra Hurtado Mora¹

Alejandro Humberto García Ruiz¹

Luis Jonás González del Ángel

Resumen

La toma de decisiones en las empresas es indispensable para cumplir objetivos y aprovechar recursos. En consecuencia, deben disponer de información suficiente que pueda ser analizada e interpretada. De esta manera, cada vez más empresas integran la inteligencia artificial para tomar decisiones. En este capítulo, se propone la optimización de hiperparámetros mediante un algoritmo evolutivo para mejorar la capacidad de respuesta de una red *Long Short-Term Memory* (LSTM) desarrollada para el pronóstico de la tendencia de ventas de una maderería ubicada en Tamaulipas, México. Una adecuada técnica de hiperparámetros es indispensable para que la red sea capaz de generalizar e interpretar datos, permitiendo pronósticos eficientes y cercanos a la realidad. El algoritmo evolutivo para la optimización de la red fue genético. La experimentación se realizó con los tres productos más vendidos de la maderería y para evaluar los modelos se calculó el costo total de los pronósticos, así como los errores RMSE y MAPE de cada uno. Los resultados obtenidos permiten concluir que el algoritmo genético es una buena estrategia para la optimización de la red LSTM, logrando que realice un mejor pronóstico de la tendencia de ventas de los productos de la maderería.

Palabras clave: LSTM, administración de inventarios, reducción de costos, toma de decisiones, optimización de hiperparámetros, algoritmo evolutivo, algoritmo genético.

¹ Profesores de la Facultad de Ingeniería Tampico (FI), Universidad Autónoma de Tamaulipas. hhurtado@docentes.uat.edu.mx, ahgarcia@uat.edu.mx

Introducción

Los sistemas de pronósticos buscan la predicción de un resultado futuro o la tendencia de un proceso o evento, con base en el análisis de datos y patrones históricos. De esta manera, para asegurarse que proporcione resultados adecuados para el contexto en que será aplicado, es necesario realizar la evaluación de la precisión y la confiabilidad de los resultados predichos (Karmy y Maldonado, 2019; Sarin et al., 2020), permitiendo ajustar el sistema para que se comporte de la manera esperada.

En la literatura, los investigadores han reportado diversas técnicas computacionales para desarrollar sistemas de pronósticos con buenos resultados; sin embargo, las técnicas pueden requerir ajustes en su diseño para ser aplicadas eficientemente en otros casos. Algunas de las técnicas más utilizadas son (Abdalla et al., 2023): Modelo ARIMA, Suavizamiento Exponencial y Redes Neuronales Artificiales (Kariri et al., 2023).

En los últimos años, las redes neuronales han cobrado un especial interés debido a que se han propuesto modelos que pueden resolver una fracción considerable de problemas en esta área. Entre los más destacables se encuentran las redes neuronales prealimentadas (*Feed-Forward Neuronal Network*, FFNN), las redes perceptrón multicapa (*Multilayer Perceptron*, MLP), las redes neuronales recurrentes (*Recurrent Neuronal Network*, RNN) y más recientemente, las redes neuronales de memoria a corto-largo plazo (*Long Short-Term Memory*, LSTM) (Shaik et al., 2021).

Las redes LSTM son una variante más compleja de una RNN debido a que cuentan con la capacidad de aprender secuencias a largo plazo y las herramientas necesarias para olvidar información irrelevante (Xu et al., 2022). Una red LSTM se compone de cuatro elementos clave (Maximiliano, 2023):

- Puerta de olvido. Decide qué información de la memoria celular anterior se va a mantener u olvidar. Utiliza una función sigmoidea para generar valores para cada número en el estado de la célula anterior, donde el 1 significa “mantener completamente” y un 0 “olvidar completamente”.
- Puerta de entrada. Determina qué nueva información de la entrada actual y el estado oculto anterior se almacenará en la memoria celular.
- Puerta de salida. Decide qué parte del estado de la célula se usará como salida. Primero, pasa el estado oculto anterior y la entrada actual a través de una capa sigmoidea. Luego, el estado de la célula se pasa a través de una capa tangente y se multiplica por la salida de la capa sigmoidea, de modo que solo se permiten salir los valores que se desean.

- Célula o memoria candidata. Es el componente principal de la arquitectura LSTM. Almacena información a lo largo del tiempo y puede olvidarla selectivamente o agregar nueva a su estado interno.

En este sentido, con base en la complejidad que representa el pronóstico de ventas en una maderería a causa de la volatilidad de las ventas de los distintos productos, se considera pertinente el uso de una red LSTM; sin embargo, esta red no está exenta de la optimización de hiperparámetros, siendo esta una actividad crucial para mejorar el rendimiento y la aplicabilidad de los modelos en entornos reales (Andonic y Florea, 2020).

La optimización de hiperparámetros es el proceso de buscar la configuración de un modelo que le permita otorgar los mejores resultados (Yang y Shami, 2020), lo cual requiere ejecutar múltiples modelos de aprendizaje automático con distintas combinaciones aplicados a problemas prácticos. Este proceso busca identificar la arquitectura más eficaz mediante la comparación de resultados de cada configuración (Tan et al., 2024), variando ligeramente los valores de los hiperparámetros con el fin de explorar el espacio de soluciones de manera amplia antes de iniciar la fase de entrenamiento (Xue et al., 2025). En la literatura existen diversas técnicas para optimizar los hiperparámetros de un modelo, siendo las más utilizadas (Elgeldawi et al., 2021):

- Búsqueda de cuadrícula (*Grid Search*). Implica establecer un intervalo de valores para cada hiperparámetro a optimizar. Luego, se analizan todas las combinaciones posibles de estos en un conjunto de validación. A pesar de ser un método exhaustivo, su principal inconveniente radica en el elevado costo computacional asociado, dado que implica evaluar todas las combinaciones posibles (Franceschi et al., 2024).
- Búsqueda aleatoria. Consiste en seleccionar combinaciones de hiperparámetros al azar dentro de un espacio predefinido. En escenarios donde solo algunas dimensiones del espacio de hiperparámetros influyen significativamente en el rendimiento del modelo, resulta más eficiente que la búsqueda de cuadrícula (Erden et al., 2023).
- Optimización bayesiana. Emplea modelos probabilísticos para desarrollar una función objetivo que evalúa el desempeño del modelo en relación con los hiperparámetros. Posibilita una búsqueda precisa y eficaz, adaptándose de forma iterativa a las observaciones previas con el fin de identificar la combinación óptima de cada uno (Bischi et al., 2021).

- Algoritmos evolutivos. Se basan en los principios de la selección natural y la genética, que involucran la mutación y recombinación de genes para abordar problemas de optimización (Yokoyama et al., 2024). En estos, una población de posibles soluciones evoluciona a lo largo de varias generaciones, en las que los individuos más adaptados tienen una mayor probabilidad de reproducirse y transmitir sus características a la siguiente generación. Mediante la aplicación repetitiva de operadores evolutivos, la población tiende a converger hacia soluciones óptimas en relación con una función objetivo predefinida (Kumar et al., 2021).

La selección de una técnica para la optimización de los hiperparámetros de un modelo depende de factores como el tipo de problema a abordar, el tamaño del espacio de soluciones, los recursos computacionales y la posibilidad de entrenar modelos para encontrar la mejor configuración, cuestión que no es sencilla de realizar. Por ejemplo, Santos (2022) realizó la mejora utilizando optimización bayesiana en el contexto del *big data*. En dicho estudio, los datos fueron divididos en fragmentos más manejables. Posteriormente, se generaron configuraciones de hiperparámetros para cada fragmento utilizando optimización bayesiana. La información obtenida de los fragmentos permite ajustarlos en el conjunto completo de *big data* mediante aprendizaje por transferencia. Finalmente, se evaluó al método en relación con dos algoritmos de aprendizaje automático, demostrando una mejor configuración de hiperparámetros en un tiempo computacional menor al de los otros algoritmos.

Del mismo modo, Wang et al. (2024) diseñaron un algoritmo mediante el uso de optimización bayesiana. Este método consistió en la combinación de una distribución previa de una función con información de muestra (evidencia), con el fin de obtener una distribución posterior más informada. Dicho algoritmo permitió alcanzar una alta precisión utilizando una cantidad reducida de muestras, en un menor tiempo de ejecución, en comparación con los métodos de búsqueda manual.

Por otro lado, Guo et al. (2019) presentaron una nueva estrategia de optimización de hiperparámetros denominada *Tabu Genetic*, la cual fusiona las bondades de un algoritmo genético con la técnica de búsqueda tabú. Se realizaron dos series de experimentos comparativos empleando *Tabu Genetic* y otros enfoques para la optimización de redes neuronales convolucionales profundas (CNN). Los resultados revelaron que *Tabu Genetic* supera a los métodos de búsqueda aleatoria y optimización bayesiana al identificar modelos superiores en un menor periodo.

Con base en lo anterior, la optimización de hiperparámetros se considera indispensable para identificar los valores óptimos que mejoren la calidad de los pronósticos generados por una red LSTM, además de prevenir problemas como el sobreajuste o el subajuste durante el entrenamiento. Este trabajo propone el uso de un algoritmo genético, que es eficiente para la optimización de hiperparámetros y es uno de los algoritmos evolutivos más populares. Además, presenta diversas ventajas, inicia con valores seleccionados aleatoriamente, lo que facilita su implementación al no requerir un esfuerzo considerable en la elección de buenos valores iniciales (Li et al., 2020).

Metodología

En este apartado se presentan los componentes del modelo de pronósticos y el algoritmo genético propuesto para la optimización de sus hiperparámetros.

A) Instancia de datos

Los datos para crear la instancia se obtuvieron mediante una colaboración con una empresa maderera en Tamaulipas, México. Se realizó el análisis del historial para los tres productos más significativos en términos de ventas de 2019 al 2023, periodo en el que la empresa comenzó a registrar sus ventas a través de medios electrónicos, lo que facilitó el acceso a los datos para realizar una primera propuesta de un modelo de pronósticos. Con base en sus políticas, las ventas se registran semanalmente, resultando en 261 registros de cada producto para la instancia de datos, constituida por las siguientes variables:

- Año: tiempo en que se realizó la venta
- Seno_Semana: valor del seno de la semana del año, representando la periodicidad semanal
- Coseno_Semana: valor del coseno de la semana del año, complementando la representación cíclica
- Evento: indica si hubo algún evento en la semana
- Ventas: número de unidades vendidas en la semana

Para garantizar la uniformidad de la escala de todas las variables de la instancia, se consideró su estandarización, lo que facilita su procesamiento por la red LSTM. Este proceso asegura que todas las variables tengan una media de 0 y una desviación estándar de 1, lo cual simplifica el entrenamiento y mejora la convergencia de la red LSTM. En la Tabla 1 se muestra un fragmento de la instancia de datos del producto “comedor”; sin embargo, este proceso se realizó de igual manera para los otros productos.

Tabla 1. Estandarización de datos del producto “comedor”

No.	Año	Seno_Semana	Coseno_Semana	Evento	Ventas
1	-1.412863	0.170128	1.395949	-0.318223	0.437206
2	-1.412863	0.33842	1.365223	-0.318223	-0.632249
3	-1.412863	0.501768	1.31451	-0.318223	0.437206
4	-1.412863	0.657789	1.24455	-0.318223	0.70457
5	-1.412863	0.804209	1.156364	3.142451	2.683063

Fuente: elaboración propia.

A partir de la instancia estandarizada, se generaron los conjuntos de entrenamiento, validación y prueba. Los datos fueron divididos como se indica en la Tabla 2.

Tabla 2. Relación de separación para los conjuntos de datos

Conjunto de datos	Porcentaje de datos
Entrenamiento	60 %
Validación	20 %
Prueba	20 %

Fuente: elaboración propia.

Finalmente, con un enfoque multivariado de un solo paso (*Multivariable-Unistep*), se generaron conjuntos de datos supervisados para ingresarlos a la red LSTM. Con base en la aplicación de distintas pruebas realizadas para aminorar el impacto de la variabilidad de los datos, se utilizaron bloques con las cantidades de registros presentadas en la Tabla 3.

Tabla 3. Dimensiones de cada bloque de datos supervisado

Tipo de bloque	Cantidad de registros
Entrada	26 semanas
Salida	1 semana

Fuente: elaboración propia.

Los bloques supervisados por conjunto de datos y variable fueron creados como se muestra en la Figura 1 para la variable “ventas”.

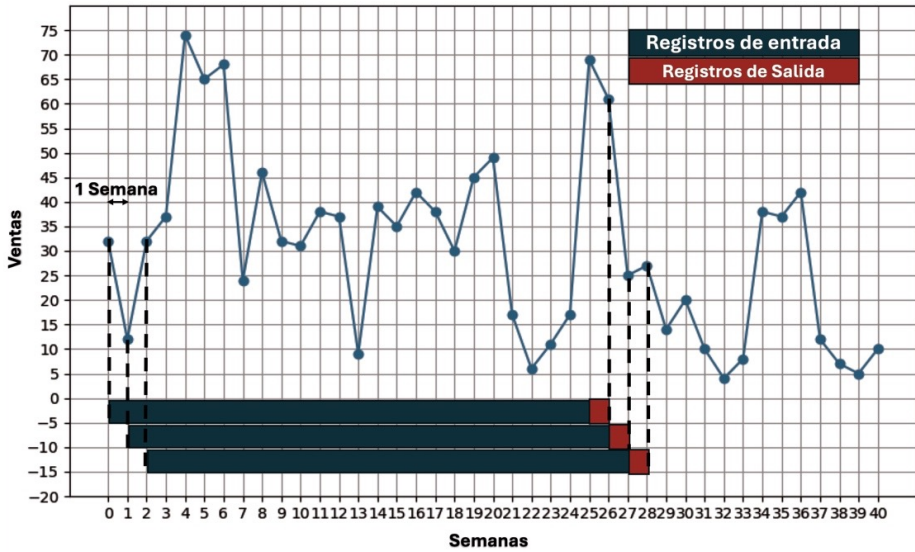


Figura 1. Generación de los bloques de datos supervisados

Fuente: elaboración propia.

B) Estructura de la red LSTM

El diseño de la estructura de la red LSTM con optimización de hiperparámetros por el algoritmo genético es presentada en la Figura 2. La estructura de la red está compuesta por:

- Los datos de entrada (*Input*), que son los conjuntos de datos supervisados del producto a pronosticar.
- Tres bloques, cada uno de ellos integrado por una capa LSTM y una de Dropout, para manejar secuencias de datos, capturar dependencias a largo plazo y evitar el sobreajuste o subajuste.
- Capa densa con función de activación lineal para generar a los pronósticos por parte de la red.
- Salida, que representa al pronóstico de la red para las ventas del próximo periodo.

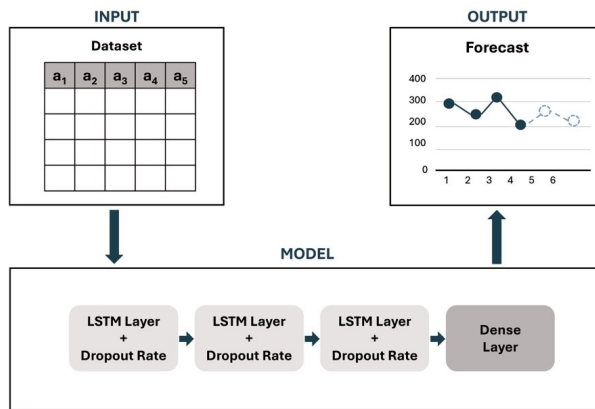


Figura 2. Estructura de la red LSTM

Fuente: elaboración propia.

La estructura de la red LSTM requiere de nueve hiperparámetros para configurar su comportamiento (Unidades LSTM por capa, Épocas, Tamaño del Lote, Tasa de Aprendizaje y Dropout por capa), constituyendo así el espacio de soluciones a ser explorado para encontrar su mejor configuración. Además, se realizaron diversas pruebas preliminares y se establecieron los rangos de valores mostrados en la Tabla 4.

Tabla 4. Rango de valores para los hiperparámetros de la red LSTM

Hiperparámetro	Rango de valores
Unidades de LSTM	100 a 400
Número de épocas	10 a 50
Tamaño del lote (<i>Batch Size</i>)	1 a Total de Bloques
Tasa de aprendizaje (<i>Learning Rate</i>)	0.0001 a 0.001
Dropout	0.2 a 0.5

Fuente: elaboración propia.

En todas las capas LSTM y Dropout, el rango de valores fue el mismo. No obstante, durante la optimización de hiperparámetros, el valor de cada capa se determinó de manera independiente a las demás.

C) Algoritmo genético para la optimización de hiperparámetros

La optimización de hiperparámetros en este trabajo se realizó a través de un algoritmo genético tradicional. En él, la población se encontró constituida por un vector de n soluciones, en la que cada solución P representa a una configuración de

los nueve hiperparámetros que espera la red LSTM, en la cual los primeros cuatro corresponden a valores discretos y el resto a valores continuos. Los parámetros para la ejecución del algoritmo genético son presentados en la Tabla 5.

Tabla 5. Parámetros del algoritmo genético

Parámetro	Valor
Tamaño de la población	10
Cantidad de generaciones	100
Probabilidad de cruce	0.9
Probabilidad de muta	0.2

Fuente: elaboración propia.

La población se estableció en 10 soluciones, con la finalidad de aprovechar los recursos computacionales con los que se contó para la experimentación del trabajo. Los demás parámetros se establecieron con base en diversas pruebas preliminares, en las que se observó que con estos valores se obtenían buenos resultados. En la Figura 3, se presenta el diseño del algoritmo genético diseñado e implementado en este trabajo.

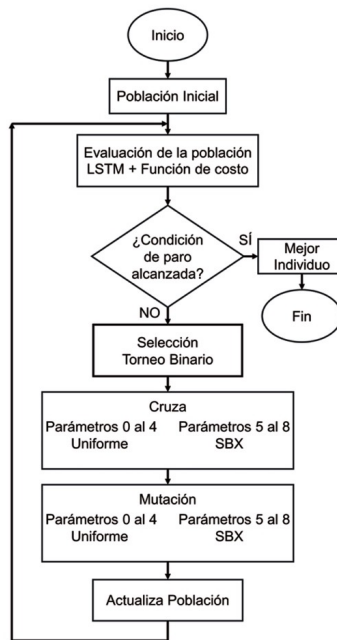


Figura 3. Algoritmo genético para la optimización de hiperparámetros

Fuente: elaboración propia.

Resultados

La experimentación se realizó en una MacBook Pro M1 con 512 GB de SSD, 16 GB de RAM y 10 CPU. Además, para aprovechar la totalidad de los recursos computacionales, en cada generación del algoritmo genético se optó por construir una red LSTM por cada procesador disponible. De este modo, la optimización de hiperparámetros con el algoritmo genético permitió obtener las configuraciones para cada producto presentado en la Tabla 6.

Tabla 6. Hiperparámetros obtenidos para cada producto

Hiperparámetro	Producto 1	Producto 2	Producto 3
Unidades LSTM 1	309	336	354
Unidades LSTM 2	225	193	380
Unidades LSTM 3	279	399	311
Número de épocas	41	29	20
Tamaño del lote	57	10	121
Tasa de aprendizaje	0.0098	0.0043	0.0071
Dropout 1	0.2367	0.4785	0.2399
Dropout 2	0.2668	0.3693	0.2459
Dropout 3	0.2040	0.2762	0.2395

Fuente: elaboración propia.

Con las configuraciones de hiperparámetros presentadas en la Tabla 6, se entrenaron modelos de red LSTM. Los resultados de pronóstico (Figuras 4-6) permiten observar que las redes entrenadas son capaces de capturar tendencias generales en el comportamiento de las ventas, logrando seguir la dirección de los cambios y mantener los valores pronosticados dentro de un rango moderado, incluso ante la volatilidad de los datos reales. Asimismo, se logró un efecto de suavizado en las predicciones, que ayuda a prevenir el impacto de cambios bruscos en el comportamiento de las ventas. Estos resultados son útiles para la maderería, debido a que identificar la tendencia de las ventas resulta más valioso que predecir un valor exacto.

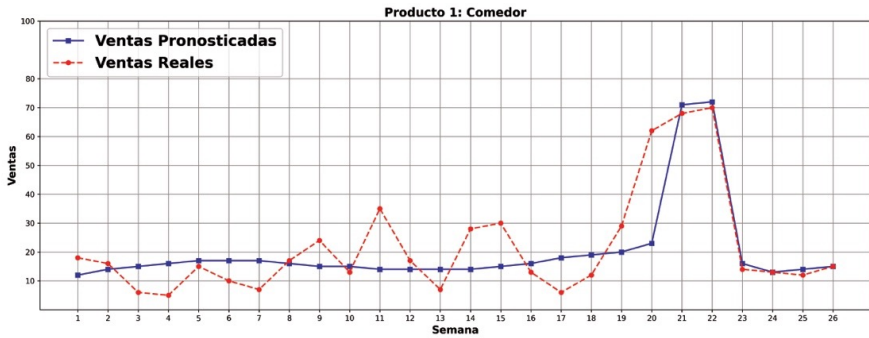


Figura 4. Comparación de las ventas reales y pronosticadas por la red LSTM para el producto 1

Fuente: elaboración propia.

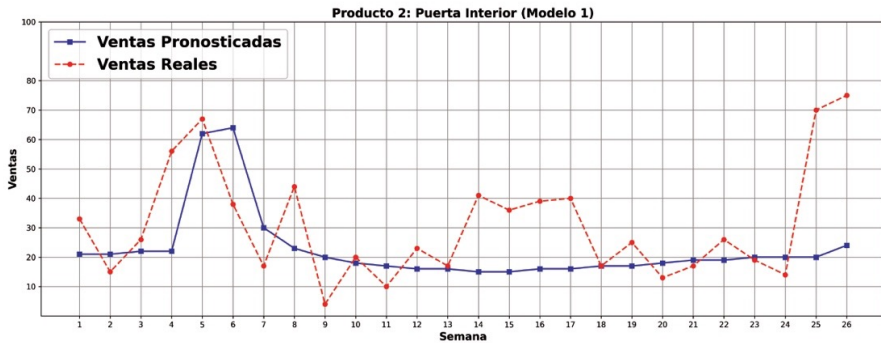


Figura 5. Comparación de las ventas reales y pronosticadas por la red LSTM para el producto 2

Fuente: elaboración propia.

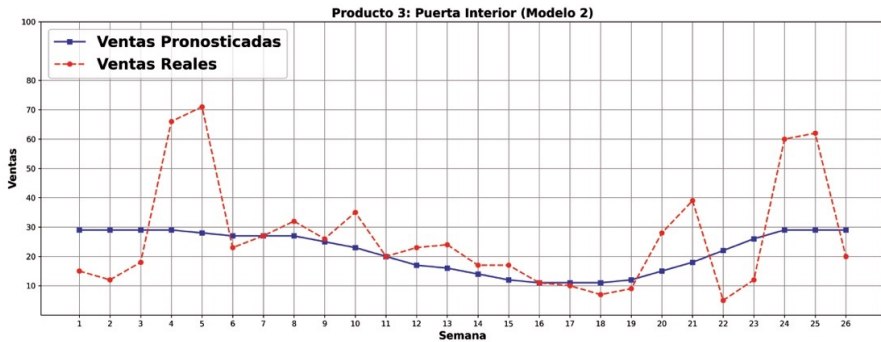


Figura 6. Comparación de las ventas reales y pronosticadas por la red LSTM para el producto 3

Fuente: elaboración propia.

Para contrastar los resultados de los pronósticos de la red, en la Tabla 7 se presenta el error cuadrático medio (RMSE) y el error porcentual absoluto medio (MAPE) obtenidos por la red LSTM para cada producto. Los cálculos se realizaron con los valores pronosticados y reales en la escala original de la instancia de datos.

Tabla 7. RMSE y MAPE obtenidos por la red LSTM para cada producto

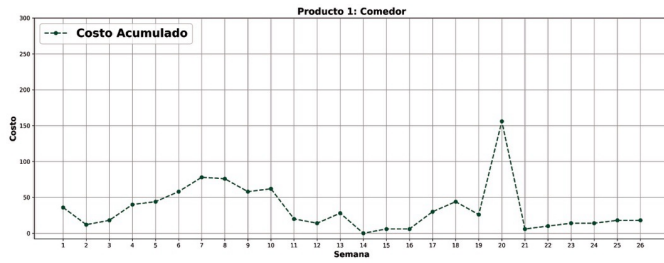
Producto	RMSE	MAPE
1	11.139	53.539
2	20.119	54.088
3	16.866	53.757

Fuente: elaboración propia.

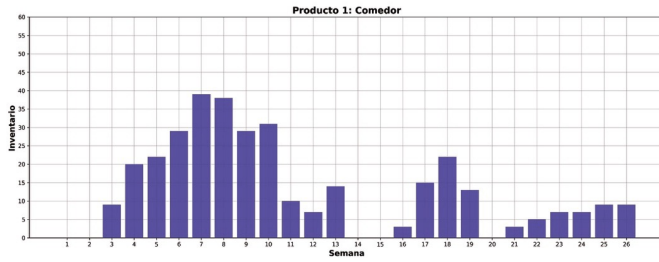
Aunque la Tabla 7 muestra un MAPE promedio del 53.59 %, que es moderadamente alto, se considera que el MAPE obtenido es aceptable y se produjo por la volatilidad de las ventas de los productos. De esta manera, se puede confirmar que la red LSTM logró un pronóstico aceptable de las tendencias de ventas para todos los productos.

Los modelos de red LSTM tuvieron un comportamiento similar con los distintos productos. Además, el producto 1 produjo el menor RMSE a pesar del MAPE obtenido. Por el contrario, el producto 2 tuvo el RMSE más alto, lo que sugiere que la red tuvo mayor dificultad para pronosticar con precisión las ventas de este producto, lo que resulta en mayores costos de almacenamiento y producción; sin embargo, los pronósticos continúan siendo aceptables con base en la tendencia de las ventas.

Por otro lado, la suavización de los pronósticos permitió un balance aceptable en términos de costos (Figuras 7-9), siendo de interés debido a que se busca minimizar tanto el costo de almacenamiento como el de elaboración de productos no planificados. Se observó que en situaciones donde los pronósticos son superiores a las ventas reales, el costo de almacenamiento puede ser elevado debido a que se cuenta con más productos de los que son vendidos por la maderería. Por ejemplo, en la semana 7 del producto 1, cuando se pronosticó una venta de 17 unidades y las ventas reales fueron 7, se produjo un costo de almacenamiento de 78 y un inventario de 39 unidades. No obstante, mantener un nivel de inventario puede ser ventajoso para solventar casos donde los pronósticos son menores que las ventas reales, es decir, cuando la empresa vende más productos que los que tenía contemplados, como ocurre en la semana 11 del producto 1, donde la red pronosticó la venta de 14 unidades frente a 35 reales, en donde, debido a la existencia de inventario, se contó con un costo de elaboración de 20, siendo menor que lo que hubiera resultado si no se tuvieran productos en el inventario.



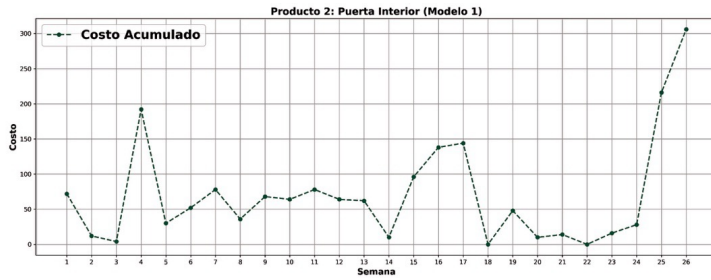
(a) Costo de los pronósticos



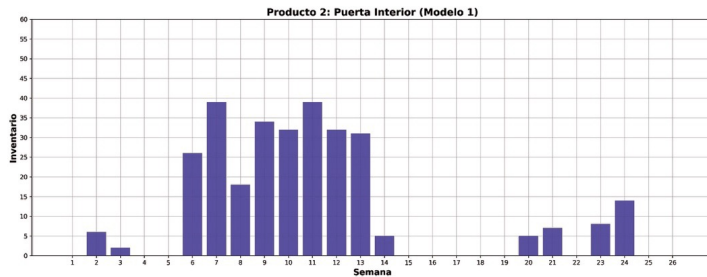
(b) Inventario

Figura 7. Costo de los pronósticos e inventario del producto 1

Fuente: elaboración propia.



(a) Costo de los pronósticos



(b) Inventario

Figura 8. Costo de los pronósticos e inventario del producto 2

Fuente: elaboración propia.

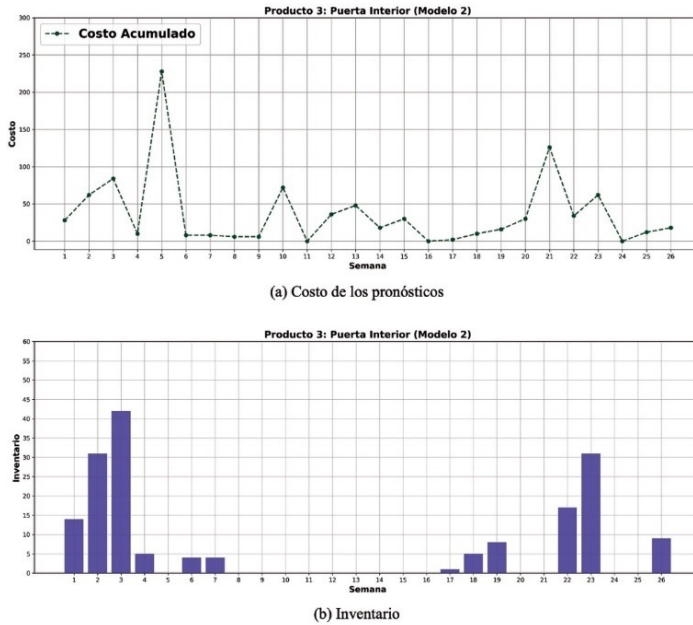


Figura 9. Costo de los pronósticos e inventario del producto 3
Fuente: elaboración propia.

Finalmente, para evaluar la eficiencia de la red LSTM con los hiperparámetros encontrados con el algoritmo genético, se utilizó la función de costo de la red LSTM para comparar los costos de pérdida calculados para cada producto con los obtenidos por la red con los hiperparámetros de la primera ejecución del algoritmo genético. La Tabla 8 presenta la comparación de los costos y la mejora relativa de cada producto con relación al coste de la solución inicial encontrada (CSIE) y el coste de la mejor solución encontrada (CMSE).

Tabla 8. Comparación de los costos con la red LSTM y los hiperparámetros del algoritmo genético

Producto	CSIE	CMSE	Mejora (%)
1	947	892	5.81 %
2	2918	1838	37.01%
3	4102	954	76.74 %

Fuente: elaboración propia.

Los resultados presentados en la Tabla 8 demuestran el potencial de la optimización de hiperparámetros de la red LSTM a través del algoritmo genético, permitiendo el pronóstico de las tendencias de ventas de la maderería con un promedio de mejora del 39.85 %.

Conclusiones y trabajo futuro

El inadecuado manejo de los inventarios puede resultar en pérdidas económicas que en muchos casos conlleva a recortar personal, reducir inversiones o perder participación en el mercado. De esta manera, el impacto y la frecuencia de las pérdidas pueden ser reducidas mediante la implementación de estrategias de pronóstico precisas. Por lo tanto, es necesario pronosticar en un menor tiempo que el requerido por los métodos tradicionales. Es importante contar con una buena configuración de hiperparámetros, debido a que estos determinan el comportamiento de un modelo ante cada problema y son esenciales para evitar situaciones como el sobreajuste y el subajuste. En particular, en este trabajo, la optimización de hiperparámetros fue esencial para que la red LSTM capturara patrones significativos en los datos sin perder generalización, lo que se traduce en pronósticos más precisos y consistentes.

Con pronósticos certeros, se puede contar con información valiosa para tomar decisiones estratégicas. En este capítulo, se realizó el diseño e implementación de un algoritmo genético para la optimización de hiperparámetros de una red LSTM para el pronóstico de ventas de una maderería ubicada en Tamaulipas, México. A través de este se buscó conseguir un adecuado rendimiento de la red LSTM. Para esto, en el algoritmo genético se emplearon operadores genéticos específicos de acuerdo con los tipos de hiperparámetros a optimizar, discretos y continuos.

Los resultados de la experimentación muestran una mejora para los productos considerados en este trabajo, en comparación con los resultados de la primera ejecución del algoritmo genético para optimizar la red LSTM, alcanzando una mejora promedio del 39.85 %. Los resultados muestran que la menor mejora se encontró en el producto 1, con un valor del 5.81 %, y la mejora más significativa en el producto 3, con el 76.74 %. El algoritmo genético es adecuado para optimizar los hiperparámetros de la red LSTM, lo que permite concluir que la optimización basada en un algoritmo genético mejora la precisión y eficiencia de los pronósticos de ventas de la maderería.

Finalmente, como trabajo futuro, se busca probar la propuesta con otros productos de la maderería. Asimismo, se invita a los investigadores a utilizar el algoritmo genético para optimizar otras redes LSTM y extender la investigación mediante la prueba de otros operadores genéticos.

Referencias

- Abdalla, R., El-Diasty, M., Kostogryzov, A. y Makhutov, N. (2023). *Time Series Analysis: New Insights*. BoD—Books on Demand.
- Andonie, R. y Florea, A. C. (2020). Weighted random search for CNN hyperparameter optimization. *ArXiv*, 20(03), 13300.
- Bischi, B., Binder, M., Lang, M., Pielok, T., Richter, J., Coors, S. et al. (2021). Hyperparameter optimization: Foundations, algorithms, best practices and open challenges. *ArXiv*, 21(07), 05847.
- Elgeldawi, E., Sayed, A., Galal, A. R. y Zaki, A. M. (2021). Hyperparameter tuning for machine learning algorithms used for arabic sentiment analysis. *Informatics*, 8(4), 79.
- Erden, C., Demir, H. I. y Kökçam, A. H. (2023). Enhancing machine learning model performance with hyper parameter optimization: a comparative study. *ArXiv*, 23(02), 11406.
- Franceschi, L., Donini, M., Perrone, V., Klein, A., Archambeau, C., Seeger, M. et al. (2024). Hyperparameter optimization in machine learning. *ArXiv*, 24(10), 22854.
- Guo, B., Hu, J., Wu, W., Peng, Q. y Wu, F. (2019). The Tabu_Genetic algorithm: A novel method for hyper-parameter optimization of learning algorithms. *Electronics*, 8(5), 579.
- Kariri, E., Louati, H., Louati, A. y Masmoudi, F. (2023). Exploring the advancements and future research directions of artificial neural networks: a text mining approach. *Applied Sciences*, 13(5), 3186.
- Karmy, J. P. y Maldonado, S. (2019). Hierarchical time series forecasting via support vector regression in the European travel retail industry. *Expert Systems with Applications*, 137, 59-73.
- Kumar, P., Batra, S. y Raman, B. (2021). Deep neural network hyper-parameter tuning through twofold genetic approach. *Soft Computing*, 25(13), 8747-8771.
- Li, Q., Liu, S.-Y. y Yang, X.-S. (2020). Influence of initialization on the performance of metaheuristic optimizers. *Applied Soft Computing*, 91, 106193.
- Maximiliano, S. (2023). Long short Term Memory. *Konfusio*. <https://konfuzio.com/es/lstm/>
- Santos, M. (2022). Bayesian optimization for hyperparameter tuning. *Journal of Bioinformatics and Artificial Intelligence*, 2(2), 1-13.
- Sarin, S., Sarin, S., Haon, C., Haon, C., Belkhouja, M., Belkhouja, M. et al. (2020). Uncovering the knowledge flows and intellectual structures of research in Technological Forecasting and Social Change: A journey through history. *Technological Forecasting and Social Change*, 160, 120210. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2020.120210>
- Shaik, M. E., Islam, M. M. y Hossain, Q. S. (2021). A review on neural network techniques for the prediction of road traffic accident severity. *Asian Transport Studies*, 7, 100040.

- Tan, J. M., Liao, H., Liu, W., Fan, C., Huang, J., Liu, Z. et al. (2024). Hyperparameter optimization: Classics, acceleration, online, multi-objective, and tools. *Mathematical Biosciences and Engineering*, 21(6), 6289-6335.
- Wang, Z., Dahl, G. E., Swersky, K., Lee, C., Nado, Z., Gilmer, J. et al. (2024). Pre-trained Gaussian processes for Bayesian optimization. *Journal of Machine Learning Research*, 25(212), 1-83.
- Xu, M., Xu, M., Du, J., Du, J., Xue, Z., Xue, Z. et al. (2022). A scientific research topic trend prediction model based on multi-LSTM and graph convolutional network. *International Journal of Intelligent Systems*, 37(9), 6331-6353. <https://doi.org/10.1002/int.22846>
- Xue, C., Li, J., Wang, X., Zhan, Y., Yan, J. y Li, C.-G. (2025). On neural architecture search and hyperparameter optimization: A max-flow based approach. *Neural Networks*, 107507.
- Yang, L. y Shami, A. (2020). On hyperparameter optimization of machine learning algorithms: Theory and practice. *Neurocomputing*, 415, 295-316. <https://doi.org/10.1016/J.NEUCOM.2020.07.061>
- Yokoyama, A. M., Ferro, M. y Schulze, B. (2024). Multi-objective hyperparameter optimization approach with genetic algorithms towards efficient and environmentally friendly machine learning. *AI Communications*, 37(3), 429-442.

Capítulo 3

Determinantes de la obesidad infantil en una escuela pública: un análisis mediante regresión logística binaria

Dionicio Morales Ramírez¹

Resumen

La obesidad infantil es un problema de salud pública en México. De acuerdo con los resultados de la *Encuesta Nacional de Salud y Nutrición* (Ensanut 2021), esta afección ha llegado a considerarse como una epidemia causante de la aparición de enfermedades cardiovasculares que ponen en riesgo la vida de las personas desde temprana edad. El objetivo del presente trabajo consiste en aplicar una técnica de regresión logística binaria para identificar la probabilidad de que un estudiante tenga problemas de obesidad en función de algunas medidas antropométricas, como circunferencia de la cintura y la cadera, así como la tensión arterial sistólica y diastólica. La edad, el sexo y el nivel socioeconómico son variables de control. Para ello, se realizan mediciones en una muestra de 100 estudiantes de primer año pertenecientes a una escuela secundaria pública ubicada en Ciudad Madero, Tamaulipas; 56 % hombres y 44 % mujeres; 79 % de 12 años y el 74 % con problemas de peso. El modelo de regresión logística señala que no existen diferencias en la probabilidad de presentar problemas de peso (sobrepeso y obesidad) atribuidas al género, lo que se corrobora también con la prueba de asociación del Chi-cuadrado. Asimismo, tener una circunferencia de cintura y cadera más grande incrementa las posibilidades de presentar ese tipo de problemas. Por ello, son importantes las estrategias para cuidar el desarrollo de los niños desde el ámbito familiar y escolar.

Palabras clave: obesidad infantil, escuela pública, salud, regresión logística.

¹Profesor-investigador de la Facultad de Ingeniería Tampico (FI), Universidad Autónoma de Tamaulipas. dmorales@docentes.uat.edu.mx

Introducción

En los últimos 20 años, la obesidad ha representado una amenaza para la salud pública de muchos países. La Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (OCDE) señala que la prevalencia del sobrepeso se ha incrementado, al igual que las enfermedades no transmisibles (ENT), como la diabetes *mellitus*, las cardiovasculares, las dislipidemias y el cáncer, entre otras. Esta situación ha llevado a una reducción en la expectativa de vida de entre 0.9 y 4.2 años, por lo cual se proyectan 92 millones de muertes en etapas tempranas de la vida para el 2050 (OCDE, 2019).

A raíz de la reciente pandemia por COVID-19, el problema de la obesidad se hizo más evidente, debido a que las personas con esta condición tendieron a presentar mayores complicaciones en su estado de salud, lo que incrementó la tasa de mortalidad (Petrova et al., 2020). Asimismo, la Organización Mundial de la Salud (OMS) reporta que, desde 2022, a nivel mundial la obesidad afecta a una de cada ocho personas, cifra que representa el doble de lo registrado en adultos desde 1990. Sin embargo, en la etapa de la adolescencia, la prevalencia se ha cuadruplicado, alcanzando más de 390 millones de niños y adolescentes entre 5 y 19 años con sobrepeso, y 160 millones con obesidad (OMS, 2024).

En México, las estadísticas nacionales reportadas en la *Ensanut 2021* señalan una tendencia ascendente en la alteración del estado nutricional, con énfasis particular en la obesidad. Por ejemplo, esta encuesta identifica que la prevalencia de sobrepeso y obesidad en adolescentes de 12 a 19 años es del 42.9 %. En la región fronteriza, que incluye al estado de Tamaulipas, se reporta un 42.6 %, ubicándola en el quinto lugar a nivel nacional, mientras que la región Pacífico-Norte presenta la mayor prevalencia, con un 52.2 %.

Shamah et al. (2022) analizaron los resultados de la población escolar a nivel nacional en México (niños de 5 a 11 años), utilizando seis ediciones de la Ensanut (2006, 2012, 2016, 2020, 2021), y observaron un incremento anual promedio de 0.41 % en la prevalencia de sobrepeso y obesidad en esta etapa. A nivel nacional, las estadísticas en adolescentes también muestran una tendencia al alza sostenida desde 2006 hasta 2021, con un aumento acumulado del 9.7 %. De acuerdo con la OCDE (2019), una de cada tres personas en México presenta obesidad. Además, este padecimiento tiene un impacto económico significativo, afectando el producto interno bruto (PIB) del país en un 5.3 %. En su informe *Panorama de la salud*, se indica que México ocupa el primer lugar en prevalencia de sobrepeso y obesidad desde 2019 (OCDE, 2021).

Obesidad y enfermedades no transmisibles (ENT)

La obesidad se considera un factor determinante para el desarrollo de ENT, representando un desafío para los profesionales, los servicios y las políticas de salud. La obesidad ha sido estudiada desde una perspectiva histórico-social y cultural, desde dimensiones políticas, económicas, sociales, psicológicas y médicas, las cuales constituyen la base para su prevención, promoción y tratamiento (Rodríguez y Casas, 2018).

La OMS ha declarado que un porcentaje importante de ENT podría prevenirse mediante la implementación de estrategias educativas orientadas a modificar los estilos de vida o factores conductuales relacionados (Ramírez et al., 2015). En el mismo sentido, Silva et al. (2011) afirman que los factores ambientales tienen un mayor impacto sobre el estado nutricional, particularmente en la prevalencia de sobrepeso y obesidad. Asimismo, Rodríguez y Casas (2018) señalan que, desde 2013, el Sistema Nacional de Salud reconoce como factores asociados al desarrollo de la obesidad la desigualdad social y económica.

La obesidad se define como exceso de grasa y su clasificación suele obtenerse a través del estado nutricional obtenido mediante el índice de masa corporal (IMC), también llamado índice de Quetelet, que se calcula con la siguiente operación $IMC = Kg/m^2$: Kilogramo sobre talla en metros al cuadrado (Guadamuz et al., 2021). Sin embargo, en los adolescentes esta clasificación cambia, pues su estado nutricional depende de los años y de su sexo (Gobierno de México, 2023).

Tabla 1. Categorías del estado nutricional por año y sexo

Edad (años)	Mujeres				Hombres			
	Bajo peso	Normal	Sobrepeso	Obesidad	Bajo peso	Normal	Sobrepeso	Obesidad
10	<= 13.5	16.6	>= 19	>= 22.6	<= 13.7	16.4	>= 18.5	>= 21.4
11	<= 13.9	17.2	>= 19.9	>= 23.7	<= 14.1	16.9	>= 19.2	>= 22.5
12	<= 14.4	18	>= 20.8	>= 25	<= 14.5	17.5	>= 19.9	>= 23.6
13	<= 14.9	18.8	>= 21.8	>= 26.2	<= 14.9	18.2	>= 20.8	>= 24.8
14	<= 15.4	19.6	>= 22.7	>= 27.3	<= 15.5	19	>= 21.8	>= 25.9
15	<= 15.9	20.2	>= 23.5	>= 28.2	<= 16	19.8	>= 22.7	>= 27
16	<= 16.2	20.7	>= 24.1	>= 28.9	<= 16.5	20.5	>= 23.5	>= 27.9
17	<= 16.4	21	>= 24.5	>= 29.3	<= 16.9	21.1	>= 24.3	>= 28.6
18	<= 16.4	21.3	>= 24.8	>= 29.5	<= 17.3	21.7	>= 24.9	>= 29.2
19	<= 16.5	21.4	>= 25	>= 29.7	<= 17.6	22.2	>= 25.4	>= 29.7

Nota: Cartilla Nacional de Salud. Adolescentes de 10 a 19 años.

Objetivos del Desarrollo Sostenible (ODS) y el papel de la educación en la infancia

En el programa establecido y aprobado en 2015 por la Asamblea General de las Naciones Unidas, se proyectaron 17 Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), también conocidos como Objetivos Globales, cuyo propósito es erradicar la pobreza, proteger el planeta y mejorar la calidad de vida de las personas en todo el mundo (ONU, 2018). El tercero destaca la importancia de garantizar una vida sana y promover el bienestar para todas y todos, en todas las edades. Dentro de este objetivo, se incluyen la meta 3.2, orientada a mejorar la salud infantil, y la meta 3.4, que busca reducir en un tercio la mortalidad prematura atribuida a enfermedades no transmisibles (ENT), es decir, aquellas que pueden prevenirse -como el cáncer, la diabetes *mellitus*, la hipertensión arterial, la aterosclerosis, las dislipidemias y la obesidad- mediante la prevención, el tratamiento oportuno y la promoción de la salud mental y el bienestar, proyectando su cumplimiento en un horizonte de 15 años (Secretaría de Economía, s.f.).

Por ello, resulta fundamental implementar estrategias a nivel local que permitan aminorar el problema de la obesidad y contribuir con ello a la mejora de los niveles de salud infantil en la población. En este mismo sentido, la Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (UNESCO, 2022) destaca el papel de los sistemas educativos en la promoción de la salud, señalando que la intervención en etapas tempranas de la vida representa una oportunidad decisiva para el bienestar en la edad adulta y para las futuras generaciones. Asimismo, se enfatiza la importancia de la asociación entre educación y salud, considerando que los niños y adolescentes pasan un promedio de 7.5 horas diarias en el aula durante un periodo aproximado de 8 a 10 años en la educación básica. Esta circunstancia convierte a las escuelas en un escenario estratégico para ejecutar acciones de prevención de ENT y fomentar comportamientos saludables.

El presente trabajo construye y evalúa un modelo de regresión logística binaria con el fin de identificar los determinantes que influyen en la probabilidad de que los estudiantes presenten algún problema de peso, ya sea sobrepeso u obesidad.

Metodología

El estudio es cuantitativo, transversal, descriptivo y exploratorio; identifica los determinantes de la probabilidad de que un estudiante se clasifique con problemas de peso. Se recopiló información sobre peso, talla, edad, sexo, tensión arterial sistólica y diastólica, circunferencia de la cintura y cadera; el nivel socioeconómico se determinó mediante la metodología del AMAI², con una muestra de 100

² Véase la metodología en la siguiente página: <https://www.amai.org/NSE/index.php>

estudiantes pertenecientes a una escuela secundaria pública, ubicada en la colonia Las Flores en Ciudad Madero, Tamaulipas, que fue invitada a participar mediante consentimiento informado. El trabajo de campo se llevó a cabo de enero a marzo del 2024.

El modelo estadístico empleado para el análisis es la denominada regresión logística binaria, debido a que la variable dependiente: Problemas de Peso (PP); toma el valor de uno si la persona se clasifica con sobrepeso u obesidad y cero de otra forma. El modelo logit se especifica de la siguiente manera:

$$\text{Logit}(R) = \frac{1}{1 + e^{-z}} \quad z = \beta_0 + \sum_{i=1}^n \beta_i x_i + \varepsilon_i \quad (1)$$

En donde R es la variable discreta observada en el estado nutricional (con problemas de peso, sin problemas de peso), en tanto que z , es una variable latente y continúa estimada con el índice de masa corporal (IMC) y los datos de la Tabla 1. Los coeficientes de β , corresponden al vector de parámetros a ser valorados mediante máxima verosimilitud. En tanto que el término de error, es captado por ε , el cual se asume con distribución normal estándar. Para estimar el modelo, las variables que se emplean son: sexo del estudiante (1 = hombre y 0 = mujer); edad medida en años; nivel socioeconómico (1 = bajo, 2 = medio y 3 = alto); deporte, es un puntaje que oscila entre 2 y 10, mientras más cercano a 10 más frecuente es su práctica de deporte y mientras más contiguo a 2, lo es menos; tensión arterial sistólica (TAS) medida en miligramos de mercurio (mmHg); tensión arterial diastólica (TAD) medida en mmHg; circunferencia de la cintura (CCi) medida en centímetros; circunferencia de la cadera (CCa) medida en centímetros. La estimación se llevó a cabo en el *software* SPSS versión 27.

Resultados

De los 100 estudiantes de primer año que participaron en el levantamiento de la información, el 56 % son hombres y 44 % son mujeres, el 79 % dijo tener 12 años y el 21 %, 13. El valor promedio del peso fue de 52.51 k (desviación estándar de 15.17), una talla promedio de 1.55 metros (.07) con un IMC de 21.61 (4.92). En cuanto al nivel socioeconómico, 22 % pertenece al estrato bajo, el 34 % al medio y el 44 % al alto, de acuerdo con la metodología AMAI. En el puntaje que hace referencia al deporte, la media fue de 5.6 unidades (2.8).

En la Tabla 2 se presentan las estadísticas del IMC por sexo y edad, con ellas se construye el estado nutricional y finalmente la variable PP. En la Tabla

3 se observa el número de mujeres y hombres que presentan problemas de peso. Además, se hizo una prueba de asociación del Chi-cuadrado entre ambas variables, pero no se encontró relación alguna.

Tabla 2. Estadísticas descriptivas por sexo y edad

Sexo	Años	Media	N	Desviación
Mujer	12	22.3	36	5.0
	13	22.7	8	4.4
	Total	22.4	44	4.8
Hombre	12	20.7	43	5.1
	13	21.8	13	4.5
	Total	21.0	56	4.9
Total	12	21.5	79	5.1
	13	22.1	21	4.4
	Total	21.6	100	4.9

Fuente: elaboración propia

Tabla 3. Estadísticas descriptivas por sexo y PP

Problema peso	Sexo		Total
	Mujer	Hombre	
Sin problema	8	18	26
Con problema	36	38	74
Total	44	56	100

Fuente: elaboración propia.

Estimación del modelo

La estimación de la ecuación 1 permite identificar el impacto de las variables propuestas sobre la variable PP (Tabla 4). Por lo tanto, el modelo permite clasificar correctamente el 91 % de los casos de forma general; respecto a la sensibilidad del modelo, es decir, la probabilidad de clasificar adecuadamente los casos con problemas de peso es de 94.6 %, mientras que la especificidad, es decir, la probabilidad de clasificar adecuadamente los casos sin problema de peso es de 80.8 %.

Tabla 4. Estimación del modelo logístico

	B	Odds Ratio Exp(B)	Sig.
Sexo (1=Hombre)	1.873	6.505	0.168
Edad	-0.923	0.397	0.520
TAS	0.202	1.224	0.031
TAD	-0.260	0.771	0.179
CCi	0.547	1.728	0.025
CCa	0.515	1.673	0.014
Nivel_Soc (Bajo)			0.182
Nivel_Soc (Medio)	-3.238	0.039	0.088
Nivel_Soc (Alto)	-1.118	0.327	0.472
Constante	-70.026	0.000	0.026

Fuente: elaboración propia.

El R cuadrado de Nagelkerke indica que las variables consideradas en el modelo explican el 84.5 % de la variabilidad. Y el ajuste del modelo es estadísticamente significativo de acuerdo con el estadístico de Hosmer-Lemeshow (Cg) señala (p-valor = 0.983). Por lo que el modelo es adecuado.

Conclusiones

Los resultados de este estudio permiten identificar que, de los 100 estudiantes de primer año de una escuela pública ubicada en Ciudad Madero, Tamaulipas, el 74 % presenta algún problema de peso (23 % en sobrepeso y 51 % en obesidad), una cifra alarmante considerando que el exceso de peso en edad escolar es un reconocido factor de riesgo para enfermedades no transmisibles como la diabetes *mellitus* tipo 2, la hipertensión arterial y las dislipidemias. Estos hallazgos se alinean con investigaciones previas que evidencian una alta prevalencia de obesidad infantil en poblaciones mexicanas, tanto en México como en el extranjero, y que destacan la urgencia de intervenir desde etapas tempranas (Rosas et al., 2010).

Además, el presente estudio confirma que no existen diferencias significativas entre sexos respecto a la presencia de obesidad, lo cual fue verificado a través de la prueba de Chi-cuadrado (Tabla 3) y del modelo de regresión logística binaria (Tabla 4). Esta observación coincide con el trabajo de Low et al. (2024), quienes analizaron a niños de origen mexicano en la frontera Texas-México y encontraron que el sexo no fue un predictor consistente, pero que el entorno cultural y familiar sí ejercen un peso determinante.

En este análisis, las variables que mostraron efecto significativo sobre la presencia de problemas de peso (PP) fueron: la tensión arterial sistólica (TAS), la circunferencia de cintura (CCi), la circunferencia de cadera (CCa) y, con una significancia marginal al 10 %, el nivel socioeconómico. En particular, se encontró que si incrementa la TAS, también lo hace en 1.22 veces la probabilidad de presentar sobrepeso u obesidad. Este hallazgo sugiere una posible asociación temprana entre obesidad infantil e hipertensión, como también lo han evidenciado Hernández-Valero et al. (2012), quienes identificaron patrones similares al analizar factores fisiológicos en niños mexicanoamericanos.

En cuanto a las medidas antropométricas, un aumento de 1 cm en la circunferencia de cintura incrementa en 1.72 veces el riesgo de obesidad, mientras que 1 cm adicional en la cadera lo aumenta en 1.67 veces. Estos resultados coinciden con Rosas et al. (2010), quienes subrayaron el papel central de la adiposidad central y su asociación con sobrepeso infantil al aplicar un modelo de regresión logística binaria en niños mexicanos y mexicanoamericanos. Si bien el nivel socioeconómico no resultó significativo a un nivel convencional, su asociación marginal concuerda con estudios como el de Low et al. (2024), que reconocen su influencia indirecta a través del acceso a alimentos saludables, infraestructura recreativa y servicios de salud.

El problema del sobrepeso y la obesidad infantil no es solo una cuestión individual, sino estructural y multifactorial, como lo han señalado diversos estudios basados en modelos estadísticos robustos. Por ello, se requiere una respuesta integral desde el núcleo familiar, las instituciones educativas y las políticas públicas, promoviendo entornos que favorezcan una nutrición adecuada, la actividad física y la educación en salud desde las primeras etapas de la vida.

Trabajo futuro

A pesar de que el modelo presenta buenos ajustes, se recomienda ampliar la obtención de datos a los niveles o grados con los que cuenta la secundaria, ello permitirá incluir una variable nueva e identificar si el grado escolar es determinante. Además, al incrementar la base de datos, se puede verificar de manera exacta la prevalencia del estado nutricional en esta población. Asimismo, un mayor número de datos dará un mejor panorama sobre el efecto inconcluso del nivel socioeconómico sobre la variable propuesta.

Referencias

- Encuesta Nacional de Salud y Nutrición [ENSANUT]. (2021). *Encuesta Nacional de Salud y Nutrición 2021 sobre covid-19. Resultados nacionales*. Secretaría de Salud Pública. https://www.insp.mx/resources/images/stories/2022/docs/220801_Ensa21_digital_29julio.pdf
- Gobierno de México. (21 febrero 2023). *Cartillas Nacionales de Salud*. Secretaría de Salud. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/894119/Cartilla_Adolescentes_2023.pdf
- Guadamuz, J., Miranda, M. y Mora, N. (2021). Sobrepeso y obesidad infantil. *Revista Médica Sinergia*. 6(11), e730. <https://doi.org/10.31434/rms.v6i11.730>
- Hernández-Valero, M. A., Bustamante-Montes, P., Hernández, M., Halley-Castillo, E., Wilkinson, A., Bondy, M. et al. (2012). Higher risk for obesity among Mexican-American and Mexican immigrant children and adolescents than among peers in Mexico. *Journal Immigration Minor Health*, 14(4), 517-522. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC5436600/>
- Low, E. V., Lee, M., Bauer, C., Fisher-Hoch, S., McCormick, J., Rowan, P. et al. (2024). Risk factors for overweight and obesity in Mexican and Mexican American children living on the Texas–Mexico border. *Frontiers in Adolescent Medicine*, 2, 1-9. <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fradm.2024.1297391/full>
- Organización de las Naciones Unidas [ONU]. (2018). *La Agenda 2030 y los Objetivos de Desarrollo Sostenible: una oportunidad para América Latina y el Caribe*. <https://repositorio.cepal.org/server/api/core/bitstreams/cb30a4de-7d87-4e79-8e7a-ad5279038718/content>
- Organización para la Cooperación y Desarrollo Económico [OCDE]. (2019). *The Heavy Burden of Obesity: The Economics of Prevention, OECD Health Policy Studies*. OECD Publishing. https://www.oecd-ilibrary.org/social-issues-migration-health/the-heavy-burden-of-obesity_67450d67-en
- _____. (2021). *Health at a Glance 2021: OECD Indicators*. OECD Publishing. <https://doi.org/10.1787/ae3016b9-en>.
- Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura [UNESCO]. (2022). *UNESCO strategy on education for health and well-being*. UNESCO Biblioteca Digital. <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000381728>
- Organización Mundial de la Salud [OMS]. (2024, 01 de marzo). *Obesidad y Sobrepeso*. <https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/obesity-and-overweight>
- Petrova D., Salamanca-Fernández E., Rodríguez M., Navarro P., Jiménez, J. y Sánchez, M. (2020). La obesidad como factor de riesgo en personas con COVID-19: posibles mecanismos e implicaciones. *Atención Primaria*, 52(7), 496-500. <https://doi.org/10.1016/j.aprim.2020.05.003>

- Ramírez-Vélez, R., Triana-Reina, H. R., Carrillo, H. A., Ramos-Sepúlveda, J. A., Rubio, F., Ponches-Franco, L. et al. (2015). A cross-sectional study of Colombian University student's self-perceived lifestyle. *Springer Plus*, 4(289), 1-8. DOI 10.1186/s40064-015-1043-2
- Rodríguez-Torres, A. y Casas-Patiño, D. (2018). Determinantes sociales de la obesidad en México. *Revista de Enfermería del Instituto Mexicano del Seguro Social*, 26(4), 281-290.
- Rosas, L. G., Harley, K. G., Lahiff, M., Broch-Perez, Y., Aguirre, C. y Eskenazi, B. (2010). Factors associated with overweight and obesity among children of Mexican descent: Results of a binational study. *Infant and Young Children*, 23(1), 62-73. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC2953610/>
- Secretaría de Economía [SE]. (s.f.). *Objetivos de Desarrollo Sustentable. Agenda 2030*. INEGI. <https://agenda2030.mx/ODSGoalSelected.html?ti=T&cveArb=ODS0030&goal=0&lang=es#/ind>
- Shamah-Levy, T., Gaona-Pineda, E. B., Cuevas-Nasu, L., Morales-Ruan, C., Valenzuela-Bravo, D.G., Méndez-Gómez, H. et al. (2023). Prevalencias de sobrepeso y obesidad en población escolar y adolescente de México. Ensanut Continua 2020-2022. *Salud Pública de México*, 65(supl 1), S218-S224. <https://doi.org/10.21149/14762>
- Silva, D. A., Pelegri, A., Ferreira de Lima, J. M. y Petroski, E. L. (2011). Epidemiology of abdominal obesity among adolescents from a Brazilian State Capital. *Journal Korean Medicine Science*, 26, 78-84. DOI: 10.3346/jkms.2011.26.1.78

Capítulo 4

Hacia la reducción de emisiones de dióxido de carbono: optimización energética en planta STYROPEK Altamira

Elvira Rolón Aguilar¹

Julio Cesar Pérez Deantes²

Roberto Pichardo Ramírez¹

Resumen

En México, según un informe de la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) de México, el sector energético del país experimentó un aumento del 65 % en las emisiones de CO₂ entre 1990 y 2015. La presente investigación tiene como objetivo analizar estrategias que reduzcan las emisiones de dióxido de carbono (CO₂) en la planta STYROPEK Altamira, por medio de fuentes de iluminación eficientes y naturales en almacén de producto terminado, con el fin de minimizar el consumo energético y las emisiones de CO₂ asociadas a la demanda energética. El estudio se llevó a cabo en cuatro etapas metodológicas: en la primera se cuantificó el consumo energético correspondiente al sistema de iluminación; en la segunda se compararon las características técnicas de las fuentes de iluminación; en la tercera se propusieron alternativas de fuentes de iluminación más eficientes y finalmente se evaluaron los beneficios de las alternativas propuestas. Los resultados indican que la implementación de luminarias LED y paneles solares generaría beneficios significativos en términos ambientales. Se observó una reducción notable en las emisiones de CO₂, respaldando la contribución positiva de estas tecnologías a la sostenibilidad ambiental. El estudio contribuye a la sostenibilidad ambiental y

¹Profesores-investigadores de la Facultad de Ingeniería Tampico (FI), Universidad Autónoma de Tamaulipas. erolon@docentes.uat.edu.mx, rpichardo@docentes.uat.edu.mx.

²a2223338035@alumnos.uat.edu.mx

a la eficiencia operativa de la planta STYROPEK Altamira, con la perspectiva de reducir su huella de carbono y mejorar su competitividad en el mercado.

Palabras clave: calentamiento global, dióxido de carbono, eficiencia energética, emisiones de CO₂, sostenibilidad ambiental.

Introducción

El calentamiento global, ampliamente reconocido a nivel mundial (Naciones Unidas, s.f.), está estrechamente relacionado con las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) derivadas del uso de combustibles fósiles, como el carbón, el gas natural y el petróleo (EPA, 2022). Estas emisiones comprometen la capacidad de la atmósfera para disipar el calor, lo que resulta en un incremento de las temperaturas globales y en efectos perjudiciales en el medioambiente (INECC, 2018). Estudios previos han destacado la importancia de abordar el calentamiento global a través de una perspectiva global y multisectorial. AlShafeey y Rashdan (2023) subrayan la relación directa entre las fuentes de consumo de energía y las emisiones de gases de efecto invernadero en las principales economías. El incremento constante de las temperaturas y los efectos visibles, como la fusión de los casquetes polares y fenómenos climáticos extremos, delinear un panorama ominoso para nuestro planeta (NASA, 2022). La humanidad se enfrenta a consecuencias potencialmente irreversibles y la necesidad de una movilización colectiva para combatir este fenómeno se torna inaplazable (Naciones Unidas, 2021). En este contexto, el compromiso de las naciones para implementar medidas concretas y sostenibles se convierte en un imperativo para preservar la salud del planeta y salvaguardar el bienestar futuro.

En México, el sector energético, representado por la Comisión Federal de Electricidad (CFE), juega un papel central en el desafío del calentamiento global. (Forbes México, 2022), destaca que el 17 % de las emisiones de CO₂ del país provienen de esta entidad, una proporción significativa atribuible al uso extendido de combustibles fósiles en la generación de electricidad. Esta conexión directa entre la producción de energía y las emisiones subraya la necesidad de transformar los métodos tradicionales de generación.

La adopción masiva de tecnologías renovables y la implementación de prácticas de eficiencia energética son estrategias cruciales para revertir esta tendencia y alinear al país con objetivos más sostenibles (SENER, 2021). Esta crisis climática requiere redefinir la relación entre la humanidad y la energía que consume. La transición hacia fuentes más limpias no solo representa un deber ético hacia el entorno natural, sino también una senda hacia un futuro más próspero y resiliente (Naciones Unidas, 2015a).

Por otra parte, la importancia de reducir las emisiones de dióxido de carbono ha sido documentada extensamente en estudios previos. Por ejemplo, el informe de la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (EPA, 2022), detalla cómo la quema de combustibles fósiles constituye la principal fuente global de emisiones de CO₂, enfatizando la necesidad de transitar hacia energías más limpias. La emisión de dióxido de carbono derivada de la quema de combustibles fósiles se revela como un elemento crítico que impulsa el constante incremento de las concentraciones atmosféricas de este gas de efecto invernadero.

La confirmación por parte de la EPA (2022) de que estos combustibles representan la principal fuente global de emisiones de CO₂, destaca la necesidad urgente de reconsiderar los métodos de generación de energía y buscar alternativas más sostenibles. El desafío radica en abordar la dependencia de combustibles fósiles a nivel mundial y promover un cambio sistémico hacia otras formas de energía.

El aumento del 6 % en las emisiones de CO₂ relacionadas con la generación de energía eléctrica a nivel mundial en 2021 subraya la persistente inclinación hacia fuentes no sostenibles (UNFCCC, 2022a). Esta tendencia subraya la urgencia de adoptar estrategias más ambiciosas para frenar la emisión de gases de efecto invernadero y propulsar una transición acelerada hacia otras alternativas (SENER, 2021).

En el escenario mexicano, el panorama de emisiones de CO₂ derivadas del consumo de energía eléctrica y térmica revela una realidad preocupante. Según un informe de la SEMARNAT, el sector energético del país experimentó un aumento sorprendente del 65 % en las emisiones de CO₂ entre 1990 y 2015. Este crecimiento, que elevó las emisiones de 301 MtCO₂e a 497 MtCO₂e, resalta la necesidad de reevaluar las estrategias actuales y adoptar enfoques más efectivos para mitigar las emisiones y promover la sostenibilidad ambiental (Semarnat, 2020). La conexión directa entre el consumo de energía y este aumento de emisiones subraya la importancia de implementar soluciones integrales, tanto a nivel nacional como global, para abordar de manera efectiva el reto global del cambio climático.

Lipiäinen et al. (2024), han investigado la eficiencia energética en contextos industriales, analizando costos, eficiencia y emisiones de gases de efecto invernadero en sectores como el acero. Esta eficiencia mitiga las emisiones de gases de efecto invernadero, mediante el uso sostenible de los recursos energéticos (EPA, 2022). Las mejoras pueden reducirlas hasta en un 40 %, lo que subraya su potencial como estrategia clave para cumplir con los compromisos climáticos internacionales sin comprometer el desarrollo económico (Secretaría de Energía [Sener], 2020). Además, la eficiencia energética es una de las metas centrales de la Agenda 2030 de

las Naciones Unidas, que insta a los países a duplicar la tasa global de mejora para 2030 (Naciones Unidas, 2015b). Estos antecedentes subrayan la urgente necesidad de abordar el impacto significativo de la generación de energía en las emisiones de CO₂ y, por consiguiente, en el calentamiento global.

La presente investigación tiene como objetivo analizar estrategias que reduzcan las emisiones de dióxido de carbono (CO₂) en la planta STYROPEK Altamira, implementando fuentes de iluminación eficientes y naturales en almacén de producto terminado, con el fin de minimizar el consumo energético y, por consiguiente, disminuir las emisiones de CO₂ asociadas a la demanda energética.

La empresa STYROPEK México asume un sólido compromiso con la protección del medioambiente, reflejado en su Política Integral de Seguridad, Salud, Protección Ambiental, Calidad y Sustentabilidad (STYROPEK, 2022). Como parte del Grupo ALPEK, se adhiere al acuerdo de París y a la Agenda 2030, cuya finalidad es mitigar el calentamiento global por medio de la reducción de gases de efecto invernadero (INECC, 2018), grupo ALPEK está comprometido con el acuerdo de París, teniendo como objetivo disminuir las emisiones de alcance 1 y 2 del 27.5 % para 2030 (ALPEK, 2021).

La relevancia de este estudio reside en su capacidad para evaluar el consumo de energía eléctrica en kilovatios-hora (kWh) generado por el sistema de iluminación de la planta, lo que permitirá identificar opciones óptimas de iluminación, ya sean de origen artificial, natural o basadas en energías limpias. Esto contribuye al desarrollo de prácticas más sostenibles y alineadas con los objetivos globales de reducción de emisiones, beneficiando tanto a STYROPEK Altamira como al esfuerzo global por mitigar el cambio climático. Asimismo, al enfocarse en la necesidad de disminuir las emisiones de CO₂ en el entorno industrial, el estudio aborda un vacío de conocimiento relacionado con la aplicación práctica de estrategias ambientales en la industria.

Metodología

El estudio se basa en un enfoque mixto que combina elementos cuantitativos y cualitativos. Esto permitió una comprensión completa de la eficiencia energética en las fuentes de iluminación en la planta STYROPEK Altamira. La investigación se llevó a cabo de enero a diciembre 2022 y en la ubicación de la planta.

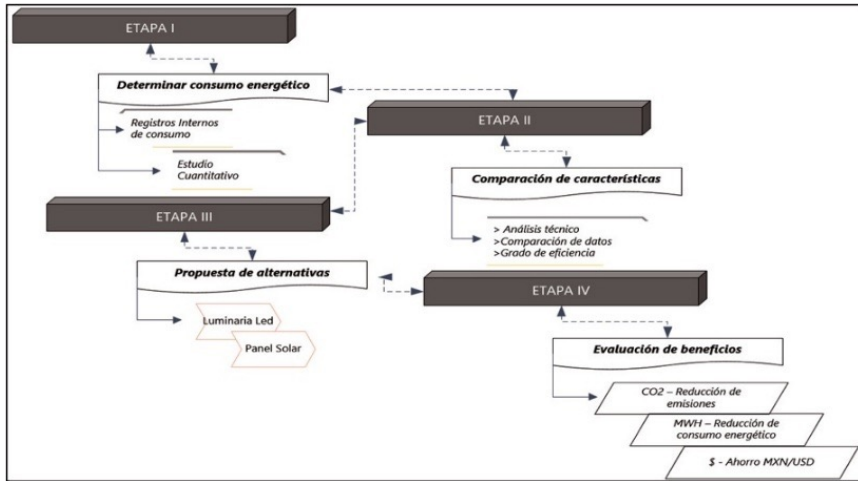


Figura 1. Proceso metodológico

Fuente: elaboración propia.

Etapa 1: Determinación de consumo energético

En la primera etapa del estudio, se abordó un análisis cuantitativo del consumo de energía en la planta STYROPEK Altamira de enero a diciembre del 2022. La recopilación de datos incluyó registros internos de consumo de energía, cantidad-distribución de luminarias en la planta y un registrador trifásico de calidad eléctrica para garantizar la precisión en la medición del consumo energético del sistema de iluminación en el área enfoque de este estudio. El análisis se enfocó en el procesamiento de los datos históricos de consumo eléctrico, lo cual comprendió el cálculo de estadísticas clave, tales como promedios y consumos totales, para obtener una comprensión detallada de la variabilidad del consumo de energía en un periodo de 12 meses.

Etapa 2: Comparación de características técnicas

En la segunda etapa del estudio se evaluó el rendimiento de las luminarias, en aspectos como el consumo energético, la eficiencia lumínica y los costos asociados. La recopilación de datos se realizó mediante el estudio de fichas técnicas proporcionadas por fabricantes líderes en luminarias, incluyendo marcas como Dialight, Beghelli y Cooper Crouse. Esta evaluación permitió comparar la eficiencia de las luminarias actuales con las opciones disponibles en el mercado, a través del análisis de variables clave, como el consumo de energía en MWh y la luminancia, con lo que se buscó identificar áreas de mejora en términos de eficiencia y costos.

Etapa 3: Propuesta de alternativas de iluminación

En la tercera etapa se valoraron alternativas de iluminación más eficientes a las actuales, priorizando aspectos cruciales como el consumo energético, la eficiencia lumínica y los costos asociados. Para recopilar datos precisos, se estudiaron las fuentes de iluminación más eficientes en la actualidad y se analizaron fichas técnicas proporcionadas por fabricantes líderes en este rubro. Al finalizar, se presenta un resumen detallado de los hallazgos preliminares, destacando las herramientas de evaluación. Además, se indican las acciones de la investigación para optimizar la eficiencia energética en la planta STYROPEK Altamira.

Etapa 4: Evaluación de beneficios de las alternativas de iluminación

La cuarta etapa evaluó los beneficios derivados del uso de fuentes de iluminación más eficientes, con un enfoque en la reducción del consumo energético, las emisiones de dióxido de carbono y el ahorro monetario asociado. Esta evaluación emplea modelos matemáticos tales como el de eficiencia energética para comparar el consumo de diferentes tecnologías y el modelo econométrico de costo-beneficio para cuantificar ahorros económicos y retorno de inversión (ROI), usando datos validados provenientes de fuentes confiables, como la Comisión Reguladora de Energía (CRE) y la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (EPA). Los resultados proporcionan una visión cuantificada de los beneficios ambientales y económicos de las alternativas de iluminación propuestas. Se incluye información de toneladas de dióxido de carbono ahorradas, consumo de energía en megavatios hora y ahorro monetario en dólares estadounidenses a pesos mexicanos.

Resultados

Para determinar el consumo total de energía en la ampliación cinco del almacén de producto terminado de la planta STYROPEK Altamira de enero a diciembre 2022, se realizaron análisis cuantitativos y comparativos de los registros de consumo eléctrico proporcionados por la empresa, así como recursos internos de distribución y cantidad de luminarias. El cálculo de los totales de consumo de energía eléctrica se presenta en la Figura 2.

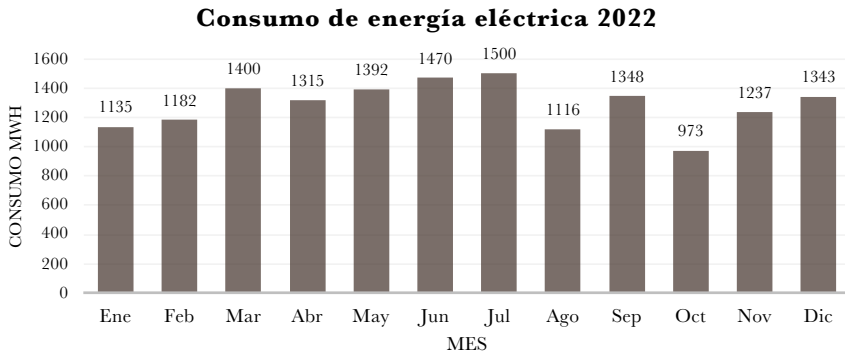


Figura 2. Historial de consumo de energía eléctrica MWh

Fuente: Registro interno de energías Styropek (2022).

Para calcular la cantidad de energía correspondiente al sistema de iluminación de ampliación cinco, se realizó un análisis cuantitativo de la cantidad de luminarias y los consumos de cada una de ellas, así como el uso de un registrador trifásico de calidad eléctrica de la marca Fluke, Modelo 1736, con el número de serie 33541565, para garantizar la precisión en la medición del consumo energético del sistema de iluminación, obteniendo que el consumo de esa área corresponde solo al 0.5 % del total general.

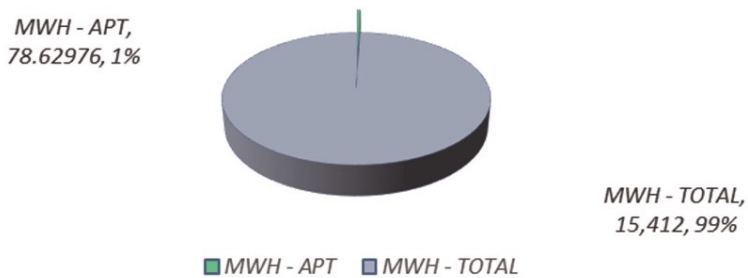


Figura 3. Impacto del consumo energético anual APT

Fuente: elaboración propia.

Los resultados revelan que el consumo total de energía en la ampliación cinco de STYROPEK Altamira fue de 15 412 MWh en el periodo del estudio, mientras que el sistema de iluminación de esta área contribuyó con el 0.5 % del consumo total. Este hallazgo es esencial para las siguientes etapas metodológicas debido a su capacidad para proporcionar una visión detallada de la distribución del consumo eléctrico en la planta.

La identificación de que el sistema de iluminación tiene un impacto marginal en el consumo total es clave, ya que permite una asignación más eficiente de recursos y esfuerzos hacia áreas con un peso significativo en términos de eficiencia energética. Esta información técnica orienta las siguientes etapas metodológicas al proporcionar una base robusta para la toma de decisiones estratégicas. La capacidad de identificar áreas de alto y bajo consumo facilita una planificación destinada a mejorar la eficiencia energética en la planta STYROPEK Altamira.

Características técnicas de las fuentes de iluminación existentes en planta

La comparación de las características técnicas de iluminación se llevó a cabo seleccionando fuentes LED más eficientes, con base en los sistemas más utilizados en México. Un estudio de la Comisión Nacional para el Uso Eficiente de la Energía (CONUEE, 2018), destaca que los sistemas LED son los más eficientes, pero no los más utilizados. Con el objetivo de realizar una evaluación integral del sistema de iluminación, se efectuó un análisis técnico dirigido a examinar el rendimiento operativo de las luminarias actualmente instaladas en la planta.

El análisis se centró en variables cruciales como el consumo energético, la eficiencia lumínica y los costos asociados. La recopilación de datos se realizó mediante el análisis comparativo de fichas técnicas proporcionadas por fabricantes líderes en luminarias, entre ellos Dialight, Beggelli y Cooper Crouse. Los resultados de esta evaluación se presentan en la Tabla 1, destacando las características técnicas de cada luminaria, incluyendo el consumo en vatios (Wh) y la luminancia en lúmenes.

Tabla 1. Características técnicas de luminarias

Marca	Dialight	Beggelli	Cooper Crouse
Consumo (Wh)	102	98.15	132
Luminancia (Lumen)	13 250 - 40 %	12 725 - 35 %	9 400

Fuente: elaboración propia.

La comparación revela que la luminaria instalada de Cooper Crouse utilizando vapor de sodio, es menos eficiente que las luminarias LED de Dialight y Beggelli, ya que muestra una disminución del 40 % y 35 % en la luminancia, respectivamente. Identificar estas disparidades entre las luminarias existentes permite una evaluación crítica de las áreas de mejora en términos de eficiencia energética, orientando así las decisiones estratégicas para la optimización del sistema de iluminación en la planta.

Con los resultados obtenidos sobre el análisis de las características técnicas, las próximas acciones se centrarán en proponer alternativas de iluminación más

eficientes, tales como la iluminación LED y la implementación de paneles solares, dando prioridad a la reducción del consumo energético impactando positivamente en la reducción de emisiones de dióxido de carbono.

Alternativas de iluminación

En cuanto a la propuesta de alternativas de fuentes de iluminación más eficientes a las actuales para reducir las emisiones de CO₂, se realizó un análisis comparativo sobre ellas en la actualidad: iluminación LED, solar fotovoltaica y eólica (SENER, 2015). En esta etapa se evaluaron dos opciones principales, paneles solares y LED (Tabla 2).

Tabla 2. Alternativas de fuentes de iluminación

Marca	Beghelli (LED)	Panel solar	Cooper Crouse
Consumo (Wh)	98	0	132
Consumo (KWh) Anual	58.466	0	115,632
Consumo (MWh) Anual	58.466	0	115.632

Fuente: elaboración propia.

El consumo anual muestra que Beghelli (LED) tiene un consumo considerablemente menor en comparación con Cooper Crouse (50 % de reducción anual). La opción de Panel Solar indica un consumo nulo, lo que destaca su eficiencia en términos de consumo energético. Estos resultados son cruciales para la toma de decisiones en cuanto a la eficiencia energética en la planta STYROPEK Altamira. Después, se evaluaron las implicaciones de estas alternativas, considerando el ahorro energético y los aspectos económico-medioambientales.

Evaluación de beneficios

La evaluación de beneficios potenciales derivados de la implementación de las alternativas de iluminación propuestas se llevó a cabo mediante un análisis de la reducción de emisiones de dióxido de carbono, el ahorro energético y las implicaciones económicas asociadas con estas alternativas. Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 3.

Tabla 3. Análisis de beneficios

Marca	tCO2	MWh	\$(USD-MXN)
Beghelli (LED)	8.7	20.1	2 500 / 45 000
Panel solar	34.2	78.6	9 750 / 175 501

Fuente: Comisión Reguladora de Energía (2023)2.

En primera instancia, se abordó la reducción de emisiones de dióxido de carbono mediante la utilización del factor proporcionado por la Comisión Reguladora de Energía (CRE) para cuantificar la disminución de emisiones de CO₂, multiplicándolo por el ahorro estimado de energía al utilizar luminarias LED y paneles solares. Utilizando luminaria LED Beghelli, se estarían disminuyendo anualmente 8.7 toneladas de dióxido de carbono (tCO₂); con paneles solares, dejarían de emitirse 34.2 tCO₂ a la atmósfera.

La proyección del ahorro monetario se obtuvo mediante las tarifas energéticas actuales, evidenciando que tanto la luminaria LED como el panel solar impactarían positivamente en un ahorro económico anualizado. Para complementar estos resultados, se utilizó la calculadora de equivalencias de emisiones de dióxido de carbono proporcionada por la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (EPA, 2019). Esto permitió cuantificar el impacto ambiental positivo derivado del ahorro energético al implementar alternativas de iluminación eficientes. Las equivalencias se muestran en la Tabla 4.

Tabla 4. Equivalencias de gases de efecto invernadero

Marca	tCO ₂	Vehículo (Anual)	Gasolina (Gal)	Barriles de petróleo	M ² de bosques preservados	Teléfonos cargados
Beghelli (LED)	8.7	1.9	978	20.1	235	1 057 701
Panel solar	34.2	7.6	3,826	78.6	911	4 136 083

Fuente: Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (2023).

Los resultados obtenidos indican que la implementación de luminarias LED y paneles solares generarían beneficios ambientales. Se observó una reducción notable en las emisiones de CO₂, respaldando la contribución positiva de estas tecnologías a la sostenibilidad. Además, destacó el ahorro sustancial de energía y los beneficios económicos tangibles, consolidando la viabilidad y eficacia de estas alternativas. La transición a tecnologías más eficientes en STYROPEK Altamira, proporciona una base sólida para la toma de decisiones estratégicas en la búsqueda continua de la optimización de la eficiencia energética con impacto ambiental positivo.

Conclusiones

Este estudio destaca la eficacia de optimizar el consumo energético en la planta STYROPEK Altamira, posicionándola como un agente clave en la reducción de emisiones de CO₂ y, por ende, un contribuyente esencial al esfuerzo mundial contra el cambio climático, en línea con el Objetivo de Desarrollo Sostenible (ODS) 13

Acción por el Clima. La transición hacia tecnologías más limpias, como luminarias LED y paneles solares, representa un paso fundamental hacia un futuro más sostenible y congruente con metas internacionales.

Este proyecto se enlaza sinérgicamente con otros ODS, especialmente el 7 Energía Asequible y No Contaminante, evidenciando que la adopción de tecnologías eficientes trae beneficios ambientales y económicos. El ahorro energético resultante no solo reduce los costos operativos, sino que también contribuye a la disponibilidad de energía asequible para la comunidad y las ciudades circundantes.

Alineado con el ODS 11 Ciudades y Comunidades Sostenibles, este estudio destaca cómo la eficiencia energética en una planta industrial puede influir positivamente en la sostenibilidad de las comunidades locales. Al implementar tecnologías que reducen las emisiones y optimizan el consumo de energía, STYROPEK Altamira se consolida como un catalizador de prácticas más sostenibles.

Trabajo futuro

Derivado del presente estudio se dará seguimiento a la instalación de luminaria LED de la marca Beghelli, ya que cuenta con una eficiencia mayor al sistema de iluminación actual. El beneficio que se obtendrá será un impacto positivo en la reducción de emisiones de CO₂ por demanda energética.

Referencias

- Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos [EPA]. (2019). *Greenhouse Gas Equivalencies Calculator*. <https://www.epa.gov/energy/greenhouse-gas-equivalencies-calculator>
- _____. (2022). *Emisiones de dióxido de carbono*. <https://espanol.epa.gov/la-energia-y-el-medioambiente/emisiones-de-dioxido-de-carbono#:~:text=La%20principal%20actividad%20del%20ser,tierra%20tambi%C3%A9n%20emiten%20CO2>
- ALPEK. (2021). *Alpek se compromete a lograr cero emisiones netas al 2050*. <https://www.alpek.com/es/alpek-committed-to-net-zero-emissions/>
- AlShafeey, M. y Rashdan, O. (2023). Quantifying the impact of energy consumption sources on GHG emissions in major economies: A machine learning approach. *Energy Strategy Reviews*, 49, 101159. <https://doi.org/10.1016/j.esr.2023.101159>
- Comisión Nacional para el Uso Eficiente de la Energía [CONUEE]. (2018) *Informe de desempeño anual 2018*. Secretaría de Energía. Informe de actividades 2018.pdf
- Forbes México. (2022). *CFE genera el 17% de las emisiones de CO₂ del país: Informe*. <https://www.forbes.com.mx/cfe-genera-el-17-de-las-emisiones-de-co2-del-pais-informe>
- Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático [INECC]. (2018). *Gases y compuestos de efecto invernadero*. <https://www.gob.mx/inecc/acciones-y-programas/gases-y-compuestos-de-efectoinvernadero#:~:text=El%20efecto%20invernadero%20ocurre%20de,a%20los%20%E2%80%939318%20%C2%B0C>
- Lipiäinen, S., Sillman, J., Vakkilainen, E., Soukka, R. y Tuomaala, M. (2024). Hydrogen transport options for a large industrial user: Analysis on costs, efficiency, and GHG emissions in steel mills. *Sustainable Production and Consumption*, 44, 1-13. <https://doi.org/10.1016/j.spc.2023.11.021>
- National Aeronautics and Space Administration [NASA]. (2022). *El 2021 empata como el sexto año más cálido en la tendencia de calentamiento, según un análisis de la NASA*. <https://www.nasa.gov/press-release/el-2021-empata-como-el-sexto-a-o-m-s-c-lido-en-la-tendencia-de-calentamiento-seg-n-un>
- Naciones Unidas. (s.f.). *¿Qué es el cambio climático?* <https://www.un.org/es/climatechange/what-is-climate-change>
- _____. (2015a). *ONU aboga por ampliar el uso de energías limpias*. <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/2015/05/onu-aboga-por-ampliar-el-uso-de-energias-limpias/>
- _____. (2015b). *La Asamblea General adopta la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible*. <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/2015/09/la-asamblea-general-adopta-la-agenda-2030-para-el-desarrollo-sostenible/>
- _____. (2021). *The Climate Crisis – A Race We Can Win*. <https://www.un.org/en/un75/climate-crisis-race-we-can-win>

- Secretaría de Energía [SENER]. (2015). *Estudios en materia de Eficiencia Energética*. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/315524/5_LED.pdf
- _____. (2020). *Entra en vigor el Programa Sectorial de Energía 2020-2024*. <https://www.gob.mx/sener/articulos/entra-en-vigor-el-programa-sectorial-de-energia-2020-2024>
- _____. (2021). *Reporte de avance de energías limpias*. <https://base.energia.gob.mx/prodesen22/AnexoII.pdf>
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales [SEMARNAT]. (2020). *Informe de Resultados del Registro Nacional de Emisiones 2015 – 2018*. [informe_rene_emisiones_2015-2018.pdf](http://www.gob.mx/informe_rene_emisiones_2015-2018.pdf) (www.gob.mx)
- STYROPEK. (2022). *Nuestro Compromiso / Política Integral de Seguridad, Salud, Protección Ambiental, Calidad y Sustentabilidad*. https://www.styropek.com/es/#politica_calidad.
- United Nations Framework Convention on Climate Change [UNFCCC]. (2022a). *Las emisiones mundiales de CO₂ repuntaron en 2021 hasta su nivel más alto de la historia*. Las emisiones mundiales de CO₂ repuntaron en 2021 hasta su nivel más alto de la historia | CMNUCC (unfccc.int)
- _____. (2022b). *Informe de la Conferencia de las Partes en calidad de reunión de las Partes en el Acuerdo de París sobre su cuarto período de sesiones*. FCCC/PA/CMA/2022/10/Add.1 (unfccc.int)

Capítulo 5

Biodigestores, una alternativa para el mejoramiento de la calidad de vida de los habitantes de zonas rurales en Veracruz

Jannya Pancardo Pérez¹
María Dolores Gracia Guzmán¹
Julio Mar Ortiz¹

Resumen

El crecimiento poblacional está generando una gran cantidad de residuos orgánicos. En las zonas rurales, tal problemática está relacionada con la falta de manejo de desechos de ganadería. Este capítulo presenta los resultados preliminares de un estudio cuantitativo enfocado en los municipios del norte de Veracruz -que es el principal productor de ganado bovino en México-. Por medio de una encuesta, se encontró que las zonas rurales carecen de servicios públicos y tienen dificultades para obtener gas de uso doméstico, lo que afecta su economía. Ahora bien, el gas puede ser obtenido del estiércol bovino mediante la utilización de biodigestores, por lo que se calculó el gas que podría obtenerse para el uso en el hogar. Sin embargo, no es una tarea fácil implementar biodigestores en esta zona, debido a que algunos habitantes no están familiarizados con estos temas, por lo que se han establecido estrategias a largo plazo para hacer conciencia de sus beneficios.

Palabras clave: biogás, biodigestor, residuos orgánicos, energía renovable, estiércol bovino.

¹ Profesores-investigadores de la Facultad de Ingeniería Tampico (FI), Universidad Autónoma de Tamaulipas. jpancardo@docentes.uat.edu.mx, mgracia@docentes.uat.edu.mx, jmar@docentes.uat.edu.mx

Introducción

Actualmente, en México existe una preocupación por incrementar la calidad de vida de los residentes de áreas rurales. Según la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT), en 2020 la generación de residuos sólidos urbanos (RSU) fue de 44.6 millones de toneladas. En ese año, los desechos orgánicos contribuyeron con 51.6 % de la composición, generando 23 millones de toneladas de residuos. Por otro lado, el estiércol de los animales contamina el ambiente, emite gases de efecto invernadero, dificulta el saneamiento y repercute en enfermedades (Ritchie, 2020). La generación desmedida de residuos fecales de ganado representa el 40 % de las emisiones globales de amoníaco y es una de las causas principales de la lluvia ácida que perjudica la biodiversidad (Mejía-López et al., 2020).

El biogás destaca como una alternativa para sustituir a los hidrocarburos; se traduce en un nuevo paradigma energético y representa oportunidades para la generación de energía de forma descentralizada, particularmente porque su origen es el material orgánico (Hernández y López, 2023). Según Achuri y Herrera (2023), la generación de biogás es un proceso de digestión en ausencia de oxígeno donde microorganismos anaerobios junto con reacciones químicas complejas, llevan adelante la mineralización de la materia orgánica hasta que se convierte en metano con alta capacidad calorífica y dióxido de carbono.

Korbag et al. (2020) mencionan que la producción de biogás es fundamental en el tratamiento de residuos, la gestión ambiental y la producción de energía. Su principal uso es para el hogar y la calefacción. Además, el biogás puro enriquecido con metano se puede utilizar para aplicaciones domésticas, automotrices (licuefacción) o para generación de energía. Para usuarios rurales, trae una gran cantidad de beneficios como el aprovechamiento de los desechos agrícolas, el ahorro de energía para la preparación de sus alimentos y la elaboración de fertilizante orgánico.

Hernández y López (2023) mencionan que los biodigestores transforman las excretas de origen animal en residuos útiles, aumentando la protección del suelo, agua y aire, disminuyendo la contaminación ambiental. Las excretas contienen microorganismos patógenos, larvas, huevos, pupas de invertebrados que, de no procesarse, podrían convertirse en plagas y causar enfermedades en las plantas que se cultivaron.

Ayala et al. (2022) comentan que la ganadería sostenible trae efectos positivos a la economía de las comunidades, al evitar prácticas que perjudican los suelos, como la sobrefertilización y la contaminación de las fuentes de agua dulce. El uso de biodigestores en zonas rurales permite la preparación de alimentos, la disminución de los daños al medioambiente y la resolución de problemas de gestión de residuos orgánicos.

Metodología

La presente investigación se desarrolló con el objetivo de proponer el uso de biodigestores en zonas rurales para mejorar la calidad de vida de sus habitantes y reducir los residuos orgánicos que dañan al medioambiente. Para alcanzar dicho propósito, se diseñó la siguiente estrategia metodológica:

1. Se encuestó a una muestra de 288 habitantes, calculada con datos del *Censo Agropecuario* del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI, 2022), en los municipios de Pánuco y Tampico Alto. Los datos arrojaron sus principales problemáticas y permitieron aportar alternativas de solución a largo plazo.
2. Se investigó la cantidad de bovinos en cada municipio de Veracruz -el mayor productor en el país-, de acuerdo con las funciones zootécnicas de cada uno, con la finalidad de obtener el total de residuos orgánicos -en específico, estiércol de vaca- a emplearse a futuro en el biodigestor.
3. Se propuso un biodigestor construido de forma manual como primera parte de la investigación, con el fin de mostrar sus beneficios a los habitantes de las zonas rurales y posteriormente implementar un programa de capacitación para que lo puedan construir.

Resultados

A continuación, se presentan los resultados del instrumento de recolección de datos. ¿Qué hace actualmente con los residuos que deja su explotación ganadera?



Figura 1. Resultados de la pregunta 1 de la encuesta

Fuente: elaboración propia.

Tabla 1. Análisis del resultado de la pregunta 1 de la encuesta

Pregunta 1. ¿Qué hace actualmente con los residuos que deja su explotación ganadera?		
Opciones de respuesta	Frecuencia	Porcentaje
Nada	254	88 %
Abono	23	8 %
Otro	11	4 %
Total	288	100 %

Fuente: elaboración propia.

El 8 % de los encuestados usa los residuos como abono; un 88 % no lo utiliza y el resto comenta que el estiércol seco al quemarse sirve como un repelente contra mosquitos.

b. De los siguientes beneficios, ¿cuáles serían los que considera más importantes para aplicar en su entorno?

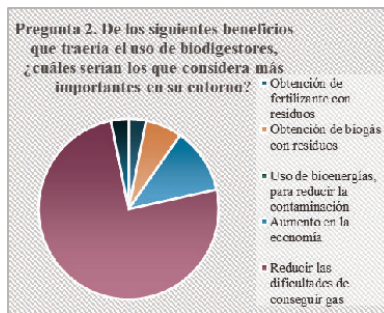


Figura 2. Resultados obtenidos de la pregunta 2

Fuente: elaboración propia.

Tabla 2. Análisis del resultado de la pregunta 2 de la encuesta

Pregunta 2. De los siguientes beneficios que traería el uso de biodigestores, ¿cuáles serían los que considera más importantes en su entorno?		
Opciones de respuesta	Frecuencia	Porcentaje
Obtención de fertilizante con residuos	9	3 %
Obtención de biogás con residuos	19	7 %
Uso de bioenergías, para reducir la contaminación	0	0 %
Aumento en la economía	34	12 %
Reducir las dificultades de conseguir gas	217	75 %
Precio del servicio accesible	0	0 %
Horario de atención flexible	9	3 %
Total	288	100 %

Fuente: elaboración propia.

El 75 % opina que el uso de biodigestores podría reducir las dificultades en conseguir gas para su uso doméstico, mientras que un 12 % piensa que podría ayudar a la economía de sus hogares y 3 % en obtener fertilizante mediante los residuos.

c. ¿Está dispuesto a recibir una capacitación que le permita obtener los beneficios anteriormente mencionados?

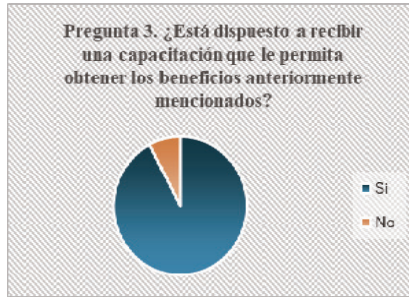


Figura 3. Resultados de la pregunta 3 de la encuesta

Fuente: elaboración propia.

Tabla 3. Análisis del resultado de la pregunta 3 de la encuesta

Pregunta 3. ¿Está dispuesto a recibir una capacitación que le permita obtener los beneficios anteriormente mencionados?		
Opciones de respuesta	Frecuencia	Porcentaje
Si	266	92 %
No	22	8 %
Total	288	100 %

Fuente: elaboración propia.

Un 92 % está dispuesto a recibir esta capacitación para tener gas y fertilizante a bajo costo, mientras que un 8 % no estuvo dispuesto o lo consideró innecesario.

Suministro de materia prima para el biodigestor

En la siguiente tabla se muestra la cantidad de bovinos de los 212 municipios del estado de Veracruz, según el INEGI, respecto a la función zootécnica, ya que estos datos nos van a ayudar a calcular la cantidad de estiércol de los bovinos, el cual servirá como materia prima para utilizar los biodigestores.

Tabla 4. Cantidad de bovinos según su función zootécnica

Cantidad de bovinos según su función zootécnica	
Beceros y becerras	775 792
Sementales	84 587
En engorda	318 725
Vaquillas para reemplazo	270 225
Reses para trabajo	4 879
Vacas en ordeña	1 239 756

Fuente: Censo Agropecuario del INEGI (2022).

Según Figueroa-Viramontes et al. (2009), para el cálculo de la cantidad de estiércol, los valores de la generación de heces y orina en bovino clasificado como tipo lechero, son los siguientes:

	Productivas	No productivas
	kg vaca ⁻¹ día ⁻¹	
Estiércol	43.2	19.4
Orina	23.1	12.2
Total	66.3	31.6

Vacas productivas: peso promedio= 630 kg, IDMS= 21.7 kg y PC= 17.5 %
 Vacas secas: peso promedio= 756 kg, IDMS= 10.4 kg y PC= 13.3 %
 Vaquillas: peso promedio= 437 kg, IDMS= 8.34kg y PC= 11.2 %.

Figura 4. Datos relacionados con las heces y la orina en bovino tipo “lechero”

Fuente: Figueroa-Viramontes et al. (2009).

La siguiente tabla muestra el cálculo de las toneladas de estiércol bovino que se pueden obtener de forma anual en los municipios de Veracruz:

Tabla 5. Cálculo de las toneladas totales

Cantidad de bovinos según su función zootécnica	Estiércol generado diario (kg)	Estiércol generado anual (kg)	Toneladas totales
Beceros y becerras	775792	33514214,4	12232688,26
Sementales	84587	3654158,4	1333767,816
En engorda	318725	13768920	5025655,8
Vaquillas para reemplazo	270225	11673720	4260907,8
Reses para trabajo	4879	210772,8	769320,72
Vacas en ordeña	1239756	53557459,2	19548472,61
Total	2693964	116379244,8	42478424,35

Fuente: elaboración propia con base en INEGI (2022).

Es importante señalar que existe un incremento promedio anual de un 2 % en la población ganadera (cabezas de bovinos) en el estado de Veracruz, ya que el cálculo que se realizó en cuanto a la cantidad de estiércol bovino generado el cual va a ser utilizado como materia prima del biodigestor.

Tabla 6. Total de población ganadera (cabezas de bovinos) con incremento de un 2 %

Año	Total de población ganadera (cabezas de bovinos)
2013	3.844.989
2014	4.150.377
2015	4.233.896
2016	4.273.827
2017	4.302.814
2018	4.306.215
2019	4.386.162
2020	4.470.648
2021	4.549.067
2022	4.602.595

Fuente: elaboración propia.

En la siguiente figura se puede observar que ha existido un incremento en la población de ganado, por lo que es importante usar los residuos orgánicos.

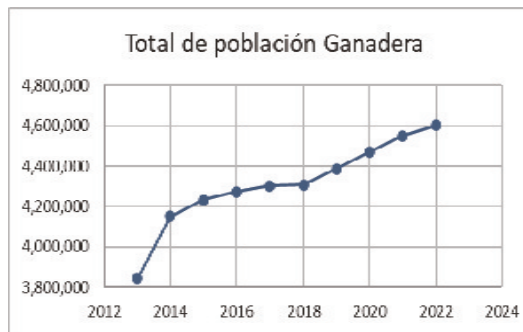


Figura 5. Total de población ganadera anual

Fuente: elaboración propia.

Discusión y conclusiones

El uso de los biodigestores en el sector ganadero es complejo y está relacionado con factores como el desarrollo social, científico y tecnológico en estos sectores. Los residuos sólidos son una oportunidad para generar energía renovable y una medida contundente para la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero. Utilizar biodigestores que transformen residuos orgánicos en biogás impactaría en los Objetivos de Desarrollo Sostenible de la Agenda 2030 (ODS), al producir gas de manera doméstica, ahorrar costos de transporte y fomentar el ahorro. Además, en el futuro se busca obtener fertilizante, que en la actualidad tiene un costo alto. El estudio cuantitativo identificó que, en los municipios del norte de Veracruz, el principal problema es conseguir gas para su uso doméstico, en tanto la proyección realizada mostró que el estiércol de la vaca es la principal materia prima para alimentar el biodigestor. Las ciudades y comunidades sostenibles emplean residuos orgánicos para reducir el daño al ambiente y convertir un desecho en un producto con beneficios.

Trabajo futuro

Se busca aplicar la analítica predictiva para calcular la producción del biogás y obtener la cantidad de subproductos -como fertilizantes-, además de crear un programa de capacitación para que los habitantes de las zonas rurales de Veracruz produzcan biodigestores como alternativa para mejorar su calidad de vida. También es factible gestionar la recolección de estos residuos orgánicos y transportarlos a otras comunidades no ganaderas.

Referencias

- Achuri, P. A. y Herrera, D. A. (2023). Implementación de biodigestores para el aprovechamiento de residuos en pequeñas unidades productivas agropecuarias. *Publicaciones e Investigación*, 17(3).
- Ayala, S. A., Jijón, P. F. y Chacha, P. M. (2022). Estudio de un sistema de energía renovable para la producción de biogás a partir del estiércol de ganado en la hacienda Nueva Esperanza (Cotopaxi, Ecuador). *Revista Espacios*, 43(05), 64-72.
- Barrera-Cardoso, E., Odales-Bernal, L., Carabeo-Pérez, A., AlbaReyes, Y. y Hermida-García, F. (2020). Recopilación de aspectos teóricos sobre las tecnologías de producción de biogás a escala rural. *Tecnología Química*, 40(2), 305.
- Figueroa-Viramontes, U., Núñez-Hernández, G., Delgado, J. A., Cueto-Wong, J. y Flores-Margez, J. (2009). Estimación de la producción de estiércol y de la excreción de nitrógeno, fósforo y potasio por bovino lechero en la Comarca Lagunera. En I. Orona, E. Salazar, M. Fortis, H. Trejo, C. Vázquez, J. López et al. (Eds.), *Agricultura orgánica* (pp. 128-151). FAZ-UJED. SMCS.
- Hernández, M. A. y López, C. W. (2023). Diseño de biodigestor casero para producción de biogás y fertilizante. *Revista Multidisciplinaria de Investigación*, 2(1), 65-71.
- Korbag, I., Saleh, S. M., Boghazala, H., Ahmeedah, M. y Abusasiyah, A. (2020). *Recent Advances of Biogas Production and Future Perspective*. IntechOpen. DOI: 10.5772/intechopen.93231
- Mejía-López, M. P., de Oca, E. R. y Juantorena-Ugás, A. (2020). Energía renovable en traspatio: ¿Una alternativa en México? *Bioagrociencias*, 13(1), 23-30.
- Ritchie, H. (2020). Sector by sector: where do global greenhouse gas emissions come from? *Our World in Data*. <https://ourworldindata.org/ghg-emissions-by-sector>

Capítulo 6

Análisis: implementación de la economía circular en la gestión industrial mediante sistemas de información

José Luis Martínez Navarro¹

Paulina Fernández Izaguirre¹

Jesús Salvador Segura Morales¹

Resumen

El presente capítulo tiene como objetivo analizar y comparar los beneficios de la economía circular en la gestión industrial, destacando el papel estratégico de los sistemas de información para la toma de decisiones basada en datos. La adopción de estos sistemas contribuye a la gestión eficiente de los recursos, la optimización de los procesos productivos y la reducción de impactos ambientales, alineándose con los Objetivos de Desarrollo Sostenible de la Agenda 2030 y las proyecciones de la Visión 2050 para un desarrollo sostenible. La fundamentación se estructura en torno a la evolución histórica de los modelos desde la economía lineal tradicional hasta el paradigma circular, integrando las teorías clásicas de la economía, las escuelas utilitaristas y marginalistas, así como la economía circular y regenerativa. El enfoque de investigación es cualitativo, con un diseño no experimental, longitudinal, orientado al análisis documental y comparativo de casos. Asimismo, se examinan dos empresas que han incorporado sistemas de información ambiental, gestión energética y planificación de recursos empresariales para monitorear y optimizar sus operaciones; los hallazgos confirman que su implementación impulsa la mejora continua, la innovación empresarial y la capacidad de las organizaciones para cumplir con compromisos de sostenibilidad, reducción de costos y creación de valor económico, social y ambiental a largo plazo.

¹ Profesores de la Facultad de Ingeniería Tampico (FI), Universidad Autónoma de Tamaulipas. jlmartinez@docentes.uat.edu.mx, pizaguirre@uat.edu.mx, samorales@uat.edu.mx

Palabras clave: economía circular, sistemas de información, objetivos de desarrollo sostenible, gestión industrial, mejora continua.

Introducción

La economía circular es un enfoque esencial para abordar los desafíos ambientales, sociales y económicos que enfrentan las sociedades contemporáneas, ya que su objetivo principal es preservar el valor de los materiales y productos durante el mayor tiempo posible. Este modelo propone reducir la cantidad de desechos enviados de regreso a la naturaleza, logrando que estos se reintegren al sistema productivo para su reutilización (Deckymn, 2018). De este modo, se busca reducir al mínimo la generación de residuos y cerrar su ciclo de vida de manera que los desechos se transformen en nuevos recursos para las organizaciones (Zaman, 2010). Según la Ellen MacArthur Foundation (2019), la economía circular constituye un enfoque sistémico que ofrece soluciones a desafíos globales como el cambio climático, la pérdida acelerada de biodiversidad y la contaminación de suelos y océanos, buscando posicionarse como un modelo que beneficie a las empresas, al medioambiente y a la sociedad en general. Este planteamiento está relacionado con los Objetivos de Desarrollo Sostenible de la Agenda 2030, cuyos objetivos 12 y 13 promueven el consumo responsable y la acción por el clima (Organización de las Naciones Unidas, 2018). Sin embargo, en el horizonte de largo plazo, la Visión 2050 impulsada por el World Business Council for Sustainable Development (2021) amplía esta perspectiva, proyectando un futuro basado en la regeneración de ecosistemas, el diseño de productos circulares, la neutralidad de carbono y la innovación tecnológica como pilares del desarrollo sostenible.

Los orígenes de la economía se encuentran en la administración doméstica en la antigua Grecia, conocida como *oikonomía*, centrada en la gestión eficiente de los recursos familiares y comunitarios (Smith, 1794). Posteriormente, los economistas clásicos como Adam Smith y David Ricardo desarrollaron teorías sobre la producción y distribución de la riqueza, dando lugar a una visión lineal de la economía basada en la extracción, transformación y descarte de recursos (Ricardo, 1817). Las escuelas utilitaristas y marginalistas profundizaron el análisis de la utilidad y el valor, promoviendo modelos de maximización de beneficios que durante siglos fueron el referente predominante en la organización de los sistemas productivos (Mill, 1863; Jevons, 1871). Con la Revolución Industrial, estas concepciones contribuyeron a consolidar patrones de crecimiento que hoy resultan insostenibles por su impacto ambiental acumulado (Pearce y Turner, 1995).

En la actualidad, la gestión eficaz de los desechos y de los flujos de materiales se ha vuelto un factor crítico en la transición hacia la economía circular.

La adecuada dirección de los recursos permite a las organizaciones optimizar el uso de materias primas, minimizar la generación de residuos y cerrar el ciclo de vida de los productos, posibilitando su reutilización eficiente (Arroyo, 2018). Esto reduce la presión sobre los recursos naturales y el impacto ambiental negativo asociado con la extracción, procesamiento y disposición final de los residuos que, en muchos casos, se vierten en cuerpos de agua o suelos productivos, afectando su disponibilidad para las generaciones futuras (Ellen MacArthur Foundation, 2019).

Una gestión responsable genera beneficios económicos al implementar estrategias de reducción, reutilización y reciclaje. Estas prácticas permiten disminuir costos operativos, cumplir con regulaciones ambientales, acceder a nuevos mercados y crear oportunidades de empleo en sectores relacionados con la gestión de materiales y tecnologías limpias (Naciones Unidas, 2018). Así, la economía circular es un modelo de desarrollo resiliente y equilibrado que integra objetivos sociales y económicos con la conservación ambiental. Para implementar con éxito estas estrategias, es indispensable contar con el soporte tecnológico y una arquitectura de datos que permitan recopilar, procesar, almacenar y analizar grandes volúmenes de información de manera oportuna y confiable. Los sistemas de información se definen como un conjunto coordinado de recursos humanos, materiales y tecnológicos que transforman datos en conocimiento útil para la toma de decisiones estratégicas. Entre sus ventajas destacan la organización centralizada de la información, el acceso ágil y la mejora continua de los procesos (Barrios, 2017).

Además, los sistemas de planificación de recursos empresariales (ERP), gestión ambiental, gestión energética y las plataformas de monitoreo de emisiones son determinantes en la implementación de la economía circular (Deckymn, 2018). Estos sistemas integran datos de toda la cadena de valor y proporcionan una visión unificada de las operaciones, permitiendo identificar patrones, optimizar procesos y asegurar la trazabilidad de los materiales desde su origen hasta su disposición final (Ellen MacArthur Foundation, 2019). La capacidad de analizar de forma predictiva grandes volúmenes de datos permite a las empresas anticipar necesidades de insumos, prevenir excedentes, reducir residuos y diseñar productos más sostenibles.

El objetivo principal de esta investigación es analizar y comparar los beneficios que aporta la implementación de la economía circular en la gestión industrial mediante el uso de sistemas de información, evaluando su impacto en la optimización de procesos productivos, la reducción de impactos ambientales y el cumplimiento de los compromisos de sostenibilidad establecidos en la Agenda 2030 y la Visión 2050. Asimismo, este trabajo busca comprender cómo la arquitectura de datos genera conocimiento útil para la innovación de empresas mexicanas.

Metodología

El enfoque de este estudio es cualitativo, dado que se orienta a comprender en profundidad cómo la adopción de sistemas de información facilita la implementación de la economía circular en el contexto industrial mexicano. De acuerdo con Hernández et al. (2006), el enfoque cualitativo se caracteriza por emplear métodos de recolección de datos no estandarizados y un análisis no estadístico, que busca interpretar los fenómenos en su contexto natural y obtener una visión holística de los procesos estudiados. En esta perspectiva, el conocimiento se construye de manera inductiva, las hipótesis emergen y se refinan a medida que se avanza en la exploración de la información.

Se fundamenta en un diseño no experimental de tipo longitudinal, puesto que no se manipulan las variables deliberadamente, sino que se observan tal como ocurren en la realidad. Además, implica que los datos se recogen sin intervenir en los hechos, permitiendo describir y analizar los fenómenos con base en su dinámica propia (Hernández et al., 2006). La característica longitudinal del estudio radica en que se analizaron los antecedentes históricos de la economía circular, su evolución conceptual y su aplicación contemporánea en la industria, considerando cambios, tendencias y resultados a lo largo del tiempo.

La investigación integra técnicas de análisis documental, centradas en la revisión de fuentes secundarias, tales como artículos académicos, reportes empresariales, documentos de organismos internacionales y estudios de caso. Este análisis se complementó con la sistematización de información relativa a políticas públicas, planes estratégicos y experiencias prácticas de empresas que han incorporado la economía circular en sus procesos productivos.

Método de investigación

Para alcanzar los objetivos planteados, se siguieron las siguientes etapas metodológicas:

1. Análisis histórico y conceptual. Se recopiló y examinó información sobre los orígenes de la economía lineal y el surgimiento del enfoque circular, considerando la evolución del pensamiento económico desde el enfoque clásico hasta las corrientes contemporáneas.
2. Revisión de tendencias y estrategias internacionales. Se estudiaron los lineamientos de la Agenda 2030 y de la Visión 2050, así como las políticas implementadas en la Unión Europea y Asia, con el propósito de identificar los principales marcos normativos y las mejores prácticas en materia de economía circular y uso de sistemas de información.

3. Estudio de casos en la industria mexicana. Se seleccionaron como objeto de análisis dos empresas representativas, Grupo Bimbo ® y CEMEX ®, debido a su liderazgo en el desarrollo de prácticas circulares y su integración de tecnologías de información en la gestión de sus operaciones. Se recopiló información de sus reportes de sostenibilidad, publicaciones institucionales y entrevistas publicadas con directivos, lo que permitió describir sus estrategias y evaluar los beneficios obtenidos.
4. Identificación y clasificación de sistemas de información. Se documentaron los principales sistemas utilizados por las empresas estudiadas, incluyendo sistemas de gestión ambiental, de información geográfica, de planificación de recursos empresariales (ERP), de gestión energética y de residuos. Esta etapa permitió comprender cómo la arquitectura de datos optimiza los procesos, reduce impactos y garantiza la trazabilidad de la información.
5. Comparación y síntesis de hallazgos. Finalmente, se realizó un análisis comparativo de los casos estudiados, sistematizando los resultados alcanzados y destacando los factores críticos de éxito, así como los retos enfrentados en la implementación de la economía circular mediante sistemas de información. La síntesis de estos hallazgos permitió formular recomendaciones para otras organizaciones interesadas en adoptar prácticas sostenibles.

Resultados de la investigación

Análisis histórico y conceptual

En la primera fase metodológica se realizó un análisis documental sobre los orígenes de la economía lineal y la evolución hacia la economía circular, con el fin de comprender los fundamentos conceptuales que sustentan esta transición. La revisión permitió identificar que la Revolución Industrial marcó un punto de inflexión en la historia económica global, al promover el uso intensivo de recursos naturales como carbón, vapor y petróleo, que potenciaron la producción industrial en masa (Smith, 1794; Ricardo, 1817). Este periodo se caracterizó por la expansión del comercio internacional, el crecimiento poblacional y el aumento sostenido de la demanda de bienes y servicios.

Durante la segunda mitad del siglo XIX, la población mundial se duplicó, mientras que la cantidad de materiales que fluyen en la economía se triplicó. Si bien este fenómeno trajo consigo un progreso sin precedentes en términos de calidad de vida y bienestar material, también generó un patrón de consumo lineal que se tradujo en una creciente presión sobre los ecosistemas y los recursos finitos (Pearce

y Turner, 1995). El enfoque lineal de *extraer, producir, consumir y desechar* se mantuvo como paradigma dominante durante casi dos siglos.

Los primeros cuestionamientos críticos al modelo lineal emergieron a finales del siglo XX, cuando diversos autores comenzaron a considerar los impactos ambientales y sociales de la actividad productiva. La economía circular surge como una propuesta transformadora que busca separar el crecimiento económico del consumo de recursos no renovables y regenerar los sistemas naturales (Ellen MacArthur Foundation, 2019).

La revisión conceptual permitió identificar que la economía circular se sustenta en tres principios esenciales: 1) Diseñar estrategias que reduzcan los desechos y la contaminación desde la etapa inicial de producción. 2) Mantener productos y materiales en uso durante el mayor tiempo posible, maximizando su valor económico y funcional. 3) Regenerar los sistemas naturales mediante prácticas que restauren los recursos y la biodiversidad.

Revisión de tendencias y estudios internacionales

La segunda fase metodológica consistió en identificar y analizar los principales referentes internacionales que han impulsado la economía circular como un enfoque estratégico de desarrollo. Entre los marcos más influyentes se encuentra la Agenda 2030 de las Naciones Unidas, que define 17 Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) y 169 metas orientadas a erradicar la pobreza, proteger el planeta y garantizar la prosperidad. En particular, los ODS 12 y 13 promueven la producción y el consumo responsables y la acción frente al cambio climático (Naciones Unidas, 2018).

La Visión 2050 del World Business Council for Sustainable Development (2021) proyecta un futuro con economías regenerativas, sistemas productivos neutros en carbono y estrategias de restauración ambiental, destacando la innovación y la digitalización como factores de cambio.

A nivel regional, la Unión Europea ha desarrollado un Plan de Acción para la Economía Circular, que impulsa el diseño de productos sostenibles, la reducción de residuos y el desarrollo de mercados de materias primas secundarias (Ellen MacArthur Foundation, 2019). Este enfoque es hoy un referente internacional de buenas prácticas.

En Asia, países como China y Japón cuentan con estrategias nacionales que incluyen incentivos fiscales, formación especializada y objetivos claros de reducción de residuos, favoreciendo la transición hacia modelos productivos circulares. La revisión de estos marcos permitió comprender que la economía circular no es una tendencia aislada, sino una respuesta estructural frente a los límites planetarios y el

reto de sostener el bienestar económico a largo plazo. A continuación, se presenta un esquema del proceso de economía circular (Figura 1).



Figura 1. Etapas de la economía circular

Fuente: Fundación Ellen MacArthur (2019).

Estudio de casos en la industria mexicana

La tercera fase metodológica se enfocó en el análisis detallado de dos empresas mexicanas que han incorporado la economía circular en su modelo de gestión. Este estudio permitió identificar prácticas concretas, beneficios obtenidos y desafíos enfrentados en la transición hacia procesos más sostenibles.

Grupo Bimbo® ha desarrollado una estrategia integral de sostenibilidad para lograr que el 100 % de sus envases sean reciclables, biodegradables o compostables para 2025 y alcanzar emisiones netas cero de carbono hacia 2050. Estas metas se sustentan en inversiones en tecnologías de eficiencia energética, innovación en empaques y programas de reducción de desperdicio de alimentos. Además, también ha implementado iniciativas de recuperación de materiales, gestión responsable del agua y sensibilización de proveedores y consumidores.

CEMEX® ha apostado por una economía circular basada en la reutilización de residuos industriales como combustibles alternativos, reciclaje de materiales de demolición y desarrollo de cementos con una menor huella ambiental. Sus objetivos incluyen reducir las emisiones de CO₂ y minimizar los residuos enviados a disposición final, a través de procesos que integran innovación tecnológica y responsabilidad ambiental.

Los beneficios alcanzados por ambas organizaciones fueron sistematizados con base en fuentes documentales y se presentan en la Tabla 1.

Tabla 1. Beneficios de la aplicación de la economía circular en Grupo Bimbo® y CEMEX®

Grupo Bimbo®	CEMEX®
Reducción de costos operativos: Al reciclar y reutilizar materiales disminuyó la dependencia de materias primas nuevas, reduciendo así los costos de adquisición.	Ahorro de costos y eficiencia operativa: Al utilizar residuos industriales como combustibles alternativos, reduciendo los costos asociados con los combustibles fósiles, además al reciclar materiales de construcción se han disminuido los costos de disposición de residuos y la compra de nuevas materias primas.
Sostenibilidad ambiental: Se ha reducido la cantidad de plástico que termina en vertederos, contribuyendo a un entorno más limpio.	Reducción del impacto ambiental: Mediante la reutilización de materiales de demolición y el reciclaje en la producción de cemento se ha logrado reducir los residuos enviados a los vertederos; además, la optimización de los procesos de producción ha llevado a una reducción de las emisiones de CO2.
Mejora de la imagen corporativa: La implementación de prácticas sostenibles ha mejorado la percepción pública de la organización, como una empresa socialmente responsable y comprometida con el medioambiente.	Ventajas competitivas: Se ha mejorado el cumplimiento de las regulaciones ambientales, evitando sanciones y fortaleciendo su posición en mercados donde la sostenibilidad es una prioridad.
Innovación y mejora continua: innovación de los procesos productivos y diseño de productos, promoviendo una cultura de mejora continua.	Imagen y responsabilidad social: CEMEX se destaca como líder en sostenibilidad en la industria de la construcción, mejorando su imagen pública y logrando el reconocimiento como socialmente responsable.

Fuente: elaborado a partir de Grupo Bimbo® (2024) y CEMEX® (2024).

Este estudio permitió observar cómo la economía circular puede implementarse de manera práctica en sectores industriales con realidades productivas distintas, generando impactos positivos tanto económicos como ambientales.

Identificación y clasificación de información

Durante la cuarta fase metodológica se identificaron y clasificaron los sistemas de información empleados por las empresas objeto de estudio. Estos sistemas, que se detallan en la Tabla 2, constituyen la base tecnológica que permite capturar, procesar y analizar datos de manera sistemática a lo largo de la cadena de valor, facilitando la toma de decisiones basadas en evidencia y la mejora continua de los procesos productivos.

Tabla 2. Sistemas de información utilizados en las empresas objeto de estudio

Grupo Bimbo®	CEMEX®
Sistemas de gestión ambiental: Utilizados para monitorear y controlar los impactos ambientales de la organización, rastrear el uso de los recursos y la generación de residuos, facilitando la toma de decisiones para mejorar la sostenibilidad.	Sistemas de información geográfica (SIG): Utilizados para gestionar y optimizar la logística y distribución de productos, reduciendo el consumo de combustible y las emisiones de carbono.
Sistemas ERP (<i>Enterprise Resource Planning</i>): Integran y gestionan todas las operaciones de la empresa, desde la producción hasta la distribución, permitiendo una mejor coordinación y eficiencia en la gestión de recursos.	Sistemas de gestión de la cadena de suministro (SCM): Implementados para optimizar todas las fases de la cadena de suministro, desde la extracción de materias primas hasta la entrega de productos finales, mejorando la eficiencia y sostenibilidad en sus operaciones.
Sistemas de gestión de residuos: Implementados para monitorear, clasificar y gestionar los residuos generados en los procesos productivos, promoviendo el reciclaje y la reutilización de materiales.	Sistemas de gestión de la producción: Utilizados para supervisar y optimizar los procesos de producción, mejorando la eficiencia y reduciendo el desperdicio en la fabricación de cemento.
Sistemas de gestión energética: Utilizados para monitorear y optimizar el consumo de energía en las plantas de producción, contribuyendo a la reducción de la huella de carbono.	Sistemas de monitoreo de emisiones: Implementados para controlar y reducir las emisiones de gases de efecto invernadero en todas las operaciones, alineándose con los objetivos de sostenibilidad y regulaciones ambientales.

Fuente: elaborado a partir de Grupo Bimbo® (2024) y CEMEX® (2024).

Esta identificación evidenció que la arquitectura de datos y la digitalización son componentes esenciales de la economía circular, al permitir una trazabilidad precisa, una integración de procesos y una capacidad de respuesta ágil ante cambios regulatorios y de mercado.

Comparación y síntesis de hallazgos

A partir de la comparativa de los sistemas de información implementados por Grupo Bimbo® y CEMEX®, correspondiente a la quinta fase metodológica, se identificaron diversos aspectos clave que evidencian la relevancia y efectividad de estos sistemas como soporte fundamental en la transición hacia la economía circular. Ambas empresas han logrado avances consistentes en la gestión sostenible de sus recursos, la optimización de procesos operativos y el cumplimiento de objetivos de sostenibilidad, constituyéndose en referentes que pueden inspirar a otras organizaciones interesadas en adoptar este modelo.

En primer lugar, destaca el papel de los sistemas de gestión ambiental en Grupo Bimbo®, cuya capacidad para monitorear y controlar indicadores críticos

permite rastrear el uso de recursos naturales, cuantificar la generación de residuos y evaluar impactos ambientales en tiempo real. Esta información facilita la toma de decisiones informadas orientadas a mitigar riesgos, reducir costos y cumplir con regulaciones. La integración de datos ambientales y operativos dentro de estos sistemas permiten consolidar una cultura de sostenibilidad a nivel organizacional.

Por su parte, CEMEX® ha utilizado los sistemas de información geográfica (SIG) en la optimización de la logística y distribución de productos, logrando disminuir el consumo de combustibles y las emisiones de carbono asociadas al transporte. Estos sistemas permiten gestionar datos espaciales y logísticos de forma dinámica, posibilitando la planificación eficiente de rutas, la reducción de tiempos de entrega y el aprovechamiento más racional de los recursos disponibles. Esta capacidad de análisis geoespacial se traduce en una contribución significativa tanto a la eficiencia operativa como a la disminución de la huella ambiental de sus operaciones.

En el ámbito de los sistemas ERP, Grupo Bimbo® ha integrado estos recursos tecnológicos para coordinar de manera centralizada las operaciones de producción, distribución y gestión financiera, promoviendo una mayor eficiencia y coherencia entre las distintas áreas funcionales. Esta integración, maximiza el valor de los materiales, reduce el desperdicio y asegura que las decisiones estratégicas se fundamenten en información confiable y actualizada. De forma paralela, CEMEX® emplea sistemas de gestión de la cadena de suministro (SCM) que optimizan cada fase del ciclo productivo, desde la extracción de materias primas hasta la entrega de los productos terminados, contribuyendo a una gestión más sostenible y rentable.

La implementación de sistemas de gestión en Grupo Bimbo® ha permitido establecer procesos rigurosos de clasificación, registro y aprovechamiento de los residuos generados en sus plantas de producción. Esta práctica promueve el reciclaje, la reutilización de materiales, reduce la presión sobre los recursos naturales y minimiza la generación de desechos. En CEMEX®, el uso de sistemas de gestión de la producción ha optimizado procesos industriales, incrementando la eficiencia operativa y disminuyendo los residuos resultantes de la fabricación de cemento.

Finalmente, los sistemas de gestión energética en Grupo Bimbo® y los sistemas de monitoreo de emisiones en CEMEX® son herramientas para reducir la huella de carbono, controlar el consumo de energía y reducir las emisiones de gases de efecto invernadero, alineándose con la Agenda 2030 y la Visión 2050, así como con las normativas ambientales vigentes.

La evidencia recopilada confirma que la adopción de sistemas de información en la gestión industrial constituye una estrategia eficaz y necesaria

para impulsar la economía circular. La capacidad de estos sistemas para integrar, procesar y analizar datos en tiempo real, potencia la eficiencia de los procesos productivos, facilita la identificación de oportunidades de innovación y fortalece la sostenibilidad ambiental-económica de las organizaciones. Este enfoque representa una respuesta a los desafíos ambientales y una ventaja competitiva para las empresas que buscan liderar la transición hacia modelos de negocio más resilientes.

Conclusiones

El presente trabajo de investigación permitió analizar y comparar los beneficios derivados de la implementación de la economía circular en la gestión industrial, con un enfoque particular en el uso estratégico de sistemas de información para apoyar la toma de decisiones y optimizar procesos productivos. El estudio cualitativo y longitudinal, basado en el análisis documental y la revisión de dos empresas mexicanas, confirma que la adopción de modelos circulares respaldados por tecnologías digitales contribuye de manera significativa a la sostenibilidad empresarial, la eficiencia operativa y el cumplimiento de compromisos internacionales. Entre los hallazgos más relevantes de esta investigación destacan los siguientes:

- La integración de sistemas de información facilita una gestión más eficiente de los recursos materiales y energéticos, promoviendo prácticas de reutilización, reciclaje y reducción de desechos que son esenciales para consolidar la economía circular en los procesos industriales.
- La economía circular aporta beneficios ambientales, disminuye costos operativos, mejora la trazabilidad de los insumos y fortalece la competitividad de las empresas en mercados cada vez más exigentes en materia de sostenibilidad.
- La implementación de sistemas de información ambiental, gestión energética, planificación de recursos empresariales y monitoreo de emisiones ha sido determinante para alcanzar los objetivos de reducción de impacto ambiental, innovar en procesos productivos y consolidar una cultura organizacional comprometida con la mejora continua.
- La adopción de estos sistemas permite a las empresas responder con mayor agilidad a regulaciones nacionales e internacionales, así como anticipar tendencias y demandas del mercado, generando valor económico, social y ambiental.

Asimismo, los hallazgos obtenidos confirman que la economía circular y el uso de sistemas de información en la industria mexicana contribuyen a la consecución de

los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) de la Agenda 2030 y a las proyecciones de sostenibilidad de la Visión 2050:

- El ODS 12 Producción y consumo responsables: se ve fortalecido por la implementación de sistemas que optimizan la gestión de residuos, el reciclaje y los patrones de producción.
- El ODS 13 Acción por el clima: se materializa mediante la aplicación de sistemas de gestión energética y de monitoreo de emisiones que reducen la huella de carbono y contribuyen a la descarbonización.
- El ODS 9 Industria, innovación e infraestructura: se refuerza a través de la integración de tecnologías avanzadas que promueven la eficiencia operativa, el diseño de productos sostenibles y el uso intensivo de datos para la toma de decisiones estratégicas.
- El ODS 8 Trabajo decente y crecimiento económico: se ve impulsado gracias a la creación de nuevas oportunidades de negocio, el fortalecimiento de cadenas de valor sostenibles y el desarrollo de capacidades técnicas y profesionales en torno a la gestión circular.

Finalmente, el análisis comparativo evidencia que la transición hacia modelos de economía circular respaldados por sistemas de información es una necesidad estratégica para las empresas que buscan consolidar su liderazgo en un entorno global que exige responsabilidad ambiental, innovación permanente y creación de valor compartido.

Trabajo a futuro

Entre los aspectos que se proponen como líneas de trabajo a futuro destacan los siguientes:

- Ampliar la cobertura sectorial del estudio, incorporando casos de empresas de otros sectores industriales como el automotriz, textil, agroalimentario y tecnológico, con el propósito de identificar las particularidades, retos y mejores prácticas que enfrentan diferentes industrias en la adopción de la economía circular y la digitalización de procesos. Este enfoque permitirá generar comparativos más robustos y comprender cómo varía la aplicación de estos modelos según las características productivas y regulatorias de cada sector.
- Desarrollar evaluaciones cuantitativas que midan los beneficios económicos, ambientales y sociales asociados a la implementación de sistemas de información en la economía circular. Para ello, se plantea el diseño de métricas de evaluación que cuantifiquen indicadores como el

- ahorro de costos operativos, la reducción de residuos sólido o emisiones, el aprovechamiento energético y la mejora de la competitividad empresarial.
- Analizar la integración de tecnologías emergentes tales como la inteligencia artificial, el Internet de las Cosas (IoT) y el *blockchain* en los sistemas de información existentes, con el fin de explorar su potencial para optimizar la trazabilidad de materiales, automatizar procesos industriales y fortalecer la toma de decisiones basada en datos.
 - Estudiar la aplicación de sistemas de información en pequeñas y medianas empresas (Pymes) que enfrentan desafíos por sus características organizativas y restricciones de recursos permitirá identificar barreras, oportunidades y condiciones habilitantes, así como diseñar estrategias, políticas públicas y herramientas tecnológicas que faciliten la transición hacia modelos circulares inclusivos y escalables en este segmento empresarial.
 - Explorar el vínculo entre economía circular y políticas públicas, considerando que los marcos regulatorios, los incentivos fiscales y las estrategias nacionales pueden acelerar la implementación de sistemas de información alineados con los compromisos internacionales de la Agenda 2030 y las metas de la Visión 2050.

Descargo de responsabilidad

Los autores manifiestan que no han recibido financiamiento por parte de las empresas señaladas en este trabajo; tampoco existe conflicto de interés. La información aquí presentada responde solo a objetivos académicos.

Referencias

- Arroyo, F. R. (2018). La economía circular como factor de desarrollo sustentable del sector productivo. *INNOVA Research Journal*, 3, 78-98.
- Barrios, E. (2017). *La contabilidad y los sistemas de información contable en las organizaciones*. Ediciones UNPAedita.
- CEMEX México. (s.f.). *CEMEX México: Construyendo un mejor futuro*. <https://www.cemexmexico.com/>
- Deckymn, S. (2018). Circular Flanders: adaptive policy for a circular economy. En H. Lehmann. (Ed.), *Factor X: Challenges, Implementation Strategies and Examples for a Sustainable Use of Natural Resources*. Springer.
- Ellen MacArthur Foundation. (2019). *Completando la imagen: cómo la economía circular ayuda a afrontar el cambio climático*. Cowes.
- Grupo Bimbo. (s.f.). *Grupo Bimbo: Alimentamos un mundo mejor*. <https://www.grupobimbo.com/>
- Hernández, R., Fernández, C., Baptista, P. (2006). *Metodología de la Investigación*. Mc Graw Gill.
- Jevons, W. S. (1871). *Theory of Political Economy*. MacMillan.
- Mill, J. S. (1863). *Utilitarianism*. The Floating Press.
- Naciones Unidas. (2018). *La Agenda 2030 y los Objetivos de Desarrollo Sostenible: una oportunidad para América Latina y el Caribe*.
- Pearce, D. W. y Turner, R. K. (1995). *Economía de los recursos naturales y del medio ambiente*. Celeste Ediciones.
- Ricardo, D. (1817). *Principios de economía política y tributación*. John Murray.
- Smith, A. (1794). *La riqueza de las naciones*. Oficina de Viuda e Hijos de Santander.
- World Business Council for Sustainable Development [WBCSD]. (2021). *Vision 2050: Time to Transform*.
- Zaman, A. U. (2010). Comparative study of municipal solid waste treatment technologies using life cycle assessment method. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 7(2), 225-234.

Capítulo 7

Monitoreo de la línea de costa en playa Velamar con DSAS y topografía GNSS

María Luisa Berenice Benito Díaz¹
Esperanza Martínez Cano¹
Héctor Orlando Sánchez Velázquez¹

Resumen

Las líneas de costa en la región del Caribe han presentado nuevas dinámicas litorales a causa de diferentes factores climáticos, geológicos y oceanográficos (Dávila, 2020). El incremento en los efectos erosivos en las costas deben monitorearse para prevenir riesgos en las infraestructuras y el paisaje del entorno (Ferrucho et al., 2022). El interés por los estudios de erosión costera ha crecido entre las comunidades internacionales y nacionales. Tamaulipas limita con el golfo de México, mediante un extenso litoral con múltiples playas. En playa Velamar, donde existe desarrollo urbano, conocer esta información es primordial para anticipar riesgos como la pérdida de suelo, evitar construcciones en áreas vulnerables y fortalecer la planificación territorial local. Esto permite orientar un crecimiento urbano más seguro y sostenible. En esta investigación, se estimó el perfil de playa por medio de levantamientos topográficos con equipo GPS South S82T y la línea de costa en las playas de Altamira y Ciudad Madero, para el periodo 2022-2023 en las temporadas de primavera y verano. Además, se utilizó el Sistema Digital de Análisis de la Línea Costera (por sus siglas en inglés DSAS), empleando imágenes multiespectrales de alta resolución y amplitud disponibles del satélite Sentinel 2

¹Profesores de la Facultad de Ingeniería Tampico (FI), Universidad Autónoma de Tamaulipas, México. maria.benito@docentes.uat.edu.mx, emartinez@docentes.uat.edu.mx, orlando.sanchez@docentes.uat.edu.mx

encargado de monitorear los cambios en la superficie terrestre. Esta información permitió calcular la variación espaciotemporal del desplazamiento y cambios sufridos a lo largo de un año. Los resultados por ambos métodos presentaron similitud en cuanto al crecimiento de la línea de costa con un 92 %.

Palabras clave: perfil de playa, variación espaciotemporal, imágenes multispectrales, erosión, acreción.

Introducción

La importancia social, económica, política y biológica de las zonas costeras en el mundo ha ido incrementando a lo largo de la historia de la humanidad, permitiendo que una población cada vez más numerosa utilice esos espacios para desarrollar diversas actividades (Lavia, 2021). Las playas no son elementos estáticos de la costa, sino que modifican su forma en planta y perfil. Estos cambios transforman los sedimentos (arena) y originan variaciones en la distribución granulométrica del material que la conforma (Medina et al., 1995). La vulnerabilidad costera surge de la interacción de factores ambientales, sociales y económicos que actúan en distintas escalas y afectan la capacidad de recuperación de las comunidades. El crecimiento poblacional, infraestructural y climático incrementa estos riesgos de prioridad global (Canul et al., 2024).

La erosión se considera uno de los principales riesgos críticos que amenazan las zonas costeras. El seguimiento de esos cambios permite determinar la distribución espacial de los peligros de erosión y predecir su evolución (Nassar et al., 2019). En la actualidad, además de levantamientos topográficos para medir las líneas de costa, existen técnicas de teledetección para monitorear varias zonas a lo largo del tiempo. Se emplean muchos métodos para observar los cambios secuenciales de la costa. La teledetección para caracterizarlos incluye datos espaciales y espectrales que pueden contener las imágenes satelitales -que poseen una amplia capacidad temporal para obtenerlos- (El-Asmar y Hereher, 2011). Los perfiles son un instrumento que permite valorar el estado actual y los cambios en las playas arenosas; es de gran utilidad en su gestión y recuperación. Su representación es resultado de complicados procesos de transporte y acumulación que permiten comprender la dinámica costera (Zetina et al., 2008).

En la zona residencial de playa Velamar, se ha observado una creciente preocupación por los efectos de la erosión costera, dado el avance del desarrollo urbano cercano a la línea de costa. La ocupación del litoral, sin considerar su

dinámica natural, ha aumentado el riesgo de pérdida de suelo, daño a infraestructura y reducción de la franja de playa. La falta de monitoreo continuo dificulta la toma de decisiones y limita una planificación territorial efectiva y sostenible.

Por lo anterior, el presente trabajo de investigación tiene como objetivo estimar la variación espacio-temporal a lo largo de la costa en la playa Velamar del municipio de Altamira y Ciudad Madero, Tamaulipas, para un tramo de 3 km durante un año para las estaciones de primavera y verano mediante la herramienta DSAS y levantamientos topográficos. Se presentan resultados de la geomorfología del área de estudio mediante imágenes satelitales del proceso de erosión y sedimentación a partir de las mediciones de perfiles de playa.

Por último, esta investigación contribuye a los Objetivos de Desarrollo Sustentable (ODS) de la Agenda 2030 de la Organización de las Naciones Unidas y el Programa Nacional Estratégico del CONACYT (Pronaces), que organiza los esfuerzos de investigación sobre problemáticas nacionales. El trabajo se alinea con el ODS 11 Ciudades y comunidades sostenibles y con la Línea 5 Sistemas socioambientales y sustentabilidad: Conservación de ecosistemas terrestres, costeros y marinos con manejo y producción sustentable del Pronaces.

Área de estudio

El estado de Tamaulipas se ubica al noreste de la República mexicana y al este delimita con el golfo de México, con 420 km de litoral, con una morfología constituida por areniscas finas, de color terroso a gris. Los escenarios climáticos que prevalecen en la costa tamaulipeca son semiáridos casi en su totalidad. En la porción sur y en las inmediaciones de Altamira y Ciudad Madero predomina el clima tropical con lluvias en verano (Sánchez, 2005).

La zona de estudio, identificada como playa Velamar, comprende los municipios de Altamira y Ciudad Madero en el estado de Tamaulipas, se localiza entre los paralelos 22°19'30" y 22°20'25.65" de latitud norte y los meridianos 97°48'14.96" y 97°49'30.46" de longitud oeste. Para este estudio se creó una línea base con una longitud de tres kilómetros, incluye 21 estaciones y separación de 150 metros, el cadenamiento inicial es 0+000 y el final 3+000 (Figura 1).



Figura 1. Mapa de localización del área de estudio donde se ubican los seccionamientos a cada 150 metros

Fuente: elaboración propia a partir de (INEGI, 2022).

Metodología

Para el desarrollo de esta metodología se consideraron 3 etapas, que consisten en la revisión bibliográfica, el trabajo de campo y la obtención de imágenes satelitales. En la etapa 1 se tiene como objeto la recolección de estudios y artículos científicos sobre trabajos realizados para la medición de los perfiles de playa por medios topográficos e imágenes satelitales.

Para la etapa 2 se realizó el trabajo de campo delimitando el área de estudio, para posteriormente realizar una topografía a detalle de la playa utilizando el GPS SouthS82T con señales GLONASS y GALILEO, mediante el uso del *software* Autocad y su herramienta CivilCad donde se procesa la información para obtener los perfiles de la línea de costa.

Finalmente, en la Etapa 3 se obtuvieron las imágenes satelitales de la página de Copernicus Europe's (2024) del satélite Sentinel 2 y se realizó el procesamiento en el *software* ArcMap con su herramienta DSAS, que genera transectos proyectados perpendicularmente a la línea base de referencia para intersectar las costas en un espaciamiento especificado por el usuario a lo largo de la costa (USGS, 2021) (Figura 2). Es decir, permite calcular estadísticas de tasa de cambio a partir de múltiples posiciones históricas de la costa, establece transectos de medición, realiza

cálculos de tasas y proporciona incertidumbres asociadas con las tasas de cambio (Himmelstoss et al., 2024). Lo anterior se compara con los datos del levantamiento topográfico y se determinan los puntos de acreción o erosión.

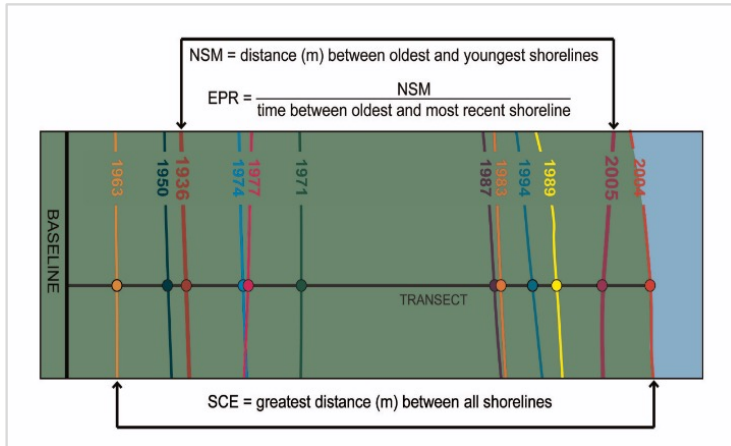


Figura 2. Relación entre las estadísticas de cambio de la línea de costa
Fuente: USGS (2021).

Medidas de distancia

- Envoltura de cambio de la línea de costa (SCE)
- Movimiento neto de la costa (NSM)

Estadísticas

- Tasa de punto final (EPR)
- Incertidumbre de la tasa de punto final (EPRunc)
- Tasa de regresión lineal (LRR)

Para esta investigación, el *software* creó 330 transectos que se colocaron de forma perpendicular a la línea base a 10 m de espaciado a lo largo de la costa de playa Velamar y se utilizó el enfoque estadístico EPR para registrar los cambios que sufrió la línea de costa durante un año en las temporadas de primavera y verano.

Resultados

Levantamiento topográfico estacional

Se realizaron dos levantamientos topográficos para observar la variabilidad espacial y estacional de los perfiles de playa, la referencia para la toma de los perfiles fue un archivo kmz con la posición de los cadenamientos para la

recolección de las coordenadas X, Y, Z, iniciando por el área SE hacia el NW con 89 puntos (Figura 3).

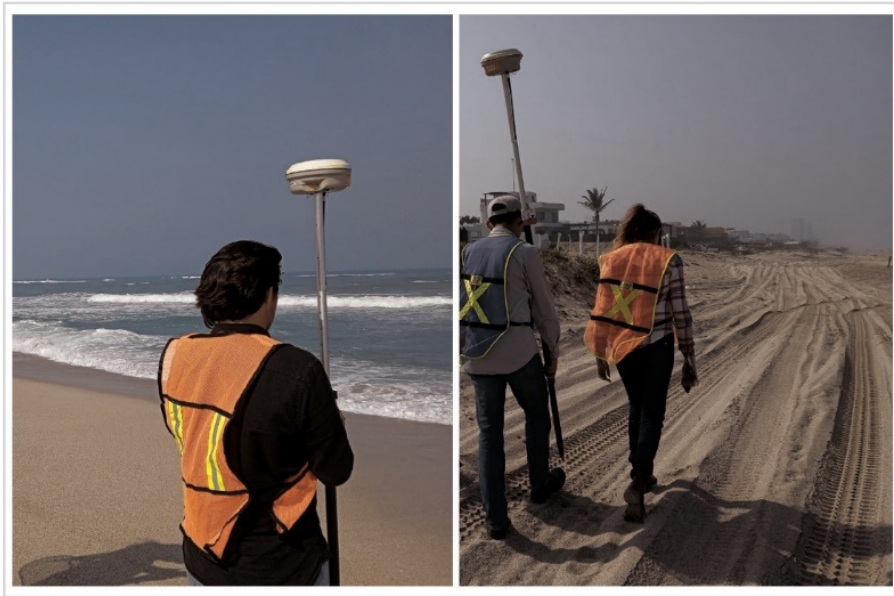


Figura 3. Levantamiento topográfico con seccionamientos a cada 150 m
Fuente: elaboración propia.

Una vez procesada la información de campo, se realizaron dos perfiles de acuerdo con la temporada estacional, en el cadenamiento 2+000 y 2+150 presenta erosión, mientras que en la mayoría de su longitud presentó acreción (Figura 4).

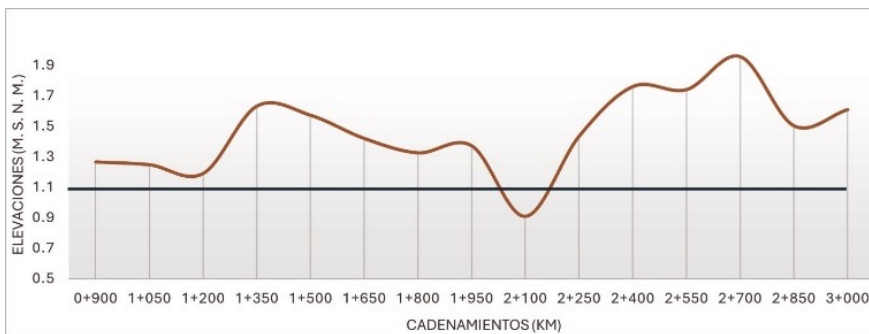


Figura 4. Comportamiento del perfil de playa Velamar para el periodo de primavera
Fuente: elaboración propia.

Para la temporada de verano, existe una mayor variación en cuanto a la línea de costa, en los cadenamientos 0+900-1+650 y 2+550-3+00 presenta acreción. Sin embargo, aumentó la erosión en la costa a diferencia de la temporada primaveral. Esta erosión comprende los tramos 1+650 hasta 2+550, es decir, 600 m de longitud (Figura 5).

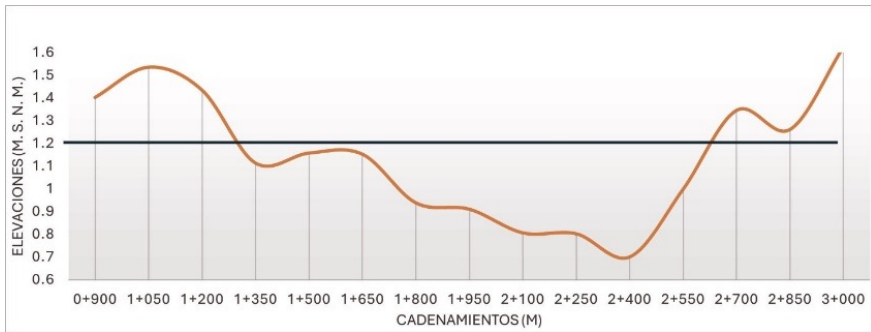


Figura 5. Comportamiento del perfil de playa Velamar para el periodo de verano.

Fuente: elaboración propia.

Comparando ambos perfiles, se puede afirmar que el proceso erosivo es mínimo para este tramo de 3 km, ya que predomina la acreción para este frente de playa.

Variabilidad espacial con DSAS

Para el análisis de cambio en la línea de costa, se consideró del 27 de marzo al 8 de agosto para los años 2022 y 2023, se adquirieron 27 imágenes por periodo; sin embargo, debieron filtrarse para el sistema DSAS, que depende de la cobertura nubosa y la calidad radiométrica. Con el filtrado se utilizaron seis a diez imágenes con información suficiente para identificar donde se presenta erosión y acreción (Figura 6).

Después de aplicar el *software* DSAS con un intervalo de confianza del 90 %, se procesaron un total de 300 transectos con separación a cada 10 m, se encontraron alteraciones geomorfológicas en el periodo de un año en algunas zonas, mientras que en otras se mantuvieron estables. Se encontraron 24 transectos con distancia negativa, es decir, que presentan erosión; y 276 transectos con distancias positivas o acreción. Los resultados de cada perfil se utilizaron para identificar la tasa media de cambio de la línea de costa por medio del método estadístico de regresión lineal. El transecto 226 fue el de mayor erosión, con una distancia máxima de 7.8 m. Sin embargo, el transecto 155 con un valor máximo de acreción de 21.1 m (Figura 7). El promedio de todas las distancias negativas

es 4.13 m y el de las distancias positivas es de 10.92 m (Tabla 1). Las distancias se calculan del promedio del conjunto de transectos a lo largo de la línea costera. La tasa promedio de acreción es de 9.6 m/año.

Tabla 1. Resumen de las distancias de los transectos

Número de transectos	300
Distancia máxima	54.6
Transecto con máxima distancia	300
Distancia mínima	0.1
Transecto con distancia mínima	42
Promedio de transectos con acreción	10.92
Máximo valor de acreción (m/año)	21.13
Promedio de transectos con erosión	-4.13
Máximo valor de erosión	-7.79

Fuente: elaboración propia.

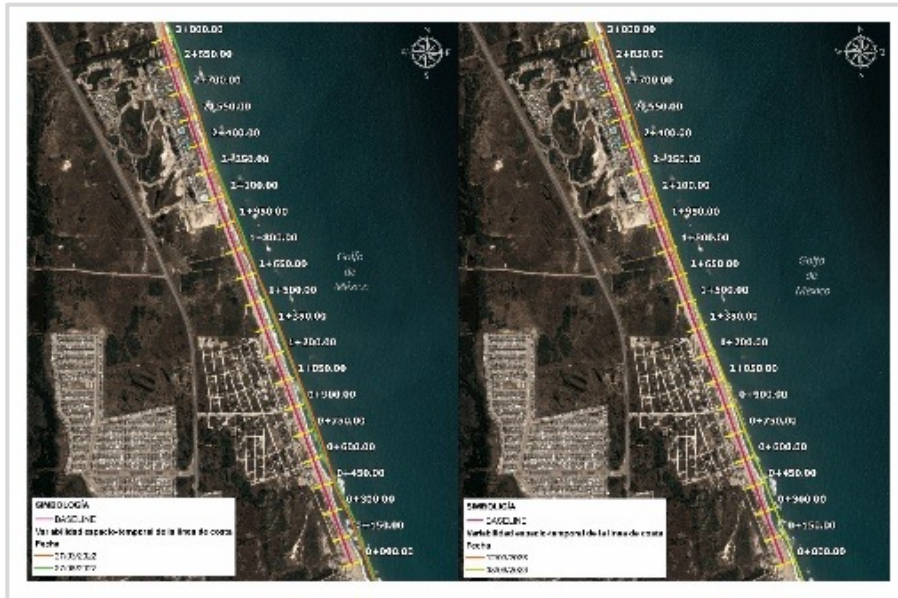


Figura 6. Comparación de las líneas costeras en el periodo 2022-2023

Fuente: elaboración propia a partir de Copernicus Europe's (2024).



Figura 7. Transectos con mayor cantidad de erosión
 Fuente: elaboración propia a partir de Copernicus Europe's (2024).

El análisis considera errores derivados de la georreferenciación de imágenes satelitales y del levantamiento topográfico, cuya magnitud de incertidumbre se presenta en la Tabla 2.

Tabla 2. Fuentes de incertidumbre en el monitoreo de la línea costera

Fuente de incertidumbre	Magnitud estimada	Comentario técnico
Posicionamiento GPS en campo	$\pm 0.3 - \pm 0.5$ m	Equipos GNSS con corrección diferencial o precisión submétrica; el error puede incrementarse en condiciones de mala visibilidad satelital.
Precisión posicional absoluta Sentinel-2 (tras corrección geométrica)	± 10 m (1σ)	Posicionamiento absoluto según especificaciones Copernicus Europe's; mitigado mediante corrección geométrica y alineación con puntos de control.
Resolución espacial Sentinel-2	10 m/píxel	Limita la detección de cambios menores a un píxel; las distancias medidas deben interpretarse dentro de esta tolerancia.
Cobertura nubosa y sombras	Variable (0-20 % en imágenes seleccionadas)	Puede ocultar el límite tierra-agua; se mitigó con filtrado por nubosidad y revisión visual.

Fuente de incertidumbre	Magnitud estimada	Comentario técnico
Clasificación y segmentación de la línea de costa	$\pm 1 - \pm 3$ m	Influye la definición del umbral espectral tierra/ agua; se validó con ortofotos y datos GPS para reducir sesgos.
Variabilidad natural (mareas, oleaje, temporales)	$\pm 1 - \pm 5$ m	Cambios temporales no permanentes que afectan la línea aparente; se redujo el efecto usando múltiples fechas por periodo.
Error en DSAS más allá del EPR	$\pm 2 - \pm 5$ m	Incluye la combinación de errores de posicionamiento, clasificación y resolución; su impacto disminuye al analizar promedios y tendencias.

Fuente: elaboración propia.

Conclusiones

Los resultados obtenidos mediante el levantamiento topográfico y el uso de imágenes satelitales presentan una concordancia significativa, en ambos casos predomina la acreción en un 92 % sobre el de erosión con un 8 %, con 24 transectos evaluados para el periodo analizado. Las variaciones entre métodos se observan en la resolución espacial y la sensibilidad a microcambios. En el levantamiento topográfico se detectan variaciones submétricas con mayor precisión, mientras que el análisis con DSAS y las imágenes de Sentinel-2 se limita a una visión multitemporal más amplia, su resolución y periodicidad de adquisición. El cálculo estadístico de la tasa de erosión refleja una pérdida en la línea de costa de relevancia en el cadenamamiento 2+100, frente al fraccionamiento Velamar con distancias que van de los 6.95 m hasta 10.08 m, lo cual sugiere que de mantenerse en escenarios de incremento en la intensidad de los vientos, oleaje o temporales podría comprometer cimentaciones superficiales y redes de servicio.

La evidencia generada puede incorporarse en planes de ordenamiento territorial local y reglamentos de construcción en zonas costeras, contribuyendo al cumplimiento del ODS 11.

Trabajo futuro

Se recomienda continuar con el monitoreo de la zona analizando las cuatro estaciones del año, ya que el área en donde se presenta el proceso erosivo es residencial. Es importante obtener más información sobre la dinámica costera del área de estudio y proponer algún tipo de solución.

Referencias

- Canul, R. A., Fernández-Díaz, V. Z., Cárdenas, R. D. y May, T. (2024). Coastal vulnerability assessment with a hierarchical coastal segments approach. *Ocean & Coastal Management*, 249, 106989. <https://doi.org/doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2023.106989>
- Copernicus Europe's. (2024). *Copernicus is the Earth Observation component of the European Union's*. <https://www.copernicus.eu/en/access-data>
- Dávila, M. I. (2020). *Análisis de cambio en la línea de costa en la zona litoral del Parque Nacional Natural Via Isla de Salamanca para los años 2000, 2013 y 2020 utilizando imágenes LANDSAT 7 y 8* [Trabajo de grado, Universidad Militar Nueva Granada]. Repositorio UMNG. https://repository.unimilitar.edu.co/bitstream/handle/10654/37730/DavilaMartinezIbethMilena2020_R1.pdf?sequence=3
- El-Asmar, H. y Hereher, M. (2011). Change detection of the coastal zone east of the Nile Delta using remote sensing. *Environmental Earth Science*, 62, 769-777. <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/s12665-010-0564-9>
- Ferrucho, I., Otero, L. y Cueto, J. (2022). Cambios recientes de la línea de costa entre Bocas de Ceniza y Puerto Velero. *Boletín de Geología*, 43(3). <https://doi.org/10.18273/revbol.v44n3-2022007>
- Himmelstoss, E., Henderson, R., Farris, A., Kratzmann, M., Bartlett, M., Ergul, A. et al. (2024, 01 de abril). *Digital Shoreline Analysis System (DSAS)*. USGS Science for a changing world. <https://www.usgs.gov/centers/whcmssc/science/digital-shoreline-analysis-system-dsas#overview>
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía [INEGI]. (2022). *División política estatal 1:250000. 2022*. <http://geoportal.conabio.gob.mx/metadatos/doc/html/dest22gw.html>
- Lavia, N. (2021). Caracterización del proceso histórico de balnearización del frente litoral de Puerto Madryn (Chubut) desde sus inicios hasta la actualidad. *Revista Universitaria de Geografía*, 30(2), 11-37. <https://doi.org/https://doi.org/10.52292/j.rug.2021.30.2.0024>
- Medina, R., Íñigo, J., Losada, M. Á. y Vidal, C. (1995). Variabilidad de los perfiles de playa: forma y distribución granulométrica. *Ingeniería del Agua*, 2(Extraordinario), 133-142. <https://doi.org/https://doi.org/10.4995/ia.1995.2668>
- Nassar, K., Mahmod, W. E., Fath, H. M., Nadaoka, K. y Negm, A. (2019). Shoreline change detection using DSAS technique: Case of North Sinai coast, Egypt. *Marine Georesources & Geotechnology*, (37), 81-95. <https://doi.org/https://doi.org/10.1080/1064119X.2018.1448912>
- Sánchez, C. Á. (2005, del 20 al 26 de mayo). Turismo de playa no masificado y organización del territorio costero en el golfo de México: Caso del Litoral Tamaulipeco [ponencia]. *Anais do X Encontro de Geógrafos da América Latina*, Sao Paulo, Brasil.

- USGS. (2021). *USGS Science for a changing world*. <https://www.usgs.gov/centers/whcmssc/science/digital-shoreline-analysis-system-dsas#overview>
- Zetina, M. C., Sánchez, P. I., Osorio, R. H., Mariño, T. I., Castillo, R. J. y Cauich T. J. (2008). Análisis de modelos de perfil de playa en equilibrio aplicados a una playa de Yucatán, México. *Universidad Autónoma de Yucatán*, 12(3), 15-31. <https://www.redalyc.org/pdf/467/46712302.pdf>

Capítulo 8

Medición de vivienda adecuada en Tamaulipas y entidades federativas a través de un indicador integrado

Elda Margarita Hernández Rejón¹

Raúl Treviño Hernández¹

Jhonny Naim Manríquez García²

Resumen

El presente capítulo tiene por objetivo estimar un indicador capaz de evaluar la vivienda adecuada en Tamaulipas y en México, tomando en consideración los siete elementos básicos para tener una vivienda adecuada, de acuerdo con la Organización de las Naciones Unidas (ONU-Hábitat, 2010): 1) seguridad jurídica, 2) disponibilidad de los servicios, 3) asequibilidad, 4) habitabilidad, 5) ubicación, 6) accesibilidad, y 7) adecuación cultural. La elaboración de un índice de vivienda adecuada responde a la necesidad de contar con una herramienta diagnóstica que permita identificar con mayor precisión las condiciones habitacionales de las diferentes regiones del país, en el que persisten brechas significativas en el acceso a una vivienda digna. En este sentido, se utiliza como fuente principal la *Encuesta Nacional de Vivienda* (ENVI) para contrastar la situación de Tamaulipas con otras entidades y proporcionar información útil para la toma de decisiones en materia de política pública. Entre los principales hallazgos, las entidades con mejor nivel de vivienda adecuada son Coahuila, Aguascalientes y Nuevo León, mientras que las entidades con niveles más bajos son Tabasco, Guerrero y Chiapas. Tamaulipas se encuentra en una posición media a nivel nacional. La relevancia de crear estos indicadores radica en que se transforman en una herramienta que facilita

¹Profesores de la Facultad de Ingeniería Tampico (FI), Universidad Autónoma de Tamaulipas. mrejon@docentes.uat.edu.mx, rtrvin@docentes.uat.edu.mx

² Profesor-investigador de la Universidad Autónoma de Coahuila. naim.manriquez@gmail.com

la focalización de política habitacional, permitiendo una gestión adecuada de los programas y proyectos asociados a mejorar la calidad de vida y de los hogares.

Palabras clave: vivienda adecuada, indicador, estadística, política habitacional, calidad de vida.

Introducción

El derecho a una vivienda digna, adecuada y decorosa ha sido reconocido en la *Declaración Universal de los Derechos Humanos*, en su artículo veinticinco señala que toda persona tiene derecho a un nivel de vida adecuado que le asegure a ella y a su familia, la salud, el bienestar y en especial la alimentación, el vestido, la vivienda, la asistencia médica y los servicios sociales necesarios. Para algunos autores (Ortiz, 2012; Hernández, 2018; Córdova-Canela, 2021), la vivienda se puede entender de dos formas: como una mercancía, la cual se consigna en la dinámica de la oferta-demanda o como un derecho social-humano. Lo primero significa que la vivienda es un producto terminado de alto costo y está dirigido a quien puede pagar por él; lo segundo revela su papel fundamental para el adecuado desarrollo de las personas. En ese sentido, la vivienda es decisiva en la calidad de vida de las personas y conlleva el acceso a servicios esenciales para alcanzar niveles mínimos de bienestar. Dicho lo anterior, un índice de vivienda adecuada es un parámetro que permite cuantificar la calidad de vida de las personas. Esta medición implica un subconjunto de atributos entre los que se incluyen los elementos físicos de la edificación y los complementos necesarios para su habitabilidad (suministro de agua, electricidad, etcétera).

La vivienda es una prioridad para el bienestar social, sus condiciones de habitabilidad influyen directamente en la estabilidad familiar, equilibrio emocional, salud física, nivel de capacidad de trabajo, utilización del tiempo libre y elevación del nivel cultural (Garcilaso, 2007; Manríquez-García, 2023; Pacheco-Acuña, 2020). Por otra parte, vivir en un hábitat y vivienda precarios limitan las posibilidades de crecer sano, estudiar, trabajar y participar como ciudadano. En ese sentido, su acceso y tenencia pueden reducir la vulnerabilidad de la población y la reproducción de la pobreza (Caraveo, 2006; Prieto, 2007; Bustamante, 2020; Manríquez-García, 2023).

En este capítulo se asume que la vivienda adecuada es un concepto que va más allá del mero hecho de contar con un techo y cuatro paredes. Es el derecho de todo hombre, mujer, joven, niño y niña a un hogar, a una comunidad en donde puedan vivir en paz y dignamente. Al respecto, ONU-Hábitat (2010) argumenta que una vivienda adecuada debería incluir, al menos, un régimen seguro de tenencia; la disposición de servicios, materiales, facilidades e infraestructuras suficientes; gastos

soportables; condiciones adecuadas de habitabilidad y accesibilidad física; una ubicación razonable; una adecuación a las necesidades culturales de sus destinatarios.

Descripción de los elementos de una vivienda adecuada

Disponibilidad de los servicios: está relacionada con la satisfacción de necesidades como salud, alimentación, seguridad y bienestar. El hecho de tener una vivienda adecuada implica también el acceso permanente a agua potable, energía, iluminación y alumbrado; instalaciones sanitarias, como drenaje, agua entubada, eliminación de desechos, desagüe de los terrenos, saneamiento y servicios de emergencia. Una vivienda sin disponibilidad de los servicios pone a los habitantes en una situación de vulnerabilidad, pues se complica la hidratación, higiene, ingesta de alimentos en buen estado o la cocción debida, lo que desemboca en problemas de salud (Rincón, 2014; García-Mendoza, 2015; Salgado-Calvillo, 2016; Irisarri y Pites, 2021).

Adecuación cultural: la vivienda no solo es un refugio, sino que expresa la diversidad de prácticas culturales y tradiciones de las personas. Otro de los elementos de la vivienda adecuada es que la misma debe respetar y tener en cuenta la expresión de la identidad cultural de sus habitantes, ya sea en el ámbito de etnia, región o cultura, esto debe ser procurado desde su diseño y construcción (Cedres, 2012; Catalán et al, 2015; Del Caz y Solorzano, 2019, Gutiérrez, 2019).

Asequibilidad: la vivienda debe ser asequible, es decir, que las personas puedan pagar su costo sin poner en riesgo, dificultar o impedir el cumplimiento de otras necesidades o derechos humanos. Aquel no debe sobrepasar el 30 % del ingreso de los habitantes. Una vivienda no es asequible cuando los costos son muy elevados y las familias tienen un presupuesto limitado para mantener la salud e integridad de las personas con alimentos, medicinas o electricidad; este tipo de situaciones hace que los habitantes tengan un lugar para resguardarse, pero no la capacidad de solventar lo indispensable para vivir de manera digna (Molinatti, 2023; Ivarado et al., 2022; Astorga, 2022).

Accesibilidad: comprende que grupos desfavorecidos, vulnerables, marginados o con discapacidad posean una vivienda que se ajuste a sus necesidades específicas. Algunos autores argumentan que actualmente existe una disparidad en la construcción del hábitat para personas con discapacidad; ellas no son tomadas en cuenta ni consultadas para la nueva construcción o diseño de viviendas, lo que provoca desventajas que dificultan el goce de sus derechos humanos. Las viviendas y sus servicios están en su mayoría diseñadas para personas sin discapacidad (Montejano et al., 2018; Mayordomo-Martínez et al., 2020; Delgado-Bohorquez, 2020).

Seguridad de la tenencia: esto protege a los habitantes de cualquier eventualidad donde se ponga en riesgo su posesión como desahucio, desalojos, despojo, entre otras posibles amenazas. La protección legal debe ser garantizada sin importar la forma de la tenencia, ya sea alquiler, arriendo, propiedad, viviendas de emergencia o asentamientos informales. Es decir, los habitantes deben contar con protección jurídica de la vivienda para vivir con paz, seguridad y dignidad.

Habitabilidad: una vivienda debe contar con espacio adecuado que proteja a sus habitantes del frío, humedad, calor, lluvia, viento, amenazas para la salud, riesgos estructurales y vectores de enfermedad. Además, debe garantizar la seguridad física de los ocupantes. Las condiciones de habitabilidad de una vivienda determinan la calidad de vida de las personas que residen en ella. Por otra parte, la habitabilidad es compleja y requiere priorizar la materialidad, diseño y construcción, conceptos referidos a la disciplina arquitectónica encargada de asegurar las condiciones mínimas de salud y comodidad en los edificios (Salgado, 2009; Córdova-Canela, 2021; Olivera y Serrano, 2022).

Ubicación: una vivienda adecuada debe permitir a sus habitantes el acceso a servicios esenciales como educación, salud, fuentes de empleo, mercados, centros comerciales, parques, centros deportivos y espacios recreacionales. La vivienda debe encontrarse en una zona que no esté contaminada ni cerca de fuentes de contaminación, en un ambiente que no ponga en peligro la salud ni la integridad de los habitantes. Una buena ubicación favorece el desarrollo individual y colectivo, ofreciendo una mejor calidad de vida. Para algunos autores, en México y otros países latinoamericanos, no hay igualdad en cuanto a la posibilidad de acceder a una vivienda bien ubicada con todos los servicios necesarios para la vida, la salud y el empleo. De esta forma, las personas con menos ingresos viven en las periferias de las ciudades (Prada y Salamanca, 2022; Farias y Rasse, 2022; Núñez et al, 2022).

Metodología

Para calcular el indicador de vivienda adecuada se ha tomado de referencia la *Encuesta Nacional de Vivienda* que realiza el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), dirigida a viviendas particulares habitadas dentro del territorio nacional, con el objetivo de producir información estadística sobre la situación de la vivienda en las entidades federativas, así como las necesidades y demandas de la población al respecto (INEGI, 2020), asimismo, contiene información capaz de cubrir los siete elementos que define ONU-Hábitat como vivienda adecuada.

Las variables incluidas en el análisis del índice de vivienda adecuada se muestran en la Tabla 1 y cubren cada elemento definido por ONU-Hábitat. En ocasiones se combinan variables en cuanto a ponderación, porque algunas

deficiencias son mucho más graves que otras. Para cada elemento, se consideraron en promedio de tres a ocho preguntas. Para la selección de las variables se hizo una consulta a expertos en el tema y autoridades del sector público que trabajan con el tema de vivienda.

Se definió un número total de puntos conforme a los elementos que comprenden a la vivienda adecuada. Con estos puntajes, se analizó la muestra de la *Encuesta Nacional de Vivienda 2020*. La Tabla 2 presenta ejemplos de los puntajes asignados. Además, para la clasificación de los puntos, se hicieron grupos focales con expertos y se tomaron de referencia los puntajes del *Poor Quality Housing Index en la American Housing Survey -un índice para medir la vivienda no adecuada-*.

Posteriormente, se utilizó el procedimiento de estratificación univariado de Dalenius-Hodges (*cumulative root frequency method*) para obtener los puntos de corte que minimizan la variabilidad intragrupos y permiten establecer la división de la población por estratos. En este trabajo se emplean las categorías alto, medio-alto, medio-bajo y bajo (Dalenius y Hodges, 1959).

El proceso de ponderación se desarrolló con base en la severidad y frecuencia de las condiciones detectadas en los hogares, asignando mayor peso a aquellas variables que representan carencias críticas (por ejemplo, falta de drenaje, hacinamiento extremo o inseguridad jurídica sobre la tenencia de la vivienda). Las ponderaciones fueron definidas a través de un esquema mixto: se utilizó análisis estadístico (componentes principales y correlaciones con calidad de vida percibida) y la validación cualitativa mediante entrevistas a profundidad con expertos en vivienda, académicos y funcionarios de vivienda social.

La selección de variables consideró tres criterios fundamentales: 1) Representatividad conceptual: cada variable reflejara claramente uno de los siete elementos de ONU-Hábitat, 2) Disponibilidad y confiabilidad estadística en la base de datos de la *Encuesta Nacional de Vivienda 2020*, 3) Pertinencia contextual, priorizando aquellas variables que fueran sensibles a la realidad mexicana y, en particular, al caso de Tamaulipas. Este enfoque combinó rigor técnico con adecuación práctica, lo que permitió generar un índice robusto para fines de diagnóstico y formulación de políticas públicas habitacionales.

Tabla 1. Variables que comprenden el indicador de vivienda adecuada

Elemento	VARIABLES DE REFERENCIA
Ubicación	Satisfacción con la “distancia-tiempo” entre esta vivienda y el trabajo, escuelas, centros de salud, mercados y espacios deportivos.
Habitabilidad	Material de la vivienda, si tiene algún tipo de aislamiento térmico, excusado, retrete o sanitario; lavadero, tinaco, calentador de agua, calefacción, jardín, patio; si tiene problemas con grietas, hundimientos o humedad.

Elemento	VARIABLES DE REFERENCIA
Adecuación cultural	Si la vivienda se identifica con sus gustos, costumbres y tradiciones
Disponibilidad de los servicios	Si tiene luz eléctrica en la vivienda, agua, drenaje, servicio sanitario.
Seguridad en la tenencia	Si la vivienda es rentada, propia, intestada o en litigio; cuenta con alguna escritura o título de propiedad; si tienen riesgo de sufrir algún desalojo.
Accesibilidad	Si la vivienda tiene necesidad de realizarle alguna adaptación como rampas, puertas, pasamanos para personas con discapacidad.
Asequibilidad	Capacidad de pago de la vivienda; si un hogar gasta más de treinta por ciento del ingreso en vivienda, este pierde asequibilidad.

Fuente: elaboración propia.

Tabla 2. Ejemplos de puntajes dados para cada variable

Elemento	Pregunta	Concepto	Puntos
Seguridad en la tenencia	5.1. ¿Esta vivienda...	es rentada?	3
		es prestada por familiares o amigos?	3
		es prestada por el trabajo?	3
		es propia, pero la está pagando?	6
		es propia?	9
		está intestada o en litigio?	0
Adecuación cultural	6.6. ¿Qué tanto consideran que la vivienda se identifica con sus gustos, costumbres y tradiciones?	se encuentra en otra situación?	0
		mucho	6
		algo	4
		poco	2
		nada	0
		no especificado	-
Disponibilidad	4.12. ¿El servicio sanitario...	tiene descarga directa de agua?	6
		requiere agua que se vierte con una cubeta?	3
		no permite que se le vierta agua?	0
		es blanco por secuencia?	-

Fuente: elaboración propia con propuesta metodológica.

Resultados

Antes de presentar el índice de vivienda adecuada, es relevante mencionar algunos hechos encontrados en los datos, particularmente sobre los elementos que define ONU-Hábitat como vivienda adecuada. Las Figuras 1-4 muestran algunas tendencias. La disponibilidad de los servicios involucra la satisfacción de necesidades

básicas como: agua potable, electricidad, iluminación, instalaciones sanitarias, entre otras. En la Figura 1 se observan los puntajes respecto a la disponibilidad de los servicios por entidad federativa. Los estados del sur del país son los más afectados en la disponibilidad y acceso a servicios: Oaxaca, Chiapas y Guerrero. En estos habita la mayor parte de la población indígena del país (66 %); una importante proporción habita en zonas rurales y de difícil acceso en donde el suministro de servicios básicos es complicado. Por otra parte, los estados con mejores niveles de disponibilidad de servicios son Baja California, Nuevo León y Chihuahua (INEGI, 2020).

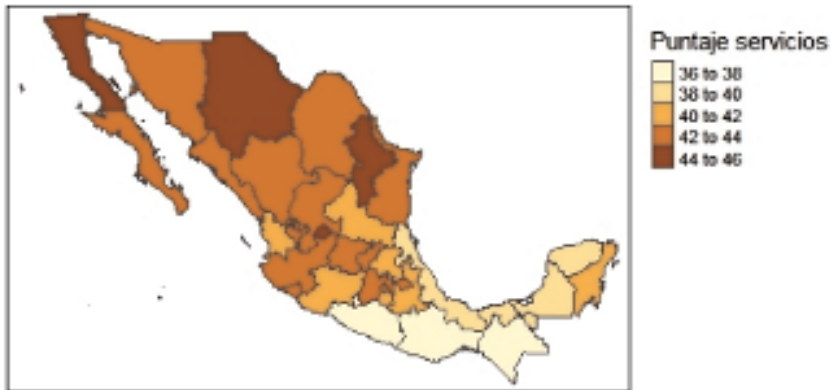


Figura 1. Disponibilidad de los servicios por entidad federativa
Fuente: elaboración propia

Estos estados, junto con la Ciudad de México, tienen mayor aportación al producto interno bruto (PIB) en el país (INEGI, 2023). En Tamaulipas, la disponibilidad de los servicios no es un problema de gravedad, pues se encuentra entre la media nacional. De acuerdo con el índice de marginación del Coneval (2020), Tamaulipas se encuentra en un estrato bajo, donde un elemento clave es la disponibilidad de agua entubada, energía eléctrica, drenaje y servicios sanitarios. Por otra parte, en la Figura 2 se presentan los niveles del indicador de habitabilidad, que representa las condiciones que garantizan la seguridad de sus habitantes y proporcionan un espacio habitable suficiente, así como protección contra la humedad, lluvia, calor, viento u otros peligros estructurales. Si bien este elemento es importante, actualmente existen pocos índices al respecto -ver los trabajos de Vences y Manriquez (2022) y Ávila-Vera et al. (2019)-. Los estados con menores condiciones de habitabilidad son Chiapas, Tabasco y Campeche, identificados con altos niveles de vulnerabilidad, mientras que Tamaulipas se encuentra en los niveles de la media nacional.

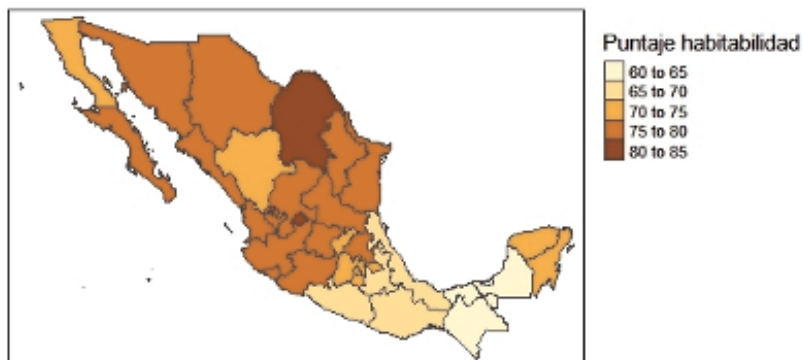


Figura 2. Habitabilidad por entidad federativa

Fuente: elaboración propia

Posteriormente, en la Figura 3 se presentan los niveles de accesibilidad de la infraestructura, que consideran en específico las necesidades de los grupos marginados o con alguna discapacidad. En este elemento se nota una heterogeneidad espacial, sin un patrón determinado o clúster espacial. Los estados con menores niveles de accesibilidad fueron Oaxaca, Guerrero, Tabasco y Puebla. Tamaulipas se encuentra en un nivel por encima de la media nacional junto con Nuevo León, Chihuahua, San Luis Potosí, Colima, Jalisco, Nayarit, Campeche y Quintana Roo.

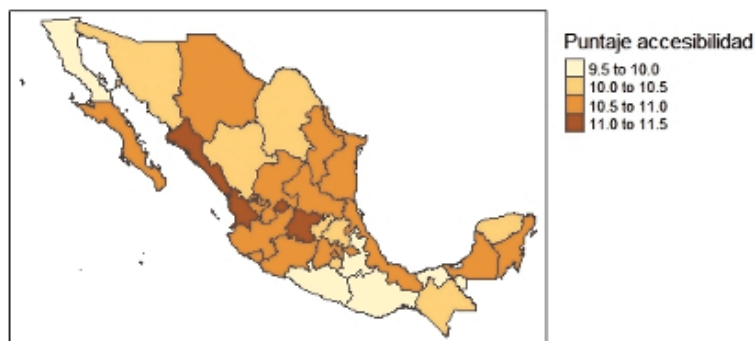


Figura 3. Accesibilidad por entidad federativa

Fuente: elaboración propia.

En la Figura 4 se muestran los niveles del indicador de ubicación, que se puede definir como el acceso a oportunidades de empleo, servicios de salud, escuelas, guarderías y otros servicios e instalaciones sociales, fuera de zonas de riesgo o contaminadas. Así como en los puntajes de disponibilidad y habitabilidad, los

estados del sur del país presentan menor satisfacción respecto a la ubicación de las viviendas, como Chiapas, Puebla, Veracruz, Guerrero y Tabasco. Tamaulipas es uno de los estados con mejores niveles en cuanto a ubicación junto con San Luis Potosí, Baja California, Sonora, Chihuahua, Nayarit y Coahuila.

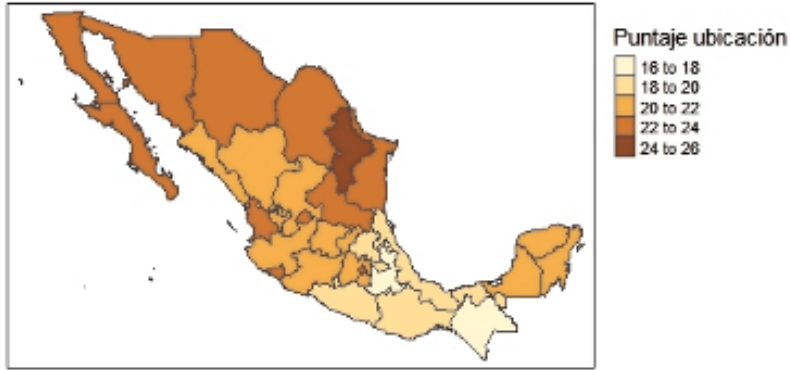


Figura 4. Ubicación por entidad federativa

Fuente: elaboración propia.

Finalmente, la Tabla 3 muestra los principales elementos de una vivienda adecuada. El componente de asequibilidad requiere de capacidad financiera de los hogares -no deben gastar más del 30 % de sus ingresos en vivienda-. La mayor parte de los estados no cumplen con esta característica, salvo Coahuila, Nuevo León y Aguascalientes.

Tabla 3. Puntajes respecto a los elementos de vivienda adecuada

Estado	Accesibilidad	Cultural	Disponibilidad	Habitabilidad	Seguridad
	Escala de 0 a 12	Escala de 0 al 6	Escala de 0 a 45	Escala de 0 a 140	Escala de 0 a 21
Aguascalientes	11.18	4.85	44.49	80.3	18.67
Baja California Norte	9.736	4.69	44.05	72.19	17.82
Baja California Sur	10.77	4.79	43.07	79.19	17.6
Campeche	10.57	4.71	38.29	64.87	18.58
Coahuila	10.36	4.99	43.96	81.22	17.97
Colima	10.98	4.94	43.86	78.64	18.45
Chiapas	10.11	4.24	37.49	63.68	17.58
Chihuahua	10.86	4.71	44.07	79.87	16.87
Ciudad de México	10.88	4.84	42.81	72.59	17.59
Durango	10.3	4.93	42.9	74.56	18.63

Estado	Accesibilidad	Cultural	Disponibilidad	Habitabilidad	Seguridad
	Escala de 0 a 12	Escala del 0 al 6	Escala de 0 a 45	Escala de 0 a 140	Escala de 0 a 21
Guanajuato	11.26	4.94	42.84	76.48	18.44
Guerrero	9.527	4.5	37.49	65.55	17.51
Hidalgo	10.33	4.71	41.33	75.06	18.49
Jalisco	10.7	4.8	43.58	77.25	18.31
México	10.96	4.6	42.32	72.03	17.46
Michoacán	10.5	4.8	41.07	75.27	18.4

Fuente: elaboración propia.

El concepto de vivienda apropiada incluye, además de la infraestructura, el espacio exterior y el equipamiento. En la Figura 5 se muestran los resultados de la medición de la vivienda adecuada a través de un indicador integrado. Los estados con un índice alto de vivienda adecuada son Coahuila, Aguascalientes, Nuevo León y Colima; los que tienen índices bajos son Tabasco, Chiapas, Guerrero, Oaxaca, Veracruz y Puebla. Para Tamaulipas, el resultado es un índice medio-alto que lo ubica arriba de la media nacional.

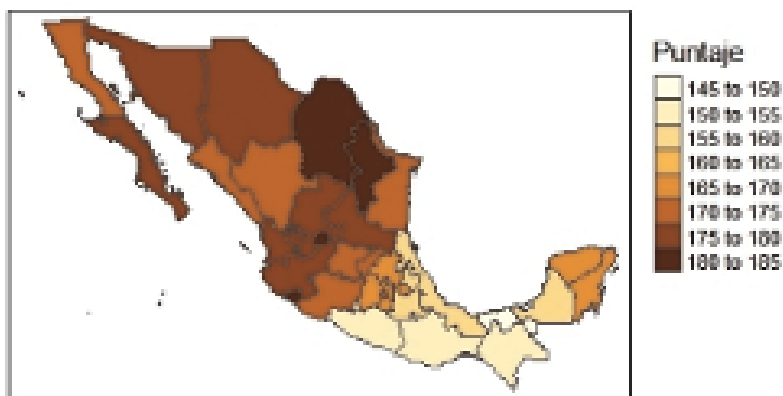


Figura 5. Indicador de vivienda adecuada

Fuente: elaboración propia.

En la Tabla 4 se muestran los resultados finales del indicador de vivienda adecuada, así como las clasificaciones correspondientes con la metodología de Dalenius-Hodges. Los estados de Coahuila, Aguascalientes, León y Colima tienen una calificación alta con más de 180 puntos, mientras que Campeche, Puebla, Veracruz, Oaxaca, Guerrero, Chiapas y Tabasco aparecen con una calificación

baja con menos de 160 puntos. El resultado del indicador para Tamaulipas es medio-alto con una puntuación de 174.7, efecto de la combinación de los puntajes en los diferentes elementos utilizados.

La disponibilidad de servicios mostró disparidades significativas entre regiones, reflejando la desigualdad estructural en el acceso a servicios básicos, especialmente en estados con alta concentración de población indígena y rural. El componente de habitabilidad evidenció la persistencia de condiciones físicas inadecuadas que comprometen la seguridad y salud de los ocupantes. En cuanto a la accesibilidad, se visibilizó la limitada infraestructura adaptada para personas con discapacidad en diversos estados. El elemento de ubicación resaltó la importancia del entorno y su vinculación con servicios esenciales, seguridad y empleo, siendo otro aspecto crítico para la calidad de vida. Por otro lado, la asequibilidad se identificó como un problema extendido, donde la mayoría de los hogares destinan más del 30 % de su ingreso a la vivienda. La seguridad jurídica de la tenencia, si bien no se abordó en profundidad en los mapas, fue incluida en el índice mediante variables de propiedad legal. Finalmente, la adecuación cultural fue contemplada mediante elementos adaptados al contexto sociocultural de cada región. En conjunto, estos resultados confirman que la vivienda adecuada debe abordarse de manera integral y multidimensional, evidenciando la utilidad del indicador como herramienta diagnóstica y de política pública.

Tabla 4. Ranking de vivienda adecuada por entidad³

Indicador de vivienda adecuada							
Ranking	Entidad	Puntos	Clasificación	Ranking	Entidad	Puntos	Clasificación
1	Coahuila	182.1	Alto	17	Baja California	171.4	Medio-bajo
2	Aguascalientes	182.1	Alto	18	Cd. de México	171.3	Medio-bajo
3	Nuevo León	181.3	Alto	19	Michoacán	170.4	Medio-bajo
4	Colima	180.2	Alto	20	Hidalgo	169.3	Medio-bajo
5	Chihuahua	179.1	Medio-alto	21	Quintana Roo	169	Medio-bajo
6	Baja California Sur	178.8	Medio-alto	22	Tlaxcala	168.6	Medio-bajo
7	Jalisco	176.4	Medio-alto	23	Estado de México	167.8	Medio-bajo
8	Nayarit	176.2	Medio-alto	24	Morelos	167.1	Medio-bajo

³ De acuerdo con la metodología de Dalenius-Hodges, los rangos de ubicación son: bajo, de 0 a 160; medio bajo de 160 a 173; medio alto de 173 a 180; alto de 180 a 240.

Indicador de vivienda adecuada							
Ranking	Entidad	Puntos	Clasificación	Ranking	Entidad	Puntos	Clasificación
9	Sonora	175.8	Medio-alto	25	Yucatán	165.1	Medio-bajo
10	Zacatecas	175.5	Medio-alto	26	Campeche	158	Bajo
11	San Luis Potosí	175.3	Medio-alto	27	Puebla	157.8	Bajo
12	Sinaloa	174.9	Medio-alto	28	Veracruz	157.6	Bajo
13	Tamaulipas	174.7	Medio-alto	29	Oaxaca	153.6	Bajo
14	Guanajuato	174.6	Medio-alto	30	Guerrero	152.9	Bajo
15	Querétaro	173.1	Medio-alto	31	Chiapas	150.8	Bajo
16	Durango	172.9	Medio-bajo	32	Tabasco	149	Bajo

Fuente: elaboración propia con metodología propuesta.

Conclusiones

La falta de una vivienda en condiciones mínimas de habitabilidad, accesibilidad, adecuación cultural y demás elementos de vivienda apropiada, se ha convertido en uno de los problemas más susceptibles por la población mexicana. En cuanto al tema de seguridad en la tenencia, por ejemplo, las posibilidades de adquisición por los trabajadores a través del mercado formal (público y privado) se han reducido debido al bajo nivel de los ingresos -poder adquisitivo- y a la especulación de la vivienda en el mercado inmobiliario. Además, el difícil acceso de la clase trabajadora a una vivienda ha originado la búsqueda de otras alternativas por fuera del mercado formal, tal como los asentamientos humanos irregulares (invasiones populares de terrenos). Estos se caracterizan por estar ubicados en la periferia (afueras de la mancha urbana) y en donde las condiciones de habitabilidad son muy precarias (difícil acceso a servicios básicos) y la mayoría se tratan de invasiones que se encuentran en terrenos de baja plusvalía.

Asimismo, otra característica para contar con una vivienda adecuada implica simultáneamente el derecho a un entorno que garantice una buena ubicación, sobre todo en temas de accesibilidad al trabajo, escuelas, centros culturales, espacios de recreación, mercados, seguridad y servicios necesarios.

En el estudio, se hace evidente que la vivienda tiene que ofrecer condiciones apropiadas para un desarrollo saludable y feliz en todos los miembros de la familia, a la vez que debe expresar la identidad local; sin embargo, la producción en masa de viviendas ha hecho que se pueda llegar a perder esa identidad cultural. El espacio público constituye un elemento esencial del hábitat, por lo que el Estado

debe cumplir el compromiso ético de asegurar su disponibilidad y acceso justo, de tal forma que se adapten espacios adecuados que ofrezcan bienestar.

Finalmente, se recomienda la focalización de políticas de corte habitacional y una gestión adecuada de los programas asociados a mejorar la calidad de vida de las familias. Se cumple con el objetivo de crear un indicador integral de vivienda adecuada por entidad federativa, con especial atención en Tamaulipas. A través del análisis de la *Encuesta Nacional de Vivienda* (ENVI), se logró identificar las principales fortalezas y debilidades en cada uno de los siete elementos definidos por ONU-Hábitat. Estos hallazgos visibilizan las desigualdades territoriales y constituyen una herramienta para la formulación de políticas públicas habitacionales eficaces y equitativas, orientadas a elevar el bienestar de los hogares en México.

Trabajo futuro

El problema de vivienda a nivel general involucra tanto la parte del déficit habitacional (viviendas que se necesita construir para dar refugio a quienes carecen de alojamiento) como cualitativo (aquellas unidades existentes que presentan diversas carencias: servicios, materialidad precaria o inseguridad en la tenencia, no accesibles, entre otros). Es necesario realizar estudios sobre la elaboración de políticas públicas, para que toda la población tenga acceso a recursos habitacionales adecuados para su salud, bienestar, seguridad, accesibilidad y acceso justo al hábitat. La falta de vivienda adecuada tiene mayor incidencia entre los grupos más vulnerables, especialmente mujeres, jóvenes, ancianos, discapacitados, desempleados y población en áreas rurales. También es necesario recopilar datos más específicos sobre el caso de la vivienda, estadísticas que caractericen el problema a nivel municipal y de áreas rurales. Además, se hace necesario que desde la academia se siga trabajando en los Proyectos Nacionales de Investigación e Incidencia (PRONAI) con la finalidad de mejorar las condiciones en el acceso justo al hábitat, que se vinculen con el gobierno y asociaciones civiles para dar solución a problemáticas territoriales específicas.

Referencias

- Alvarado, J., Quesada, J. F. y Espinoza, E. (2022). Indicadores de sostenibilidad de vivienda asequible para la ciudad de Cuenca-Ecuador. *ConcienciaDigital*, 5(12), 66-85.
- Astorga, D. (2022). *Acceso y asequibilidad desigual de la vivienda en el Área Metropolitana de Santiago: hallazgos en base a análisis de la Encuesta de Ocupación y Desocupación, periodo 2019-2020* [Tesis de maestría, Universidad de Chile]. Repositorio UChile. <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/192823>
- Ávila-Vera, M., Picazzo, E. y Rangel-Blanco, L. (2019). La vulnerabilidad social en México en el marco del desarrollo sustentable. *Trayectorias*, 21(49), 107-123. <https://trayectorias.uanl.mx/public/anteriores/49/pdf/5.pdf>
- Bustamante, P. (2020). *Diseño de vivienda social adecuada en un contexto de alta vulnerabilidad ambiental. Caso de estudio: Colonia Quinta Esmeralda y La Cholla, Hermosillo, Sonora* [Trabajo de grado, Universidad Iberoamericana]. Repositorio Institucional IberoPuebla. <http://repositorio.iberopuebla.mx/handle/20.500.11777/4597>
- Caraveo, B. (2006). El problema de la vivienda en Ciudad Juárez: los asentamientos humanos irregulares. *Nósis. Revista de Ciencias Sociales*, 18(36), 156-167. <https://www.redalyc.org/pdf/859/85919840008.pdf>
- Cedrés, L. (2012). La participación ciudadana en la construcción de hábitat incluyente y sostenible: hacia la materialización del derecho a la ciudad. *Dimensiones del Hábitat Popular Latinoamericano*, 187-207.
- Córdova, F. (2021). Participación social en el desarrollo de estrategias para mitigar la problemática de la vivienda abandonada. *Academia XXII. Revista Semestral de Investigación*, 12(23), 82-107. <https://doi.org/10.22201/fa.2007252Xp.2021.23.80161>
- Dalenius, T. y Hodges, J. L. (1959). Minimum Variance Stratification. *Journal of the American Statistical Association*, 54(285), 88.
- Del Caz Enjuto, M. R. y Solórzano, M. C. (2019). Habitabilidad básica y dignidad en la definición de vivienda. En M. Hernández, A. Rojas, R. Rivera, R. Monarca y A. López. (Eds.), *Vivienda autoconstruida. Arquitectura por intuición* (pp. 27-39). Benemérita Universidad Autónoma de Puebla.
- Delgado-Bohórquez, A. (2020). Hábitat accesible. Desarrollo de modelos conceptuales urbano-habitacionales. *Revista de Arquitectura*, 22(2), 24-36. doi: <https://doi.org/10.14718/revarq.2020.3143>
- García, J. (2015). *Espacios domésticos saludables: aportaciones para la reducción del estrés en la vivienda* [Tesis de maestría, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla]. Repositorio Institucional BUAP. <https://repositorioinstitucional.buap.mx/items/75e99f3d-73fd-4566-a4e1-2fd776a88299>
- Garcilaso, M. (2007). Vivienda y gestión urbana. *Arquitectura y Urbanismo*, 28(3), 86-88. <https://www.redalyc.org/pdf/3768/376839853018.pdf>

- Gutiérrez, L. (2019). *La discapacidad y la vivienda digna: una mirada al caso colombiano* [Tesis de maestría, Universidad de los Andes] Repositorio UniAndes. <https://repositorio.uniandes.edu.co/handle/1992/45790>
- Hernández, K. (2018). *Desarrollo sostenible, vinculado a la calidad de vida, para el diseño de viviendas*. Universidad Autónoma de Nuevo León & Río Subterráneo.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía [INEGI]. (2020). *Encuesta Nacional de Vivienda 2020*. <https://www.inegi.org.mx/programas/envi/2020/>
- _____. (2023). *Comunicado de prensa Núm. 131/23*. https://www.inegi.org.mx/contenidos/saladeprensa/boletines/2023/pib_pconst/pib_pconst2023_02.pdf
- Irisarri, M. J. y Pites, L. M. (2021). Estándar mínimo socialmente aceptable de vivienda: una aproximación a variables cualitativas. *Quid 16. Revista del Área de Estudios Urbanos*, (especial), 51-67.
- Manríquez-García, N. (2023). Determining elements of housing satisfaction in Mexico: analysis by estimating an Ordered Probit Model. *Vivienda y Comunidades Sustentables*, (14), 9-28.
- Mayordomo-Martínez, D., García-Mateos, G. y de Gea, J. M. (2020). Estudio y análisis de la accesibilidad para personas con discapacidad física en el acceso a comercios y locales de la ciudad de Murcia. *Informes de la Construcción*, 72(560), e369-e369.
- Molinatti, F. (2023). Submercado de alquiler residencial en la Argentina: una aproximación a la asequibilidad de la vivienda. *Ciudad y Territorio Estudios Territoriales*, 5(215), 139-160.
- Montejano, J. A., Caudillo, C. A. y Cervantes, M. (2018). Vivienda de interés social, segregación residencial y accesibilidad: análisis de 121 conjuntos urbanos en el arco nororiente del Valle de México, 2001-2010. *Estudios Demográficos y Urbanos*, 33(1), 187-224.
- Núñez, V. L., Cireddu, A. y Franco, D. N. (2022). Vida cotidiana y movilidad con perspectiva de género en barrios periféricos con segregación residencial. *Nova Scientia*, 14(29).
- Olivera, G. y Serrano, O. (2022). Vivienda en México, un problema de calidad, de habitabilidad, del barrio y de la ciudad. *Revista Estado y Políticas Públicas*, 19, 143-171.
- ONU Hábitat. (2010). *El derecho a una vivienda adecuada*. Oficina del Alto Comisionado de las Naciones Unidas para los Derechos Humanos. <https://bit.ly/2O9AZn9>.
- Ortiz, E. (2012). *Producción social de la vivienda y el hábitat. Bases conceptuales y correlación con los procesos habitacionales*. Hábitat International Coalition.
- Pacheco, V. M. (2020). El derecho a una vivienda adecuada en Costa Rica. *Revista de Ciencias Jurídicas*, (152), 129-156.
- Prada-Trigo, J. y Salamanca, P. A. (2022). Segregación y vulnerabilidad como efecto de las políticas públicas en Chile. El caso de Alerce, Puerto Montt. *Cuadernos Geográficos*, 61(2), 247-268.

- Prieto, M. B. (2007). Condiciones habitacionales y calidad de vida urbana. El caso de la ciudad de Bahía Blanca [congreso]. *IX Jornadas Argentinas de Estudios de Población*, Córdoba, Argentina.
- Rincón, M. (2014). Vivienda digna y derechos humanos: caminos paralelos. *Cuadernos de Vivienda y Urbanismo*, 7(14), 180-183.
- Salgado, L. E. (2016). *La titularidad y otras cuestiones sobre el derecho a la vivienda digna y decorosa en México*. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.
- Salgado de la Torre, R. (2009). *Requisitos básicos de habitabilidad, el nuevo código técnico de la edificación, normativa de seguridad habitabilidad y sostenibilidad de las edificaciones*. Ministerio de Vivienda.
- Vences-Macedo, L. y Manríquez-García, N. (2022). La Vulnerabilidad en la ciudad de Mazatlán: inundaciones y marginación. *Proyección. Estudios Geográficos y de Ordenamiento Territorial*, 16(32), 39-63.

Capítulo 9

Estimación de la configuración del lecho lacustre de la Laguna 3 de Mayo, Altamira, Tamaulipas

Susan Margarita Maldonado Robert¹
Dora María Esther González Turrubiates¹
Marcos Nahum Gregorio Barranco²

Resumen

La estimación de la configuración del lecho lacustre de la Laguna 3 de Mayo en Altamira, Tamaulipas, es de suma importancia para el bienestar de la comunidad local, especialmente durante periodos de sequía extrema. La disminución en las precipitaciones reduce el flujo hacia los cuerpos de agua bajando sus niveles, con el riesgo de secarse por completo. El monitoreo continuo mediante estudios batimétricos permite obtener la configuración de un cuerpo de agua, para esto, se utilizan ecosondas monohaz o multihaz montadas en embarcaciones pequeñas, las cuales recaban la información necesaria que se procesa en *softwares* especializados para la obtención de resultados, captando a tiempo los cambios en los niveles de agua y analizando las variaciones estacionales en la sedimentación. Con estos datos, se pueden planificar respuestas y acciones adecuadas para los organismos operadores. El presente estudio se centra en la Laguna 3 de Mayo, localizada en Altamira, Tamaulipas, de la cual dependen 400 habitantes para el abastecimiento, pesca, agricultura y fuente de comunicación para el intercambio de mercancías. El objetivo de la investigación es evaluar la capacidad de almacenamiento para la gestión sostenible del recurso hídrico, la planificación de medidas de adaptación y la mitigación frente a la escasez

¹ Profesores de la Facultad de Ingeniería Tampico (FI), Universidad Autónoma de Tamaulipas. susan.maldonado@docentes.uat.edu.mx, dgonzalez@docentes.uat.edu.mx

² Alumno de la Facultad de Ingeniería Tampico (FI), Universidad Autónoma de Tamaulipas. a2183330051@alumnos.uat.edu.mx

que pudiera presentarse. Esta investigación contribuye a los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) de la Agenda 2030 de la Organización de las Naciones Unidas, en los ODS 6 Agua Limpia y Saneamiento y ODS 11 Ciudades y Comunidades Sostenibles, así como en el Programa Nacional Estratégico (Pronaces).

Palabras clave: batimetría, laguna, configuración, volumen, almacenamiento.

Introducción

Conocer la configuración de un cuerpo de agua es importante para determinar la gestión del recurso hídrico, así como su composición física y química, para la vitalidad de un ecosistema (Carbajal y González, 2012). La Laguna 3 de Mayo, se localiza en el municipio de Altamira, Tamaulipas, dentro de la cuenca del río Tamesí, en la región hidrológica RH26 Pánuco. El área de estudio es de 28.9 ha, esta laguna abastece a 400 habitantes (INEGI, 2024), donde la mayoría se emplea en actividades de pesca y agricultura (Figura 1).

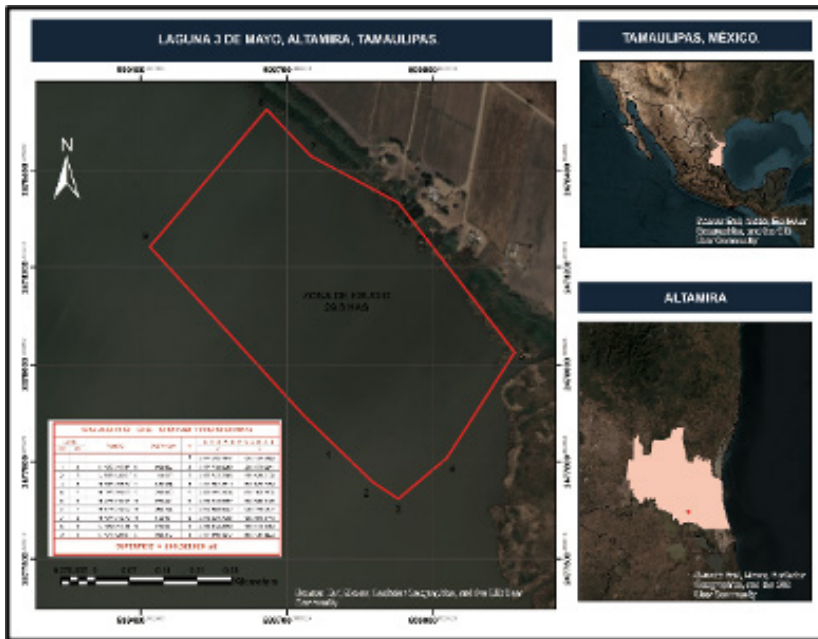


Figura 1. Mapa de Localización del área de estudio en la Laguna 3 de Mayo, en Altamira, Tamaulipas

Fuente: elaboración propia a partir de SIG.

Debido a la sucesión de periodos por sequía experimentados en los últimos años y la consiguiente escasez del suministro de agua, es indispensable conocer la configuración de este cuerpo hídrico para determinar los niveles de almacenamiento en diversas alturas, áreas y capacidades. La siguiente investigación muestra el procedimiento metodológico y los resultados obtenidos para calcular el volumen de almacenamiento de la Laguna 3 de Mayo, localizada en Altamira, Tamaulipas, basado en trabajos batimétricos. Esta información puede ser empleada por el organismo regional encargado de la gestión y distribución del recurso hídrico para la toma de decisiones estratégicas.

Metodología

En este apartado, se muestran los pasos para la obtención de resultados (Figura 2).

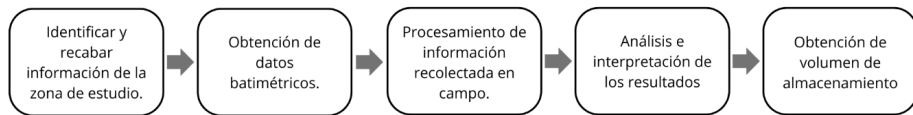


Figura 2. Metodología general para la obtención del volumen de Almacenamiento de la Laguna 3 de Mayo, en Altamira, Tamaulipas

Fuente: elaboración propia.

Área de estudio y relevancia social del cuerpo de agua

La zona de estudio se encuentra en las coordenadas geográficas 22°24'27.48"N-98° 1'45.80"O. Esta consiste en un polígono de influencia de 29.8 ha, ya que es la más importante para abastecer de agua el Ejido 3 de Mayo. Las personas que habitan ahí se dedican a la pesca o agricultura, y utilizan este cuerpo de agua como medio de comunicación a través de sus embarcaciones menores.

Técnica de adquisición de datos batimétricos

Los estudios batimétricos son técnicas especializadas que permiten determinar la profundidad de los mares, lagos y embalses mediante el levantamiento topográfico de su lecho (Becerra, 1993). Estos estudios se pueden realizar a través de una ecosonda multihaz, la cual emite una onda acústica hacia la superficie para chocar con el fondo y rebotar hacia el receptor que detecta el eco. Esta ecosonda va

instalada en una embarcación menor que recorre la zona de estudio y genera una nube de puntos que se procesa con *software* especializado, donde cada punto genera una coordenada “x”, “y” en el sistema UTM (*Universal Transversal de Mercator*) y “z” que representa la profundidad del embalse (Foster y Halbstein, 2014; Wolf, 2014). Una batimetría está ligada a alguna escala de referencia, por lo que para este estudio se tomó la estación hidrométrica llamada Bombas Altamira con clave BALTTAM012 de acuerdo con el Sistema de Alertamiento a Tiempo Real (SATR) emitido por la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA, 2024). El día y hora de la visita de campo se encontró en una elevación de 0.50 m. La embarcación menor realizó un recorrido de 19 perfiles de la siguiente forma (Figura 3), recopilando 1 566 puntos, en un área de 29.8 ha.



Figura 3. Puntos obtenidos en la zona de estudio

Fuente: elaboración propia.

Procesamiento de datos batimétricos

Se procesa la información de puntos recolectados en campo para después generar la triangulación por medio del *software* de CivilCad, posteriormente se obtienen las isóbatas que representan la configuración del lecho de la Laguna 3 de Mayo. El cuerpo de agua tiene profundidades menores de -0.30 msnm (metros sobre el nivel del mar) y las más profundas -1.10 msnm, identificadas en las inmediaciones de la bocatoma que abastece el recurso hídrico en la zona (Figura 4).



Figura 4. Isóbatas obtenidas por medio del estudio batimétrico en Laguna 3 de Mayo
Fuente: elaboración propia.

Análisis e interpretación de los resultados

Con la ayuda del *software* ArcMap 10.8, se genera un TIN (*Triangulated Irregular Network*), el cual representa la morfología del fondo lagunar a partir de los datos batimétricos recolectados. En la Figura 5 se observa una predominancia de color gris sobre gran parte de la superficie del cuerpo de agua, de acuerdo con la simbología del modelo, esta tonalidad corresponde a profundidades que oscilan entre los -0.445 y -0.343 m s. n. m. Este resultado confirma que la laguna presenta una condición somera, con láminas de agua de unos 10 cm, atribuible al proceso progresivo de azolvamiento.



Figura 5. Modelo digital de la batimetría en la Laguna 3 de Mayo

Fuente: elaboración propia.

Resultados

En la Tabla 1 se puede observar las profundidades obtenidas en el estudio batimétrico de la Laguna 3 de Mayo, con los valores de las áreas acumuladas de las isobatas del embalse se genera la curva de área-capacidad del cuerpo de agua. Las mediciones para generar esta curva van desde la -0.30 msnm hasta la -1.10 msnm, donde los 36 419.37 m² determinan el área acumulada. Los volúmenes calculados en hm³ permiten conocer la capacidad de almacenamiento. Como resultado se obtuvo un volumen de agua de 0.003 hm³, lo que es igual a 3 000 m³.

Tabla 1. Elevaciones, áreas acumuladas y capacidad volumétrica de la Laguna 3 de Mayo

Elevaciones msnm	Área		Intervalo m	Volumen		Volumen acumulado		
	m ²	Ha		Área media Ha	m ³	Hm ³	Hm ³	m ³
-0.30	36419.37	3.6419	3.642	0	0	0	0	0
-0.40	3467.03	0.3467	1.994	0.1	1994.3205	0.002	0.002	1994.320
-0.50	1416.36	0.1416	0.244	0.1	244.1695	0.000	0.002	2238.490

Elevaciones msnm	Área		Intervalo m	Volumen		Volumen acumulado		
	m ²	Ha		m ³	Hm ³	Hm ³	m ³	
-0.60	913.09	0.0913	0.116	0.1	116.4722	0.000	0.002	2354.962
-0.70	595.17	0.0595	0.075	0.1	75.4128	0.000	0.002	2430.375
-0.80	319.95	0.0320	0.046	0.1	45.7559	0.000	0.002	2476.131
-0.90	96.67	0.0097	0.021	0.1	20.8313	0.000	0.002	2496.962
-1.00	23.61	0.0024	0.006	0.1	6.0141	0.000	0.003	2502.976
-1.10	1.26	0.0001	0.001	0.1	1.2432	0.000	0.003	2504.219

Fuente: elaboración propia.

En la Figura 6 se presenta la relación entre la altura (msnm), el área del espejo de agua (m²) y el volumen almacenado (hm³). La curva naranja muestra el crecimiento del área superficial conforme disminuye la elevación, mientras que la azul representa el volumen acumulado de agua por debajo del nivel superficial. Ambas curvas evidencian una morfología somera de la laguna, con profundidades que no superan los -1.10 msnm. Esta condición de baja profundidad implica una alta vulnerabilidad frente a eventos climáticos extremos, especialmente sequías prolongadas. A pesar de que visualmente el área del espejo de agua puede parecer extensa, el volumen efectivo de almacenamiento es reducido. Esto significa que puede secarse con facilidad, afectando gravemente su ecosistema y reduciendo la disponibilidad del recurso hídrico para actividades humanas, industriales y ecológicas.

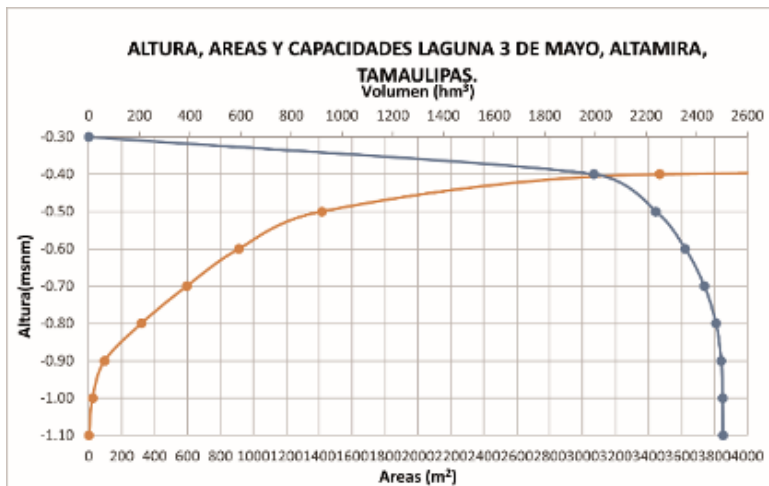


Figura 6. Altura, áreas y capacidades de la Laguna 3 de Mayo

Fuente: elaboración propia.

Conclusiones

De acuerdo con el estudio batimétrico que se realizó para estimar el volumen de almacenamiento de la Laguna 3 de Mayo y respecto a su configuración morfológica, se obtuvieron profundidades en este cuerpo de agua de -0.30 msnm a la -1.10 msnm, teniendo una laguna con profundidad superficial, producto del azolvamiento. Posteriormente se realizó la gráfica de altura, áreas y capacidad para determinar el volumen de almacenamiento dando como resultado 0.003 hm^3 , lo que es igual a $3\,000 \text{ m}^3$, una capacidad limitada debido a su baja profundidad. Por ello, posee mayor probabilidad de secarse, lo cual representa un riesgo significativo para los 400 habitantes que dependen de ella para la pesca y agricultura.

Trabajo futuro

Para mejorar la situación de la Laguna 3 de Mayo y mitigar los riesgos asociados, se recomienda realizar trabajos de desazolve para aumentar su profundidad útil. Asimismo, se sugiere monitorear el comportamiento de variaciones estacionales y los cambios a largo plazo por medio de estudios batimétricos.

Referencias

- Becerra, E. H. (1993). *Monitoreo y evaluación de logros en proyectos de ordenación de cuencas hidrográficas*. Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- Carbajal, Á. y González, M. (2012). Propiedades y funciones biológicas del agua. En *Agua para la salud: pasado, presente y futuro* (pp. 33-45). Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC). <https://www.ucm.es/data/cont/docs/458-2013-07-24-Carbajal-Gonzalez-2012-ISBN-978-84-00-09572-7.pdf>
- Comisión Nacional del Agua [CONAGUA]. (2024). *Sistema de Alertamiento a Tiempo Real*. *Sistema de Alertamiento a Tiempo Real*. <https://smn.conagua.gob.mx/es/>
- Esparza, M. (2014). La sequía y la escasez de agua en México. Situación actual y perspectivas futuras. *Secuencia*, (89), 193-219. https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0186-03482014000200008
- Foster, S. y Halbstein, D. (2014). *Integrating 3D Modeling, Photogrammetry and Design*. Springer.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía [INEGI]. (2024). *SIATL: Simulador de Flujos de Agua de Cuencas Hidrográficas*. https://antares.inegi.org.mx/analisis/red_hidro/siatl/
- Wolf, D. W. (2014). *Elements of Photogrammetry with Applications in GIS*. McGraw-Hill.

Capítulo 10

Evaluación multicriterio de sostenibilidad urbana en Ciudad Madero, Tamaulipas, México

Yuridia Azucena Salmerón-Gallardo¹

Roberto Pichardo-Ramírez

Resumen

La gestión del entorno urbano es inherente a la dinámica de las ciudades, el desarrollo de políticas y la planeación de estrategias. El objetivo del estudio consistió en evaluar la sostenibilidad urbana para el caso de Ciudad Madero, Tamaulipas, México, mediante la nueva agenda urbana instituida por la Organización de las Naciones Unidas. La metodología integró la herramienta SUPORT fundada en modelos de análisis multicriterio, para sistematizar indicadores sociales (IS), económicos (IE), ambientales (IA) y espaciales (IE_s). Los resultados indican que, aunque la puntuación global para la dimensión económica (D_{SU2}/S_o : 2.50), estima impactos positivos en el marco de la Agenda 2030; la dimensión social (D_{SU1}/S_o : -6.63), ambiental (D_{SU3}/S_o : -5.76) y espacial (D_{SU4}/S_o : -6.5) estiman impactos significativos ante la emergencia del clima, biodiversidad y salud. Se aporta una estimación desde un paradigma instaurado en las ciudades, con alcance para la toma de decisiones en dirección al Objetivo de Desarrollo Sostenible (ODS) 11 Ciudades y comunidades sostenibles.

Palabras clave: gestión, impacto, sostenibilidad.

¹ División de Estudios de Posgrado e Investigación, Universidad Autónoma de Tamaulipas. yuridiasalmerong@gmail.com.

Introducción

El cambio climático intensifica los patrones de precipitación, exacerbando la gravedad de inundaciones y sequías (IPCC, 2023a). En la misma dirección, la expansión urbana no regulada conlleva impactos irreversibles por la transformación de áreas naturales en zonas impermeables (IPCC, 2023b). Aunado a lo descrito, el crecimiento poblacional fragmenta fronteras y sobrepasa límites ecosistémicos (ONU, 2018). La urbanización evidencia un contraste paradójico (ONU, 2023); ya que, desde una óptica, las ciudades concentran prosperidad, y en otro ángulo convergen desigualdades y riesgo (CONAHCYT, 2023). Esta divergencia pone de manifiesto un escenario para examinar problemas contemporáneos (OCDE, 2023); sin embargo, si no se atiende de forma eficiente, acrecenta la vulnerabilidad (CEPAL, 2023).

En este contexto, la gestión del entorno urbano (GEU) incorpora acciones dirigidas a administrar las dimensiones de la sostenibilidad (INEGI, 2021a, 2021b). Por otra parte, la Nueva Agenda Urbana (NAU), una estrategia global postulada por las Naciones Unidas (ONU, 2020) y cimentada en la ciencia de las ciudades (ONU, 2020; INEGI, 2022a), constituye el fundamento del enfoque de sostenibilidad urbana. A la vez, trabaja como catalizador de la Agenda 2030, particularmente como acelerador del Objetivo de Desarrollo Sostenible (ODS) 11. Lograr que las ciudades sean inclusivas, seguras, resilientes y sostenibles (ONU, 2015).

Prieto-Sierra et al. (2012) y ARUP (2009) enfatizan el uso de la herramienta para la sostenibilidad portuaria (SUPORT), basada en Modelos de Análisis Multicriterio (MAMC) para evaluar indicadores y alternativas de sostenibilidad. Por su parte, instituciones como el Panel Intergubernamental del Cambio Climático (IPCC, 2023) y la Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL, 2023) advierten sobre los riesgos asociados a la urbanización no regulada, tales como la pérdida de biodiversidad y vulnerabilidad social. Benavides-Rosero y Mejía-Franco (2022) identifican obstáculos de índole geográfica, mientras que Zúñiga-Igarza et al. (2023) resaltan la percepción del entorno como un factor determinante. En este contexto, son clave los conceptos de sostenibilidad, referida como el desarrollo que satisface las necesidades actuales sin comprometer los recursos futuros, equilibrando las dimensiones ambiental, social y económica (ONU, 2016), además de la resiliencia, definida como la capacidad de los sistemas urbanos para absorber perturbaciones, adaptarse y recuperar su funcionalidad (IPCC, 2021).

Este capítulo aborda la sostenibilidad urbana con la aplicación de la herramienta SUPORT. Contiene un análisis estructurado en cuatro dimensiones (social, económica, ambiental y espacial), once indicadores y cuatro alternativas de intervención urbana evaluadas bajo un enfoque multicriterio. Como caso de estudio se seleccionó Ciudad Madero, Tamaulipas, México, debido a sus altos

índices de competitividad (POE-Tam., 2022). Este municipio, con una población de 205 933 habitantes en una distribución territorial de 48.4 km² (INEGI, 2021b) y una tasa de participación del 56.5 % de población económicamente activa (INEGI, 2021b), representa un núcleo estratégico para identificar tanto desafíos como oportunidades en la zona sur de Tamaulipas. Respecto a esta directriz, el objetivo del estudio consistió en evaluar la sostenibilidad urbana para el caso de Ciudad Madero, Tamaulipas, México, mediante la nueva agenda urbana de la ONU (2020).

Metodología

Para evaluar la sostenibilidad portuaria se utilizó la herramienta SUPORT, configurada para la gestión portuaria con principios de sostenibilidad urbana (Prieto-Sierra et al., 2012); desarrollada por ARUP'S *Software* en 2007 y validada por el Puerto de Santander (ARUP, 2009), con la filosofía de Modelos de Análisis Multicriterio (MAMC), para sistematizar indicadores y alternativas de sostenibilidad (CEPAL, 2008; PNUD, 2009).

Etapa I. Se llevó a cabo una revisión de información en un marco temporal delimitado (2021-2024) con base en el censo poblacional (INEGI, 2022a; 2022b), Plan Municipal de Desarrollo 2021-2024. (POE-Tam, 2022); integración territorial (INEGI, 2022c); entorno urbano (INEGI, 2021a) y demografía social (INEGI, 2021b).

Etapa II. Se evaluaron 4 alternativas (A_{SU}), 4 dimensiones (D_{SU}) y 11 indicadores (I_{SU}) de la Nueva Agenda Urbana establecida por la ONU (2020) (Figura 1, Tabla 1). El análisis se ejecutó con la herramienta SUPORT implementada en el programa de hojas de cálculo Microsoft® Excel® (versión 2405), siguiendo la metodología de ARUP (2009; 2010; 2017). A cada indicador, se asignó un valor dentro de un rango ordinal de (-3) a (+3), sobre el grado de cumplimiento de 11 Indicadores (I_{SU}) a partir de la información recopilada en la Etapa I, donde: (+3) representa el mejor cumplimiento, (0) indica el *statu quo*, (-3) corresponde a las peores prácticas (ecuación 1). Posteriormente, se aplicaron pesos específicos y una normalización subyacente al criterio de importancia (ecuación 2), conforme lo establecido por ARUP, 2009; 2010; 2017.

Etapa III. Se estimó la puntuación global empleando las ecuaciones (3, 4) de ARUP (2009; 2010; 2017), para 4 Dimensiones (D_{SU}) y 4 Alternativas (A_{SU}) definidas por ONU (2020). Este procedimiento (Figura 1), permitió generar una tabulación con puntajes ponderados (Tabla 1).

$$V_r = X_1, X_2, \dots, X_n; [(-3), (+3)]$$

Ecuación (1).

$$W_i' = \frac{V_i * 100}{\sum V_i}$$

Ecuación (2).

$$S_i = V_r * W_i'$$

Ecuación (3).

$$S_o = S_1 + S_2 + \dots + S_n = \sum_{i=1}^n S_i$$

Ecuación (4).

Donde:

V_r = Indicadores (X_1, X_2, \dots, X_n); rangos de valor $[(-3), (+3)]$.

W_i' = Ponderación normalizada.

S_i = Valoración inicial.

S_o = Puntuación global.

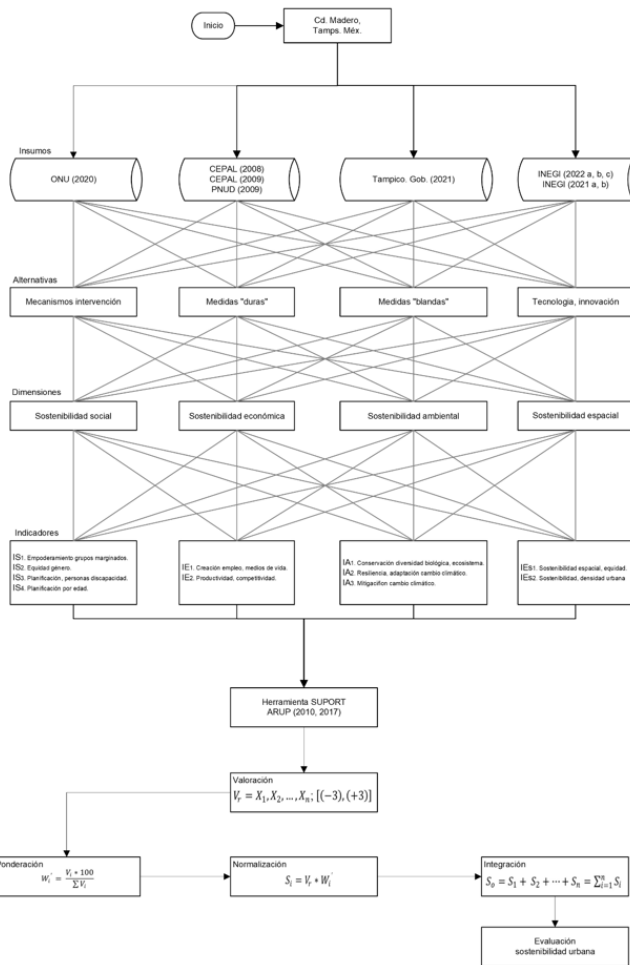


Figura 1. Estructura operativa

Fuente: Elaborado por autores.

Resultados

En la Tabla 1 se registran las puntuaciones generadas con la herramienta SUPORT (ARUP, 2009; 2010; 2017), para intensificar la resolución de alternativas de sostenibilidad frente a los rangos de valor por indicadores (Figura 2), que integran las dimensiones de sostenibilidad. La alternativa A_{SU1} *Mecanismos de intervención* establece políticas de suelo y vivienda, legislación y regulaciones, diseño urbano, financiamiento y gobernanza (S_o : -5.38) (ONU, 2020). En la dimensión espacial (A_{SU1}/S_o : -2.00) y ambiental (A_{SU1}/S_o : -2.13) (Tabla 1), se determinan impactos (-): IA_2 *Resiliencia y adaptación* (-2), IA_3 *Mitigación del cambio climático* (-3), (Figura 2a). En la dimensión social (A_{SU1}/S_o : -1.75) (Tabla 1), se determinan impactos (-): IS_3 *Planificación para poblaciones vulnerables* (-3), IS_4 *Planificación sensible a la edad* (-3), (Figura 2a). En la dimensión económica (A_{SU1}/S_o : 0.50) (Tabla 1), se determinan cambios (+): IE_1 *Creación de empleo* (1) (Figura 2a).

La alternativa de sostenibilidad A_{SU2} *Medidas “duras” para infraestructura y servicios* establece acciones en transporte y movilidad, energía, desechos sólidos, agua y saneamiento (S_o : -6.38) (ONU, 2020). En la dimensión espacial (A_{SU2}/S_o : -2.50) y social (A_{SU2}/S_o : -2.75) (Tabla 1), se determinan impactos (-): IS_3 *Planificación para migrantes y discapacitados* (-3), IS_4 *Planificación sensible a la edad* (-3) (Figura 2b). En la dimensión ambiental (A_{SU2}/S_o : -2.13) (Tabla 1), se determinan impactos (-): IA_2 *Resiliencia y adaptación al cambio climático* (-3), IA_3 *Mitigación del cambio climático* (-2) (Figura 2b). En la dimensión económica (A_{SU2}/S_o : 1.00) (Tabla 1), se determinan cambios (+): IE_2 *Productividad y competitividad* (1) (Figura 2b).

La alternativa de sostenibilidad A_{SU3} *Medidas “blandas”* establece principios en cultura, educación, salud y seguridad urbana (S_o : 2.38) (ONU, 2020). En la dimensión económica (A_{SU3}/S_o : 1.00) (Tabla 1), se determinan impactos (+): IE_1 *Creación de empleo* (1), IE_2 *Productividad y competitividad* (1), (Figura 2c). En la dimensión ambiental (A_{SU3}/S_o : 0.63) (Tabla 1), se determinan impactos (+): IA_1 *Conservación de diversidad biológica y ecosistema* (1), IA_3 *Mitigación del cambio climático* (1) (Figura 2c). En la dimensión espacial (A_{SU3}/S_o : 0.50) (Tabla 1), se determinan impactos (+): IEs_1 *Sostenibilidad espacial y equidad* (1), IEs_2 *Sostenibilidad espacial y densidad urbana* (0), (Figura 2c). En la dimensión social (A_{SU3}/S_o : 0.25) (Tabla 1), se determinan impactos (+, -): IS_2 *Equidad de género* (-1), IS_4 *Planificación sensible a la edad* (1) (Figura 2c).

La alternativa de sostenibilidad A_{SU4} *Medida de tecnología e innovación* establece acciones en transporte, tecnología de construcción y edificación, mapeo y datos espaciales (S_o : -7.01) (ONU, 2020). En la dimensión espacial (A_{SU4}/S_o : -2.50) (Tabla 1), se determinan impactos (-): IEs_1 *Sostenibilidad espacial y equidad* (-2), IEs_2 *Sostenibilidad espacial y densidad urbana* (-3) (Figura 2d). En la dimensión social (A_{SU4}/S_o : -2.38) (Tabla 1), se determinan impactos (-): IS_3 *Planificación para migrantes*

y discapacitados (-3), IS₄ *Planificación sensible a la edad* (-3) (Figura 2d). En la dimensión ambiental (A_{SU4}/S_o : -2.13) (Tabla 1), se determinan impactos (-): IA₂ *Resiliencia y adaptación al cambio climático* (-2), IA₃ *Mitigación del cambio climático* (-3) (Figura 2d). En la dimensión económica (A_{SU4}/S_o : 0.00) (Tabla 1), se determinan impactos (-, +): IE₁ *Creación de empleo* (-1), IE₂ *Productividad y competitividad* (1) (Figura 2d).

La puntuación global para D_{SU1} *Dimensión social* es S_o : -6.63; donde medidas duras (S_o : -2.75), tecnología e innovación (S_o : -2.38), mecanismos de intervención (S_o : -1.75) y medidas blandas (S_o : 0.25) (Tabla 1) determinan un potencial admisible en cultura, educación, salud y seguridad urbana (INEGI, 2021a; ONU, 2023); reforzando la urgencia de avanzar en las metas del ODS 11, especialmente en vivienda segura (11.1), transporte sostenible (11.2), inclusión urbana (11.3) y resiliencia ante desastres (11.5). La puntuación global para D_{SU2} *Dimensión económica* es S_o : 2.50; donde, medidas duras (S_o : 1.00), medidas blandas (S_o : 1.00), mecanismos de intervención (S_o : 0.50) y tecnología e innovación (S_o : 0.00) (Tabla 1) determinan cambios por intervenciones estructurales y políticas (ONU, 2015; 2018); destacando la necesidad de alinear estrategias con el ODS 11, particularmente en planificación urbana sostenible (11.3), transporte asequible (11.2) y eficiencia de recursos (11.b).

La puntuación global para D_{SU3} *Dimensión ambiental* es S_o : -5.76; donde mecanismos de intervención (S_o : -2.13), medidas duras (S_o : -2.13), tecnología e innovación (S_o : -2.13) y medidas blandas (S_o : 0.63) (Tabla 1) determinan la urgencia para promover tecnologías sostenibles (CEPAL, 2023; OCDE, 2023); evidenciando la criticidad de implementar estrategias alineadas al ODS 11, para la reducción del impacto ambiental urbano (11.6), eficiencia de recursos (11.b) y protección de espacios verdes (11.7). La puntuación global para D_{SU4} *Dimensión espacial* es S_o : -6.5; donde medidas duras (S_o : -2.50), tecnología e innovación (S_o : -2.50), mecanismos de intervención (S_o : -2.00) y medidas blandas (S_o : 0.50) (Tabla 1) determinan cambios por planificación participativa y diseño urbano equitativo (CONAHCYT, 2023), jerarquizando la implementación de estrategias alineadas al ODS 11, en planificación urbana inclusiva (11.3), acceso a espacios públicos seguros (11.7) y diseño urbano equitativo (11.a).

Tabla 1. Estimación de sostenibilidad urbana

	A _{SU1} . Mecanismos intervención			A _{SU2} . Medidas duras			A _{SU3} . Medidas blandas			A _{SU4} . Tecnología innovación		
	V _i	W' _i	S _o	V _i	W' _i	S _o	V _i	W' _i	S _o	V _i	W' _i	S _o
D_{SU1}. Dimensión social												
IS ₁ . Empoderamiento de grupos marginados	1	12.5	-0.25	1	12.5	-0.38	1	12.5	-0.13	1	12.5	-0.25
IS ₂ . Equidad de género	2	25	0	2	25	-0.5	2	25	-0.25	2	25	-0.25
IS ₃ . Planificación para migrantes y personas con discapacidad	2	25	-0.75	2	25	-0.75	2	25	0.25	2	25	-0.75
IS ₄ . Planificación sensible a la edad	3	37.5	-0.75	3	37.5	-1.13	3	37.5	0.38	3	37.5	-1.13
Σ=	8	100	-1.75	8	100	-2.75	8	100	0.25	8	100	-2.38
D_{SU2}. Dimensión económica												
IE ₁ . Creación de empleo y medios de vida	3	50	0.5	3	50	0.5	3	50	0.5	3	50	-0.5
IE ₂ . Productividad y competitividad	3	50	0	3	50	0.5	3	50	0.5	3	50	0.5
Σ=	6	100	0.50	6	100	1.00	6	100	1.00	6	100	0.00
D_{SU3}. Dimensión ambiental												
IA ₁ . Conservación de diversidad biológica y ecosistema	2	25	-0.25	2	25	-0.25	2	25	0.25	2	25	-0.25
IA ₂ . Resiliencia y adaptación al cambio climático	3	37.5	-0.75	3	37.5	-1.13	3	37.5	0	3	37.5	-0.75
IA ₃ . Mitigación del cambio climático	3	37.5	-1.13	3	37.5	-0.75	3	37.5	0.38	3	37.5	-1.13
Σ=	8	100	-2.13	8	100	-2.13	8	100	0.63	8	100	-2.13
D_{SU4}. Dimensión espacial												
IEs ₁ . Sostenibilidad espacial y equidad	3	50	-1	3	50	-1	3	50	0.5	3	50	-1
IEs ₂ . Sostenibilidad espacial y densidad urbana	3	50	-1	3	50	-1.5	3	50	0	3	50	-1.5
Σ=	6	100	-2.00	6	100	-2.50	6	100	0.50	6	100	-2.50
W' _i = Ponderación normalizada; S _i Valoración inicial; S _o = Puntuación global.												

Fuente: elaboración propia.

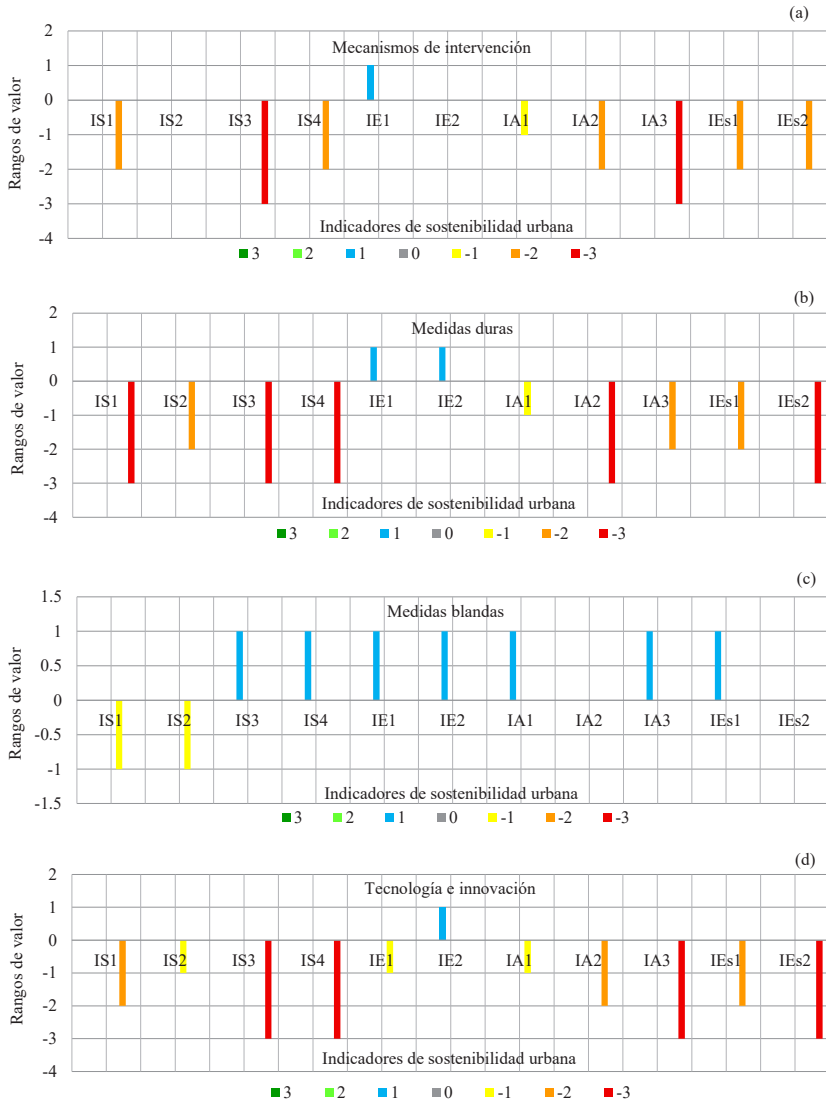


Figura 2. Balance de sostenibilidad urbana

Fuente: elaboración propia.

La herramienta SUPORT viabilizó la evaluación de sostenibilidad urbana para Ciudad Madero, Tamaulipas, México. La puntuación global para D_{SU1} Dimensión social (S_0 : -6.63), D_{SU3} Dimensión ambiental (S_0 : -5.76) y D_{SU4} Dimensión espacial (S_0 : -6.5), muestra que las políticas actuales son divergentes a la Agenda 2030 (INEGI, 2022a; 2022b; 2022c), lo cual hace hincapié en las alternativas de la NAU (A_{SU1} Mecanismos

de intervención, A_{SU2} *Medidas duras*, A_{SU3} *Medidas blandas*, A_{SU4} *Tecnología e innovación*), que funcionan como impulsores de cambio (CEPAL, 2008; PNUD, 2009). Por otro lado, D_{SU2} *Dimensión económica* (S_o : 2.50) muestra efectos positivos en la gestión del crecimiento, más allá de la expansión urbana (Macatulad y Biljecki, 2024).

En este sentido, Prieto-Sierra et al. (2012) resaltan que los indicadores económicos (IE_1, IE_2) y espaciales (IEs_1, IEs_2) precisan significancia de ponderaciones de mayor consenso que los indicadores sociales (IS_1, IS_2, IS_3, IS_4). Zúñiga-Igarza et al. (2023) destacan la sostenibilidad urbana como la percepción del entorno. En contraste, Fu et al. (2023) consideran: valoración-planificación, conservación-implementación y monitoreo-control. Benavides-Rosero y Mejía-Franco (2022) identifican obstáculos: físico-espaciales, geográficos y sociales por vacíos normativos, crecimiento urbano rápido y respuesta administrativa tardía. Bajo este esquema, Ultramari et al. (2022) extienden el análisis de ciudades con ayuda de métodos analíticos, transferibles y ampliables, teniendo en cuenta la diversidad urbana e importancia de indicadores (IS, IE, IA, IE_s). En adición a esto, Kirby et al. (2023) proponen un mapeo de mitigación con sinergias (+), compromisos (-) y protocolos de desarrollo. Lo anterior obedece al auge entre esfuerzos de sostenibilidad urbana y el ODS 11 (ONU, 2020), que llama a la acción para alcanzar ciudades resilientes, asociando sistemas interconectados y estructuras de gobernanza (Sethi et al., 2020). Aunque los indicadores económicos (IE_1, IE_2) están contruidos para acrecentar productividad y empleo, es necesario establecer perspectivas a largo plazo (Seto et al., 2021). De ahí que las investigaciones de esta naturaleza poseen la facultad de incidir en las metas del ODS 11, conexas con políticas de vivienda y gobernanza urbana (Cui et al., 2024). Si bien las ciudades contribuyen a la emergencia del clima, biodiversidad y salud (IPCC, 2023a; 2023b); las alternativas ($A_{SU1}, A_{SU2}, A_{SU3}, A_{SU4}$) son factibles de contemplarse con efectos que trascienden límites administrativos (Seto et al., 2021).

Conclusión

La consecución del objetivo proporciona una visión de sostenibilidad con directrices NAU; explorando la brecha entre accesibilidad de información y adaptación de la herramienta SUPORT sobre la base metodológica MAMC, utilizando indicadores (IS, IE, IA, IE_s), dimensiones ($D_{SU1}, D_{SU2}, D_{SU3}, D_{SU4}$), alternativas ($A_{SU1}, A_{SU2}, A_{SU3}, A_{SU4}$). Los resultados proyectan que A_{SU3} *Medidas "blandas"* (S_o : 2.38), A_{SU4} *Medida de tecnología e innovación* (S_o : -7.01), en sinergia con las dimensiones D_{SU1} *Social* (S_o : -6.63), D_{SU2} *Económica* (S_o : 2.50), requieren priorización hacia el cumplimiento de las metas del ODS 11. Los resultados de esta investigación pueden fortalecer decisiones estratégicas, considerando

medidas “duras y blandas” -bases estructurales y participación social- para superar el estancamiento en el ODS 11. En última instancia, se evidencia un progreso insuficiente para alcanzar las metas al 2030, requiriéndose monitoreo continuo y compromiso activo de los actores públicos para catalizar un cambio sistémico con replicación en otras zonas geográficas.

Referencias

- ARUP. (2009). *ASPIRE® a sustainability poverty and infrastructure routine for evaluation*. Autoridad Portuaria de Santander. <https://bit.ly/4bOy8H9>. Fecha de consulta: 16 de julio de 2024.
- _____. (2010). *SUPPORT, una herramienta para evaluar la sostenibilidad de los puertos*. Autoridad Portuaria de Santander. <https://bit.ly/4d4O3SI>. Fecha de consulta: 16 de julio de 2024.
- _____. (2017). *SPEAR® Sustainable project appraisal routine*. Autoridad Portuaria de Santander. <https://sustainabilitytoolkit.arup.com/#/home>. Fecha de consulta: 16 de julio de 2024.
- Benavides-Rosero, A. M. y Mejía-Franco, N. (2022). Factores que obstaculizan la gestión urbana sostenible: estudio de un municipio en Colombia. *Estudios Demográficos y Urbanos*, 37(1), 157-199. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=31270567005>
- Comisión Económica para América Latina y el Caribe [CEPAL]. (2008). *Manual metodológico de evaluación multicriterio para programas y proyectos*. <https://hdl.handle.net/11362/35914>.
- _____. (2023). *Escenarios prospectivos al 2030 de los indicadores de los objetivos de desarrollo sostenible*. <https://hdl.handle.net/11362/68008>.
- Consejo Nacional de Humanidades Ciencias y Tecnologías [CONAHCYT]. (2023). *Programas Nacionales Estratégicos (PRONACES)*. <https://bit.ly/3WsdQPj>.
- Cui, Y., Yin, M., Cheng, X., Tang, J. y He, B. J. (2024). Towards cool cities and communities: Preparing for an increasingly hot future by the development of heat-resilient infrastructure and urban heat management plan. *Environmental Technology & Innovation*, 34, 103568. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.eti.2024.103568>
- Fu, L., Zhang, Q., Tang, Y., Pan, J. y Li, Q. (2023). Assessment of urbanization impact on cultural heritage based on a risk-based cumulative impact assessment method. *Heritage Science*, 11(1), 177. <https://doi.org/10.1186/s40494-023-01024-0>
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía [INEGI]. (2021a). *Características del entorno urbano 2020. Síntesis metodológica y conceptual*. <https://bit.ly/3SafLp6>.
- _____. (2021b). *Panorama sociodemográfico de Tamaulipas. Censo de Población y Vivienda 2020*. <https://bit.ly/4bL7JtJ>.
- _____. (2022a). *Herramientas del Censo de Población y Vivienda 2020: Principales Resultados por Localidad (ITER)*. <https://bit.ly/4d3bI5X>.
- _____. (2022b). *Principales Resultados por Localidad (ITER)*. <https://bit.ly/3y06qJu>.
- _____. (2022c). *Sistema de Consulta de Integración Territorial (SCITEL), manual de usuario*. <https://bit.ly/3zM2NHP>.

- Intergovernmental Panel on Climate Change [IPCC]. (2021). *Climate change 2021: The physical science basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report*. <https://www.ipcc.ch/ar6-wg1/>.
- _____. (2023a). *Climate change 2022 - mitigation of climate change: working group III contribution to the sixth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. <https://doi.org/10.1017/9781009157926>.
- _____. (2023b). *Climate change 2023 - summary for policymakers*. <https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/>.
- Kirby, M. G., Scott, A. J., Luger, J. y Walsh, C. L. (2023). Beyond growth management: A review of the wider functions and effects of urban growth management policies. *Landscape and Urban Planning*, 230, 104635. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2022.104635>
- Macatulad, E. y Biljecki, F. (2024). Continuing from the Sendai Framework midterm: Opportunities for urban digital twins in disaster risk management. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 102, 104310. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ijdr.2024.104310>
- Organisation for Economic Cooperation and Development [OCDE]. (2023). *Government at a glance 2023*. <https://doi.org/10.1787/3d5c5d31-en>.
- Organización de las Naciones Unidas [ONU]. (2015). 70/1. *Transformar nuestro mundo: la agenda 2030 para el desarrollo sostenible*. <https://sdgs.un.org/2030agenda>.
- _____. (2016). *Urbanization and development: Emerging futures. World Cities Report 2016*. <https://unhabitat.org/world-cities-report>.
- _____. (2018). *Vivienda y ODS en México*. Programa de las Naciones Unidas para los Asentamientos Humanos. <https://bit.ly/3WnloTl>.
- _____. (2020). *La Nueva Agenda Urbana*. Programa de las Naciones Unidas para los Asentamientos Humanos. <https://bit.ly/3xPne69>.
- _____. (2023). *Informe de los Objetivos de Desarrollo Sostenible. Reporte 2023: edición especial*. <https://unstats.un.org/sdgs/report/2023/>.
- Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo [PNUD]. (2009). *Manual de planificación, seguimiento y evaluación de los resultados de desarrollo*. <https://bit.ly/3YlvOcw>.
- POE-Tam. (2022). *Plan Municipal de Desarrollo 2021-2024*. Periódico Oficial del Estado, Órgano del Gobierno Constitucional del Estado Libre y Soberano de Tamaulipas. <https://bit.ly/3LsEvVO>.
- Prieto-Sierra, A. M., Tejada-Gorráiz, F. y Montero-Campos, M. (2012). *SUPPORT. Sustainable ports*. Autoridad Portuaria de Santander, ARUP. <https://portusonline.org/portus-24/>.

- Sethi, M., Lamb, W., Minx, J. y Creutzig, F. (2020). Climate change mitigation in cities: A systematic scoping of case studies. *Environmental Research Letters*, 15(9), 1-16. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab99ff>
- Seto, K. C., Churkina, G., Hsu, A., Keller, M., Newman, P. W., Qin, B. et al. (2021). From Low-to Net-Zero Carbon Cities: The Next Global Agenda. *Annual Review of Environment and Resources*, 46, 377-415. <https://doi.org/10.1146/annurev-environ-050120>
- Ultramari, C., Nascimento, P. e Hidalgo, D. (2022). La gestión urbana desde el discurso de sus alcaldes: idealización y retórica en metrópolis globales norteamericanas y brasileñas. *Estudios sobre las Culturas Contemporáneas*, 28(55), 28-56. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=31671726004>
- Zúñiga-Igarza, L. M., Pérez-Campdesuñer, R. y Sánchez-Rodríguez, A. (2023). Contribuciones de la gestión ambiental urbana a la conservación de los valores del patrimonio construido. *URBE. Revista Brasileira de Gestão Urbana*, 15, e20220098. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=193174205008>

Algunas obras de los mismos coordinadores:

- *Investigaciones actuales en medio ambiente II*
- *Concreto verde: perspectivas de investigación*
- *Tópicos selectos de ingeniería y ciencias ambientales*
- *Ingeniería básica y de frontera con incidencia en los Programas Nacionales Estratégicos*
- *Índice de vulnerabilidad ante corrosión de estructuras de concreto reforzado*
- *Ingeniería, Ciencia, Tecnología e Innovación en la Cadena de Conocimiento*
- *La ingeniería aplicada en el noreste de México*

Consulta estos títulos dentro del catálogo de Libros UAT del Consejo de Publicaciones en el siguiente enlace:



<https://libros.uat.edu.mx>

 <https://publicaciones.uat.edu.mx>

Equipo editorial

Coordinación: Venancio Vanoye Eligio

Gestión y administración: Jessica Abigail Rodríguez Tinajero, María Teresa Maldonado Sada

Revisión y corrección de estilo: José Luis Énder Velarde García, Jorge Alberto Vázquez Herrera

Diseño y maquetación: Erika González Navarro, Wendy Castillo Cruz, Lorena E. Cortez Rodríguez

Innovación para una ingeniería sostenible, de
Roberto Pichardo Ramírez, Esperanza Martínez Cano,
Rocío del Carmen Vargas Castilleja,
Salvador Ibarra Martínez, coordinadores, publicado
por la Universidad Autónoma de Tamaulipas y
Editorial Fontamara en octubre de 2025. La revisión
y diseño editorial correspondieron al Consejo de
Publicaciones UAT.

editorial
fontamara



VERDAD, BELLEZA, PROBIIDAD

Esta obra está dedicada a proponer innovaciones tecnológicas, desde una perspectiva sostenible, que aporten nuevas estrategias y metodologías que respondan a las necesidades existentes en las empresas y sectores productivos de nuestro país. Cada uno de los 11 capítulos que conforman este libro, son el resultado de trabajos de investigación aplicados, las cuales introducen aproximaciones en casos reales desde diferentes perspectivas que abordan la ingeniería civil, la industria, la geometría, el medio ambiente y la construcción.

El conjunto de estos trabajos propone ser una ruta demostrativa de cómo los profesores e investigadores de la Facultad de Ingeniería Tampico de la UAT son conscientes de las necesidades implicadas en los Objetivos de Desarrollo Sostenible propuestos por la Organización de las Naciones Unidad. Para finalizar, este libro espera que sus lectores encuentren trabajos reales con soluciones adecuadas a problemas existentes en nuestra región y en el mundo.



ISBN UAT: 978-607-69291-2-4
ISBN Fontamara: 978-968-9729-25-9

ISBN 978 968 9729 25 9

