

REVISTA CIENTÍFICA DE

INGENIERÍAS Y ARQUITECTURA

VOLUMEN 5 NÚMERO 1

ÍNDICE

Carta editorial	4
Aplicación del problema de mochila para la optimización logística de la carga de camiones: caso de estudio en una empresa de lácteos	7
Diseño y validación preliminar de un soporte de rodilla personalizado para rehabilitación funcional	22
Innovaciones tecnológicas para incrementar la cadena de valor de la papa agroecológica en Los Pescados, Veracruz	40
Aprovechamiento sustentable del orejón (<i>Enterolobium cyclocarpum</i>) para la elaboración de un jabón biodegradable	67
Comparación de dos soluciones orgánicas nutritivas en la sobrevivencia del pimiento morrón, <i>Capsicum annuum</i> , cultivado en hidroponía	80
Sensibilidad de los impactos ambientales de biorrefinería asociadas al uso reducido de fosfato de sodio	98
Análisis de sensibilidad de la sustentabilidad ambiental de biorrefinería con sustitución de carbón activado	120
Gestión de residuos en la Ciudad de México: modelos matemáticos y la curva de Kuznets	139
Revisión del potencial de los residuos orgánicos y textiles como sustrato en humedales artificiales	166
Innovación tecnológica para el aprovechamiento sustentable de residuos sólidos orgánicos en el Valle de Teotihuacán	190

Aviso de Privacidad

Revista Científica de Ingenierías y Arquitectura

La Universidad La Salle Oaxaca A.C., con domicilio en Camino a San Agustín No. 407, Colonia Santa Cruz Xoxocotlán Oaxaca, Oaxaca, C.P. 71230, es responsable del tratamiento de sus datos personales en términos de lo establecido por el artículo 3º fracción XIV de la Ley Federal de Protección de Datos Personales en Posesión de Particulares (LFPDPPP). Los datos personales generales recabados de manera electrónica en este formulario como lo son: nombre completo, correo electrónico personal e institución o lugar de procedencia, serán utilizados para el llenado del formulario de registro que le permitirá tener acceso para publicar o proponer artículos para su exposición en” La Revista Científica de Ingenierías y Arquitectura” de la Universidad La Salle Oaxaca. Si usted tiene alguna duda sobre el manejo de los datos personales o desea ejercer sus derechos de acceso, rectificación, cancelación u oposición, o bien quiere conocer nuestro aviso de privacidad integral, puede hacerlo entrando a nuestro sitio web: [web: web www.ulsaoaxaca.edu.mx](http://web.www.ulsaoaxaca.edu.mx).

Información legal

Revista Científica de Ingenierías y Arquitectura, año 5, no. 1, junio 2026, es una publicación semestral (“Enero-Junio”, “Julio-Diciembre”) editada por la Universidad La Salle Oaxaca, A.C. Camino a San Agustín 407, Santa Cruz Xoxocotlán, C.P. 71230, Oaxaca, México. Tel. (951) 52 9333. Página electrónica de la revista: <https://revistas.ulsaoaxaca.edu.mx/RCIA>. Editor responsable: Arq. Karime Yasmín Hernández Matus (correo electrónico: revistacientifica.eia@ulsaoaxaca.edu.mx) Reserva de Derechos al Uso Exclusivo del Título 04-2024-030511234100-102, ISSN: 3061-7154, ambos otorgados por el Instituto Nacional del Derecho de Autor. Responsable de la última actualización de este número: Arq. Karime Yasmín Hernández Matus, revistacientifica.eia@ulsaoaxaca.edu.mx, Universidad La Salle Oaxaca, A.C. Camino a San Agustín 407, Santa Cruz Xoxocotlán, C.P. 71230, Oaxaca, México. Fecha de la última modificación, 15 de junio de 2026

Carta editorial

Apreciable comunidad académica y científica:

Es un honor dirigirme a ustedes para presentar el primer volumen del año 2026 de la Revista Científica de Ingenierías y Arquitectura de la Universidad La Salle Oaxaca. En la era del cambio tecnológico acelerado, esta revista reafirma su compromiso con la generación de conocimiento que responda a los desafíos regionales y globales. Inspirada en valores humanos, este número se sustenta en el progreso científico orientado por la ética y la búsqueda de la transformación social, valores que se conjuntan con los principios y objetivos establecidos en “VII Simposio y VIII Seminario Internacional de Educación Ambiental y Desarrollo Sustentable” (SIEA2026). Así, cada artículo que ustedes lean lleva consigo la impronta de la responsabilidad social y búsqueda de la mejora en la calidad de vida.

Es bien sabido que los problemas complejos de la actualidad no pueden resolverse desde una visión aislada. Por ello, este ejemplar promueve la investigación interdisciplinaria en la que se convergen esfuerzos entre diversas áreas del saber. Solo a través de esta colaboración, se puede generar una innovación que sea realmente útil para el desarrollo del ser humano.

En este sentido, el primer artículo titulado “Aplicación del problema de mochila para la optimización logística de la carga de camiones: caso de estudio en una empresa de lácteos” se explora el uso de un modelo de programación dinámica para optimizar la logística de distribución de productos perecederos, proporcionando de manera cuantitativa, criterios para la toma de decisiones operativas de industrias lácteas. En el segundo artículo titulado “Diseño y validación preliminar de un soporte de rodilla personalizado para rehabilitación funcional” se desarrolla tecnología con validación piloto de un soporte de rodilla para tratar la tendinitis rotuliana en deportistas de alto impacto, demostrando la importancia de la ciencia en soluciones para la salud humana.

Avanzando hacia la tecnología aplicada a procesos agroecológicos, los artículos titulados “Innovaciones Tecnológicas para la cadena de valor de la papa agroecológica en los Pescados, Veracruz”, “Aprovechamiento sustentable del orejón (*Enterolobium cyclocarpum*) para la elaboración de un jabón biodegradable” y “Comparación de dos soluciones orgánicas nutritivas en la sobrevivencia de pimiento morrón de *Capsicum annuum* cultivado en hidroponía”, respectivamente, los investigadores evidencian la importancia de las metodologías de investigación

y desarrollo para generar estrategias las cuales contribuyan al cuidado con el medio ambiente, así como al manejo y aprovechamiento de recursos naturales fundamentales para el desarrollo humano.

Siguiendo este tenor, se podrán revisar contribuciones científicas enfocadas en la gestión de residuos sólidos urbanos, orgánicos y textiles desde varias vertientes, ya sea de carácter experimental, investigación documental y modelado matemático, todos convergiendo en la importancia de un correcto manejo de residuos para garantizar el desarrollo sostenible y dar soluciones a problemática medioambientales. En especial, los artículos que abordan esta temática son los titulados “Gestión de residuos en la Ciudad de México: modelos matemáticos y la curva de Kuznets”, “Revisión del potencial de los residuos orgánicos y textiles como sustrato en humedales artificiales” e “Innovación tecnológica para el aprovechamiento sustentable de residuos sólidos orgánicos en el valle de Teotihuacán”.

Culminando la presentación de los artículos publicados en esta edición titulados “Sensibilidad de los impactos ambientales de biorrefinería asociadas al uso reducido de fosfato de sodio” y “Análisis de sensibilidad de la sustentabilidad ambiental de biorrefinería con sustitución de carbón activado”, se evalúan los impactos ambientales y sus efectos en la sostenibilidad de industrias químicas, siendo estos un buen ejemplo de la interdisciplina científica como fin para lograr estudios que abarquen diferentes áreas de conocimiento.

Finalmente, confío en que las investigaciones presentadas en este número no solo enriquezcan su acervo académico, sino que sirvan como catalizadores para una innovación con sentido humano. Les invito a adentrarse en estas páginas con un pensamiento crítico y reflexivo, encontrando en cada artículo una oportunidad para colaborar, desde la ingeniería y la arquitectura, en la construcción del desarrollo científico y tecnológico. Que esta lectura sea el inicio de nuevos diálogos que trasciendan nuestras aulas en beneficio de la sociedad.

Indivisa Manent
Lo unido permanece

Dr. Eduardo Toral Sánchez
Director de la Escuela de Ingenierías y Arquitectura.

Derechos de Autor© 2026 Toral Sánchez, Eduardo



Este texto está protegido por una licencia [Creative Commons 4.0, Attribution 4.0 International](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/). Usted es libre para Compartir, copiar y redistribuir el material en cualquier medio o formato y adaptar el documento, remezclar, transformar y crear a partir del material— para cualquier propósito, incluso para fines comerciales, siempre que cumpla la condición de: Atribución: Usted debe dar crédito a la obra original de manera adecuada, proporcionar un enlace a la licencia, e indicar si se han realizado cambios. Puede hacerlo en cualquier forma razonable, pero no de forma tal que sugiera que tiene el apoyo del licenciante o lo recibe por el uso que hace de la obra.

APLICACIÓN DEL PROBLEMA DE MOCHILA PARA LA OPTIMIZACIÓN LOGÍSTICA DE LA CARGA DE CAMIONES: CASO DE ESTUDIO EN UNA EMPRESA DE LÁCTEOS

Application of the knapsack problem for the logistic optimization of truck loading: a case study in a dairy company

Enrique Ávila Soler^{1*}, Brenda Aracely Ramírez Barraza², Julio César Ayllón Benítez³, Jesús Vicente González Sosa⁴

**Autor de correspondencia*

DOI: [10.56643/rcia.v5i1.232](https://doi.org/10.56643/rcia.v5i1.232)

Como citar este artículo: Ávila Soler, E., Ramírez Barraza, B. A., Ayllón Benítez, J. C. y González Sosa, J. V. (2026). Aplicación del problema de mochila para la optimización logística de la carga de camiones: caso de estudio en una empresa de lácteos. Revista Científica de Ingenierías y Arquitectura. 5(1). 07-21. <https://doi.org/10.56643/rcia.v5i1.232>

Resumen

La distribución eficiente de productos perecederos es un reto crítico para la industria de lácteos. En este sentido, es esencial maximizar la utilidad por camión y reducir costos operativos. Este estudio implementa un modelo de programación dinámica (pd) para resolver un problema de mochila aplicado a la logística urbana de una empresa de lácteos. Con este propósito se desarrolló un algoritmo multietapa que determina la combinación óptima de cinco productos lácteos para un camión con capacidad máxima de 3 881 kg. Los resultados muestran que la carga óptima alcanza una utilidad total de \$ 105 MXN, excluyendo estratégicamente productos que dejan menor margen, mientras que escenarios de capacidad menor (3 000 kg) reducen la utilidad a \$ 85 MXN y capacidades mayores (4 200 kg) la aumentan ligeramente a \$ 110 MXN. Estos resultados permiten identificar niveles de capacidad económicamente eficientes y productos prioritarios para la carga, proporcionando un criterio cuantitativo para la toma de decisiones operativas en la planificación del transporte urbano. La metodología hace posible simular distintos escenarios de capacidad y demanda, demostrando flexibilidad, reproducibilidad y eficiencia; asimismo, evidencia la aplicabilidad práctica de la pd en la optimización logística de productos perecederos.

¹Doctor en Ciencias. Profesor-investigador del Tecnológico Nacional de México, Instituto Tecnológico de Gustavo A. Madero. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8980-0925>. Correo electrónico: industrial014@gamadero.tecnm.mx

² Doctora en Ciencias. Profesora-investigadora de la Universidad Autónoma Metropolitana-Azcapotzalco. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7007-8925>

³ Doctor en Ciencias. Profesor-investigador del Tecnológico Nacional de México, Tecnológico de Estudios Superiores de Valle de Bravo. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5051-5411>

⁴ Doctor en Ingeniería. Profesor-investigador de la Universidad Nacional Autónoma de México-Facultad de Estudios Superiores Aragón. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5051-5411> Recibido: 09/11/2025 | Aceptado: 08/01/2026 | Publicado: 15/06/2026 Los autores declaran no tener ningún conflicto de interés. La investigación fue financiada con recursos de los autores.

Palabras clave: Empresa de lácteos, logística, maximización de utilidad, problema de mochila, programación dinámica.

Abstract

The efficient distribution of perishable products represents a critical challenge in the dairy industry, where maximizing profit per truck and reducing operating costs are essential. This study implements a dynamic programming (DP) model to solve a knapsack problem applied to the urban logistics of a dairy company. A multistage algorithm was developed to determine the optimal combination of five dairy products for a truck with a maximum capacity of 3,881 kg. The results show that the optimal load achieves a total profit of 105 MXN through the strategic exclusion of lower-margin products, while scenarios with lower capacity (3,000 kg) reduce profit to 85 MXN and higher capacities (4,200 kg) yield only a slight increase to 110 MXN. These results make it possible to identify economically efficient capacity levels and priority products for loading, providing a quantitative criterion for operational decision-making in urban transport planning. The methodology allows the simulation of different capacity and demand scenarios, demonstrating flexibility, reproducibility, and efficiency; highlighting the practical applicability of dynamic programming in the logistics optimization of perishable products.

Keywords: Dynamic programming, logistics, knapsack problem, utility maximization, dairy company.

Introducción

La distribución logística en empresas de alimentos perecederos, como las del sector de lácteos, enfrenta desafíos críticos asociados a la capacidad de transporte, los costos operativos y la preservación de la calidad del producto entregado (Kashyap et al., 2023; Ndraha et al., 2018; Zhong et al., 2022). La naturaleza perecedera de estos bienes exige decisiones logísticas que minimicen desperdicios, garanticen la frescura del producto y mantengan la rentabilidad de la operación (Li et al., 2020).

La planeación de la carga de camiones está sujeta a restricciones de capacidad, tiempo, temperatura; estas limitaciones hacen que el proceso pueda abordarse como un problema de optimización, en el que es necesario encontrar un equilibrio entre eficiencia operativa, rentabilidad y preservación de la calidad (Ri-

naldi et al., 2020). En este contexto, la programación dinámica (pd) constituye una herramienta útil para analizar y resolver problemas de decisión secuencial, ya que permite descomponerlos en subproblemas más simples y manejables (Taha, 2020). Dentro de este enfoque, el problema de la mochila (knapsack) destaca por su aplicación para maximizar la utilidad considerando restricciones de capacidad (Jacko, 2016; Martello y Toth, 1990).

Diversos estudios señalan que la integración de la pd con enfoques de simulación y análisis logístico puede contribuir a mejorar la asignación de recursos y la eficiencia operativa en las cadenas de suministro de productos perecederos (Rinaldi et al., 2020). Sin embargo, en la práctica aún se presentan problemas en la asignación adecuada de los productos a las rutas de distribución. Esto puede traducirse en camiones con capacidad parcialmente utilizada, o en combinaciones de carga que no logran maximizar la utilidad económica de cada viaje, situación que se presenta principalmente en zonas urbanas con altos niveles de congestión y restricciones de tiempo. Es posible que estas ineficiencias generen pérdidas económicas por viaje y den lugar a un aprovechamiento limitado de la flota disponible, lo que justifica la necesidad de usar herramientas cuantitativas que apoyen la toma de decisiones en la planificación logística.

El presente estudio se sitúa en el contexto de la distribución de productos lácteos en la Ciudad de México. En este sentido, se toman en cuenta las condiciones habituales de tráfico urbano y las necesidades de planeación operativa diaria. Aunque la literatura propone enfoques alternativos para la optimización logística, como modelos heurísticos, metaheurísticos y formulaciones multiobjetivo, la programación dinámica representa una alternativa útil para abordar problemas de decisión bajo restricciones bien definidas, aun cuando su aplicación pueda verse limitada por consideraciones de escalabilidad computacional. El objetivo general de este estudio es desarrollar un modelo de programación dinámica empleando el problema de la mochila, con el propósito de optimizar la carga de camiones de una empresa del sector lácteo, a fin de maximizar la utilidad total por viaje bajo restricciones de capacidad. Para ello, el modelo considera variables como peso, rentabilidad y demanda de los productos.

De manera específica, el estudio persigue tres objetivos: a) modelar la selección óptima de productos mediante la formulación de un problema de mochila 0/1; b) analizar el efecto de las restricciones de capacidad del camión sobre la utilidad total; y c) evaluar distintos escenarios de capacidad para apoyar la toma de decisiones logísticas. El trabajo se plantea con enfoque académico y

demostrativo, haciendo énfasis en la claridad metodológica y la reproducibilidad del modelo.

Materiales y métodos

El estudio se realizó en la Ciudad de México, caracterizada por intenso tráfico urbano y distancias cortas, utilizando un camión de reparto urbano modelo Volkswagen Delivery 6.160, con una capacidad útil, incluyendo la carrocería, de 3,881 kilogramos y un peso bruto vehicular (pbv) de 6 300 kilogramos; el vehículo cumple con la norma de emisiones Euro V, cuenta con tracción 4×2, motor Cummins ISF 2.8 SCR de 154 hp y 430 Nm de torque (Volkswagen Camiones y Buses México, “Delivery 6.160”). Como alternativas de carga se consideran cinco presentaciones de leche, cada una con un peso y una utilidad económica específica: leche entera 1 litro (2 kilogramos, \$ 5 MXN), leche light 1 litro (2 kilogramos, \$ 4 MXN), leche deslactosada 1 litro (2 kilogramos, \$ 6 MXN), leche entera 5 litros (8 kilogramos, \$ 15 MXN) y leche con chocolate 1 litro (3 kilogramos, \$ 7 MXN) (Opportimes, 2017). Este conjunto de productos corresponde a una selección representativa y acotada, definida con fines académicos e ilustrativos, que permite simplificar y facilitar la interpretación de resultados.

Se formuló un modelo como un problema de mochila 01, considerando cinco productos disponibles ($n = 5$) y una capacidad máxima del camión de 3 881 kilogramos (W), donde

Función objetivo:

$$U = \sum_{i=1}^n v_i x_i$$

Restricción de capacidad:

$$\sum_{i=1}^n w_i x_i \leq W, x_i \in \{0,1\}$$

Para resolver el modelo se utilizó programación dinámica (pd), implementada en Python mediante estructuras matriciales para un cálculo eficiente y reproducible. Se creó una tabla , inicializada con ceros, en la que cada celda repre-

senta la utilidad máxima considerando los primeros productos y una capacidad. La recurrencia de programación dinámica se define como:

$$DP[i][w] = \begin{cases} DP[i-1][w], & \text{si } w_i > w \\ \max(DP[i-1][w], DP[i-1][w-w_i] + v_i), & \text{si } w_i \leq w \end{cases}$$

$\in \{0,1\}$ indica si el producto se incluye (1) o no (0). La función objetivo es maximizar la utilidad total.

La solución óptima se encuentra en $DP[n][W]$ y mediante retroceso se determina qué productos serán incluidos en la carga.

El modelo se formula como un problema de mochila 0 1, en el cual cada producto se considera un ítem indivisible y la variable de decisión (x_i) toma valores binarios (0 o 1), para indicar la inclusión o exclusión de cada producto en la carga del camión, sin permitir la selección de múltiples unidades de una misma presentación. Este enfoque corresponde a un ejercicio académico de optimización, cuyo alcance se limita a ilustrar el funcionamiento del método de programación dinámica y el procedimiento de retroceso bajo una formulación clásica del problema de mochila, aun cuando en la práctica los productos podrían fraccionarse o cargarse en varias unidades. No obstante, el modelo permite maximizar la utilidad por camión, priorizar productos con mayor margen y demanda, reducir costos operativos y simular distintos escenarios logísticos considerando variaciones en la capacidad, restricciones operativas y demandas regionales.

Resultados

La optimización de la carga del camión se abordó mediante la resolución del problema de mochila 0 1 con programación dinámica. Los resultados muestran la relación entre la capacidad del vehículo y la utilidad máxima alcanzable, así como la composición óptima de la carga bajo distintos escenarios de capacidad, validando la aplicabilidad del modelo para el análisis de decisiones logísticas.

1.1 Optimización de la carga del camión

Se evaluó la selección de productos lácteos a ser cargados en un camión con capacidad máxima de 3 881 kilogramos, considerando la cantidad, el peso y la utilidad de cada producto (tabla 1).

Tabla 1.*Características de los productos considerados en el modelo*

Producto	Peso unitario (kg)	Utilidad (MXN)	Variable de decisión (0 1)
Leche entera 1 litro	1	2	0
Leche light 1 litro	2	4	1
Leche deslactosada 1 litro	2	6	1
Leche entera 5 litros	8	15	1
Leche con chocolate 1 litro	3	7	1

La tabla 1 muestra la selección de productos obtenida mediante el modelo de mochila 0 1. La solución óptima prioriza los productos con mayor contribución relativa por kilogramo, como la leche entera de 5 litros y la leche con chocolate de 1 litro, mientras que los productos con menor eficiencia no son seleccionados. En el escenario analizado, la combinación resultante genera una utilidad total de \$ 105 MXN con una carga de 51 kilogramos, lo que representa una fracción de la capacidad máxima del camión (3 881 kilogramos), reflejando que la maximización de la utilidad se alcanza sin necesidad de ocupar completamente la capacidad disponible.

1.2 Visualización de los resultados

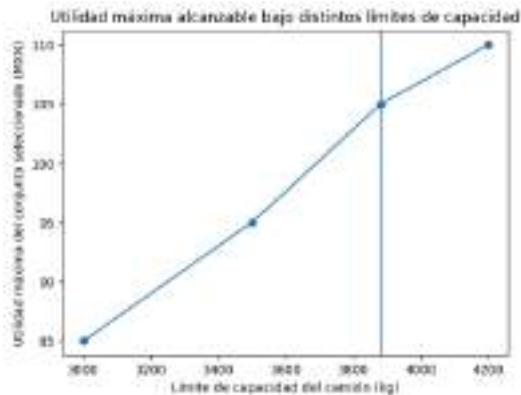
Los resultados, obtenidos mediante simulaciones en distintos escenarios de capacidad y demanda, evidenciaron que el modelo es flexible, reproducible y eficiente, ya que se adapta a variaciones sin afectar el rendimiento del cálculo, lo que confirma su aplicabilidad en la toma de decisiones logísticas urbanas. El análisis incluyó la relación entre la utilidad acumulada y la capacidad del camión, la distribución de productos y el proceso de retroceso, la curva de utilidad acumulada frente a la capacidad, la distribución porcentual de productos y la simulación de escenarios de capacidad, permitiendo una comprensión integral del comportamiento del modelo. A continuación, se detallan su impacto en la optimización de la carga y la rentabilidad del transporte.

1.2.1 Relación utilidad acumulada y capacidad del camión

Se generó un gráfico que muestra la selección parcial de productos lácteos a cargar en un camión, indicando las cantidades, el peso y la utilidad de cada uno, junto con los totales acumulados. Los resultados muestran que la utilidad total aumenta conforme se incorporan productos a la solución, lo que evidencia que el modelo prioriza aquellos con mayor rentabilidad, maximizando la ganancia sin exceder la capacidad del vehículo (figura 1).

Figura 1.

Utilidad máxima alcanzable bajo distintos límites de capacidad



Notas: Figura elaborada con Python.

La figura 1 muestra la utilidad máxima alcanzable bajo distintos límites de capacidad del camión. Se observa que los primeros incrementos de capacidad generan aumentos significativos en la utilidad total; sin embargo, una vez alcanzada la combinación óptima de productos, incrementos adicionales no producen mejoras proporcionales, dejando parte de la capacidad sin utilizar. Este comportamiento refleja la formulación del problema de mochila 0 1, en la cual se optimiza la selección de productos y no el llenado del vehículo. La gráfica permite identificar los productos más rentables por kilogramo y confirma la eficiencia de la combinación seleccionada, con un punto óptimo de \$ 105 MXN.

1.2.2 Distribución de productos y retroceso

La selección óptima de productos se obtuvo mediante programación dinámica y un procedimiento de retroceso, que permite reconstruir la solución óptima a partir de la matriz generada por el algoritmo e identificar explícitamente los productos que maximizan la utilidad sin exceder la capacidad del camión. El retroceso evalúa, para cada producto, si su inclusión mejora la utilidad total, dando lugar a una secuencia clara y verificable de decisiones, reflejada en la tabla 2.

Tabla 2.

Retroceso de la carga óptima

Paso	Producto	Selección (0 1)	Peso utilizado (kg)	Capacidad disponible (kg)
Inicio	—	—	0	3 881
1	Leche deslactosada 1 litro	1	2	3 879
2	Leche entera 5 litros	1	8	3 871
3	Leche con chocolate 1 litro	1	3	3 868

Como se observa en la tabla 2, el procedimiento de retroceso prioriza los productos que realizan mayor aporte a la utilidad considerando la capacidad disponible. Una vez alcanzada la combinación óptima, la inclusión de productos adicionales no incrementa la utilidad total, por lo que parte de la capacidad puede permanecer sin utilizar. En el escenario analizado, la solución final deja 2 kilogramos libres, lo que evidencia un uso eficiente de la capacidad y el funcionamiento consistente del modelo.

1.2.3 Utilidad máxima acumulada según la capacidad disponible

La relación entre la capacidad del camión y la utilidad máxima acumulada se presenta en la figura 2.

Figura 2.

Utilidad máxima acumulada según la capacidad disponible



Notas: Figura elaborada con Python.

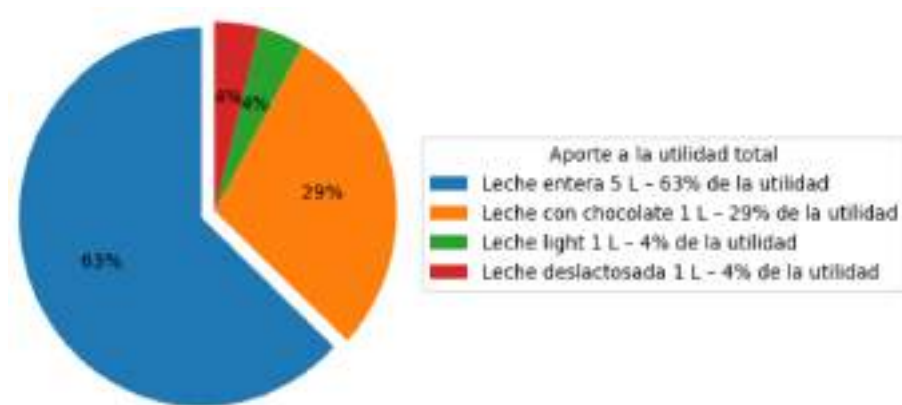
Como se observa en la figura 2, la utilidad máxima aumenta conforme la capacidad disponible permite la inclusión de productos adicionales en la solución óptima, hasta alcanzar aproximadamente \$ 60 MXN con una capacidad de 15 kilogramos. A partir de este punto, la curva se estabiliza, lo que indica que incrementos adicionales en la capacidad no generan mejoras en la utilidad total. Este comportamiento es consistente con la formulación del problema de mochila 0/1, en la cual la optimización prioriza la selección de productos con mayor rentabilidad por unidad de peso, sin que sea necesario utilizar completamente la capacidad del vehículo.

1.2.4 Distribución porcentual de productos

La distribución de la utilidad total aportada por los productos seleccionados en la solución óptima se presenta en la figura 3.

Figura 3.

Distribución porcentual de la utilidad aportada por los productos seleccionados



Notas: Figura elaborada con Phyton.

En la figura 3 se muestra que la utilidad total se concentra principalmente en la leche entera de 5 litros, que aporta aproximadamente 63% de la utilidad total, seguida por la leche con chocolate de un litro, con alrededor de 29%. Los demás productos presentan contribuciones menores, mientras que la leche entera de 1 litro no es seleccionada. Estos porcentajes dan cuenta de la contribución relativa de cada producto a la función objetivo y no de cantidades físicas. El resultado es consistente con la formulación del problema de mochila 0 1, en el cual se priorizan los productos con mayor aporte a la utilidad total bajo la restricción de capacidad.

1.3 Simulación de escenarios de capacidad

Se evaluaron distintos niveles de capacidad del camión con el fin de analizar la robustez del modelo (tabla 3).

Tabla 3.*Resultados del modelo bajo distintos escenarios de capacidad*

Escenario	Capacidad límite (kg)	Utilidad máxima (MXN)	Comentarios
1	3 500	95	Capacidad menor restringe la selección de algunos productos
2	3 881	105	Capacidad suficiente para la selección óptima de productos
3	4 200	105	Incremento de capacidad no genera mejoras adicionales en la utilidad
4	3 000	85	Capacidad reducida prioriza productos de mayor utilidad relativa

Nota: Elaborada por los autores con Python.

Los resultados muestran que la utilidad máxima aumenta conforme se incrementa la capacidad disponible, hasta alcanzar la combinación óptima de productos. En particular, al aumentar la capacidad de 3 000 a 3 881 kilogramos, la utilidad máxima se incrementa de \$ 85 a \$ 105 MXN. Sin embargo, una vez alcanzado este nivel, incrementos adicionales en la capacidad no generan mejoras en la utilidad total, lo que indica que la solución óptima ya ha sido alcanzada y que parte de la capacidad puede permanecer sin ser utilizada.

1.4 Implementación en Python y reproducibilidad

El algoritmo implementado en Python permite calcular de forma eficiente y reproducible la combinación óptima de productos, adaptándose a cambios en pesos, utilidades y capacidad del camión, lo que facilita su aplicación a distintos escenarios logísticos y la replicación de resultados. No obstante, el modelo tiene un alcance principalmente académico, ya que se basa en supuestos simplificadores del problema de mochila 0 1 y no incorpora factores operativos propios de la distribución urbana real, por lo que sus resultados deben interpretarse como una aproximación teórica.

1.5 Discusión

La distribución eficiente de productos perecederos constituye un reto central para la industria láctea (Ahumada y Villalobos, 2009). En este marco, el presente estudio aplica programación dinámica para resolver un problema de mochila en la optimización de la carga de un camión, identificando una combinación óptima de productos para una capacidad de 3 881 kilogramos.

Los resultados muestran que la utilidad máxima (\$ 105 MXN) se alcanza cuando la selección de productos con mayor relación utilidad-peso e incrementos adicionales en la capacidad no generan mejoras proporcionales, lo que confirma que la optimización económica no implica necesariamente la saturación del vehículo, en concordancia con la formulación del problema de mochila 0 1.

Desde una perspectiva metodológica, la formulación 0 1 simplifica la operación real al considerar productos indivisibles; sin embargo, permite analizar de forma clara la relación entre capacidad y utilidad y el funcionamiento del algoritmo. El estudio se alinea con trabajos previos sobre optimización logística y productos perecederos (Ahumada y Villalobos, 2009; Jacko, 2016; Kashyap et al., 2023; Li et al., 2020; Rinaldi et al., 2020) y con enfoques de planificación de operaciones (Heizer et al., 2017; Hillier y Lieberman, 2021).

Finalmente, aunque el modelo es flexible y reproducible, no incluye elementos operativos como rutas, tiempos ni restricciones de cadena de frío, por lo que futuras investigaciones podrían extender el enfoque para incluir flotas múltiples, métodos heurísticos y datos operativos reales.

Conclusiones

La programación dinámica demostró que el modelo de mochila 0/1 es viable, por lo que se la considera una herramienta académica que sirve para optimizar la carga de camiones bajo restricciones de capacidad. Ello permite identificar las combinaciones de productos que maximizan la utilidad total. El uso de Python facilitó la replicación y el análisis del proceso de optimización, mostrando la importancia de los productos con mayor rentabilidad, al tiempo que sugiere la posible presencia de capacidad ociosa en la solución óptima. No obstante, el modelo presenta limitaciones derivadas de los supuestos simplificadores y de la ausencia de restricciones operativas reales. Para investigaciones futuras se recomienda ampliar el enfoque a través de variantes del problema de mochila y de la integración con modelos de ruteo y costos logísticos.

Referencias

- Ahumada, O. y Villalobos, J. R. (2009). Aplicación de modelos de planificación en la cadena de suministro agroalimentaria: Una revisión [Application of planning models in the agri-food supply chain: A review]. *European Journal of Operational Research*, 196(1), 1–20. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2008.02.014>
- Heizer, J., Render, B. y Munson, C. (2017). Principios de la gestión de operaciones (10.^a ed.) [Principles of Operations Management]. Pearson.
- Hillier, F. S. y Lieberman, G. J. (2021). Introducción a la investigación de operaciones [Introduction to operations research]. McGraw-Hill.
- Jacko, P. (2016). Asignación de capacidad de recursos a competidores dinámicos estocásticos: problema de la mochila para artículos perecederos y heurística index-knapsack [Resource capacity allocation to stochastic dynamic competitors: Knapsack problem for perishable items and index-knapsack heuristic]. *Annals of Operations Research*, 241(1–2), 83–107. <https://doi.org/10.1007/s10479-013-1312-9>
- Kashyap, A., Shukla, O. J., Jha, B. K., Ramtiyal, B. y Soni, G. (2023). Impulso del crecimiento sostenible de la industria láctea mediante previsión de producción integrada con cadena de frío [Enhancing Sustainable Dairy Industry Growth through Cold-Supply-Chain-Integrated Production Forecasting]. *Sustainability*, 15(22), 16102. <https://doi.org/10.3390/su152216102>
- Li, Y., Chu, F., Côté, J.-F., Coelho, L. C. y Chu, C. (2020). Enrutamiento de producción de alimentos perecederos en múltiples plantas con consideración del embalaje [The multi-plant perishable food production routing with packaging consideration]. *International Journal of Production Economics*, 221, 107472. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2019.08.007>
- Martello, S. y Toth, P. (1990). Problemas de la mochila: algoritmos e implementaciones en computadora [Knapsack problems: algorithms and computer implementations]. John Wiley & Sons, Inc.

- Ndraha, N., Hsiao, H.-I., Vlajic, J., Yang, M.-F. y Lin, H.-T. V. (2018). Abuso de tiempo-temperatura en la cadena de frío alimentaria: revisión de problemas, desafíos y recomendaciones [Time-temperature abuse in the food cold chain: Review of issues, challenges, and recommendations]. *Food Control*, 89, 12–21. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2018.01.027>
- Rinaldi, M., Bottani, E., Solari, F. y Montanari, R. (2020). El problema de recolección de leche con restricción de tiempo: un estudio de optimización que integra simulación [The milk collection problem with time constraint: An optimization study integrating simulation]. En *Proceedings of the International Food Operations and Processing Simulation Workshop* (pp. 7–13). <https://doi.org/10.46354/i3m.2020.foodops.002>
- Taha, H. A. (2020). *Investigación de operaciones: una introducción* (10.^a ed.) [Operations Research: An Introduction]. Pearson.
- Zhong, X., Wen, Z., Wei, L., Xu, W., Zhang, Y., Yu, L. y Xue, L. (2022). Análisis de factores que influyen en el costo de la logística de cadena de frío de productos lácteos [Analysis of Influencing Factors of Cold Chain Logistics Cost of Dairy Products]. *Industrial Engineering and Innovation Management*, 5(2), 1–8. <https://doi.org/10.23977/ieim.2022.050201>

Derechos de Autor© 2026 Ávila Soler, Enrique; Ramírez Barraza, Brenda Aracely; Ayllón Benítez, Julio César; González Sosa, Jesús Vicente.



Este texto está protegido por una licencia Creative Commons 4.0, Attribution 4.0 International. Usted es libre para Compartir, copiar y redistribuir el material en cualquier medio o formato y adaptar el documento, remezclar, transformar y crear a partir del material— para cualquier propósito, incluso para fines comerciales, siempre que cumpla la condición de: Atribución: Usted debe dar crédito a la obra original de manera adecuada, proporcionar un enlace a la licencia, e indicar si se han realizado cambios. Puede hacerlo en cualquier forma razonable, pero no de forma tal que sugiera que tiene el apoyo del licenciante o lo recibe por el uso que hace de la obra.

DISEÑO Y VALIDACIÓN PRELIMINAR DE UN SOPORTE DE RODILLA PERSONALIZADO PARA REHABILITACIÓN FUNCIONAL

Design and preliminary validation of a personalized knee support for functional rehabilitation

Diego Alejandro Soto Vega¹, Julio Andrés Nevárez Padilla², Avner Kalid Parada Benítez³, Héctor Alfredo López-Aguilar⁴

Resumen

La tendinitis rotuliana es una lesión frecuente en deportistas de alto impacto y representa un desafío en los procesos de rehabilitación funcional. El presente estudio corresponde a un proyecto experimental de desarrollo tecnológico con validación piloto pre-post, cuyo objetivo fue diseñar y evaluar preliminarmente un soporte de rodilla personalizado que integra termoterapia y vibración controladas electrónicamente. La muestra estuvo conformada por un sujeto masculino, con antecedentes de tendinitis rotuliana, quien practica deporte de impacto y fue seleccionado siguiendo criterios de inclusión específicos. El dispositivo se diseñó empleando escaneo tridimensional y modelado paramétrico e incorporó un sistema embebido basado en un microcontrolador ESP32 con control inalámbrico vía Bluetooth.

Las variables evaluadas incluyeron ángulo de flexión y rotación de la rodilla durante la marcha, estimación indirecta de la carga patelofemoral, temperatura superficial alcanzada por el sistema térmico, funcionamiento del módulo de vibración y percepción de usabilidad de la interfaz móvil. El método de análisis consistió en la comparación descriptiva pre-post del patrón de marcha, medición eléctrica y térmica controlada del sistema, y análisis porcentual de res-

¹ Egresado de la carrera de Electromédica de la Universidad La Salle Chihuahua. ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-9157-7287>

² Egresado de la carrera de Electromédica de la Universidad La Salle Chihuahua.

³ Doctor en Educación. Profesor-investigador de la Universidad la Salle Chihuahua. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0606-3964>

⁴ Doctor en Ciencia y Tecnología Ambiental. Adscrito a la Universidad Autónoma de Chihuahua.

Facultad de Ciencias Agrotecnológicas, Coordinador de investigación de la Universidad la Salle Chihuahua. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7324-1700>

Correo electrónico: hlopeza@uach.mx

Recibido: 09/12/2025 | Aceptado: 10/03/2026 | Publicado: 15/06/2026

Los autores declaran no tener ningún conflicto de interés. La investigación fue financiada con recursos de los autores.

*Autor de correspondencia

DOI: [10.56643/rcia.v5i1.238](https://doi.org/10.56643/rcia.v5i1.238)

Como citar este artículo: Soto Vega, D. A., Nevárez Padilla, J. A., Parada Benítez, A. K. y López Aguilar, H. A. (2026). Diseño y validación preliminar de un soporte de rodilla personalizado para rehabilitación funcional. Revista Científica de Ingenierías y Arquitectura. 5(1). 22-39. <https://doi.org/10.56643/rcia.v5i1.238>

puestas en pruebas de usabilidad. Los resultados mostraron una reducción estimada de 6% en la carga rotuliana, estabilidad térmica dentro de rangos terapéuticos seguros (38-45°C) y adecuada aceptación funcional del dispositivo. Aunque los hallazgos corresponden a una validación preliminar exploratoria, el prototipo evidencia potencial como solución ortésica inteligente para la rehabilitación personalizada de la rodilla.

Palabras clave: Rodilla; Tendinitis rotuliana; Órtesis personalizada; Termoterapia; Vibración terapéutica; Rehabilitación biomecánica; ESP32

Abstract

Patellar tendinitis is a common injury among high-impact athletes and represents a significant challenge in functional rehabilitation. This study followed an experimental technological development design with a pilot pre-post validation approach, aiming to design and preliminarily evaluate a personalized knee support integrating controlled thermotherapy and vibratory stimulation. The sample consisted of one male participant with a history of patellar tendinitis and engagement in high-impact sports, selected according to predefined inclusion criteria. The device was developed through three-dimensional scanning and parametric modeling, incorporating an embedded system based on an ESP32 microcontroller with Bluetooth connectivity for mobile control. The evaluated variables included knee flexion and rotation angles during gait, indirect estimation of patellofemoral load, surface temperature achieved by the thermal module, operational performance of the vibration system, and perceived usability of the mobile interface. The analysis method involved descriptive pre-post comparison of gait patterns, controlled electrical and thermal measurements of the system, and percentage-based analysis of usability testing responses. Results showed an estimated 6% reduction in patellar load, stable thermal regulation within clinically safe ranges (38–45 °C), and favorable functional acceptance. Although findings correspond to a preliminary exploratory validation, the prototype demonstrates potential as an intelligent orthotic solution for personalized knee rehabilitation.

Keywords: Knee; Patellar tendinitis; Personalized orthosis; Thermotherapy; Therapeutic vibration; Biomechanical rehabilitation; ESP32

Introducción

Realizar deportes conlleva un alto riesgo de lesiones físicas. De acuerdo con Fuller (2006), en el ámbito deportivo se considera lesión a cualquier molestia física experimentada por un deportista que resulte del entrenamiento o la práctica de un deporte, sin importar si requiere atención médica o pérdida de tiempo en la actividad deportiva. En México se ha encontrado que las lesiones más comunes son las de los tendones de rodilla, tobillo y hombro (Conade, 2017).

La tendinitis rotuliana es una de las afecciones más comunes en el ámbito deportivo, presentándose particularmente en atletas que practican disciplinas que implican saltos repetitivos y una carga constante sobre la rodilla. Esta condición afecta sobre todo a los tendones y se ha asociado con procesos de sobrecarga funcional, lo que sugiere que una exposición prolongada a esfuerzos mecánicos intensos puede ser un factor determinante en el desarrollo de tendinopatías. Asimismo, de acuerdo con Bonilla (2016) se han identificado otros factores intrínsecos que pueden ocasionarla, como la falta de flexibilidad de los músculos isquiotibiales y los cuádriceps, el aumento en el entrenamiento con peso, el incremento de masa corporal, la discrepancia de miembros inferiores asociada a ejercicios mal realizados como lo son subluxaciones o inmovilidades causadas por atrofas musculares, entre otros.

Por su parte, Rishiraj et al. (2025) encontraron que el uso prolongado de rodilleras funcionales no muestra efectos adversos en el rendimiento de atletas sanos e incluso puede potenciar sus capacidades físicas, mejorando aspectos como la potencia, la aceleración, la velocidad y la agilidad de las extremidades inferiores. Si bien en el caso examinado las mejoras no fueron estadísticamente significativas, el estudio sugiere que el uso continuo de rodilleras funcionales podría ser beneficioso para la recuperación física sin interferir en el rendimiento deportivo.

Marco teórico

Diversos estudios han documentado el desarrollo de órtesis y exoesqueletos activos de rodilla orientados a la asistencia durante la marcha y la rehabilitación funcional. Estos sistemas incorporan actuadores eléctricos, neumáticos o hidráulicos, así como algoritmos de control basados en posición, par o impedancia, con el propósito de suministrar torque asistivo de manera controlada y sincronizada con el ciclo de la marcha (Nagano et al., 2021; Trivedi y Joshi,

2024). Dicho enfoque permite modular la interacción humano-dispositivo y optimizar el soporte mecánico según las demandas biomecánicas del usuario.

En el ámbito de las órtesis inteligentes portátiles se ha reportado la integración de actuadores de aleación con memoria de forma (Shape Memory Alloys, sma), sensores de presión y estructuras de conexión ligeras, lo que favorece la asistencia durante la fase de balanceo sin comprometer la flexibilidad ni incrementar significativamente el peso del dispositivo (Moslemi et al., 2020). Estas soluciones buscan mantener un equilibrio entre soporte mecánico, confort y eficiencia energética. Además, la incorporación de tecnologías de escaneo tridimensional e impresión 3D permitió desarrollar carcasas y articulaciones completamente personalizadas, que facilitan iteraciones de diseño rápidas y la fabricación de órtesis inteligentes de bajo costo con sistemas de retroalimentación integrados (Kahtan et al., 2025; Popișter et al., 2024). Las revisiones recientes destacan, asimismo, el uso de metamateriales auxéticos, caracterizados por estructuras uniformes y libres de arrugas, a las que se agregan sensores inteligentes para el monitoreo en tiempo real del movimiento y la carga articular; ello hace posible implementar estrategias de rehabilitación individualizadas, basadas en datos objetivos (Popișter et al., 2024; Moroni y Majewska, 2025).

Siguiendo a Arenas et al. (2006) se recomienda aplicar termoterapia como medio terapéutico con efectos antiinflamatorios, antiespasmódicos y analgésicos. Estos investigadores encontraron que las aplicaciones que emplean almohadillas eléctricas pueden ser de uso general, regional o local, con una temperatura de entre 38-45°C y una exposición recomendada de 15 a 20 minutos por sesión, no superando las dos sesiones diarias. La aplicación de calor superficial de entre 38°C y 45°C produce vasodilatación local, aumento del metabolismo tisular y disminución del espasmo muscular, sin comprometer la integridad cutánea cuando se controla adecuadamente la exposición. De igual manera, Arcas (2004) menciona que la termoterapia por medio de almohadillas eléctricas puede ser de gran ayuda para la rehabilitación física y el fortalecimiento muscular. Asimismo, se ha encontrado que la vibración mecánica localizada muestra efectos positivos en la modulación del dolor mediante mecanismos neuromusculares asociados al control inhibitorio segmentario (Takhakh et al., 2013).

En un estudio sobre el uso de rodilleras de descarga en pacientes con osteoartritis medial, Rogoschin et al. (2025) observaron una mejora significativa en la función articular y en la reducción del dolor, especialmente al caminar por pendientes pronunciadas y subir escaleras. Encontraron que las rodilleras de

descarga no sólo alivian el dolor, sino que también mejoran la movilidad y el rendimiento físico, siendo una opción viable en el tratamiento conservador de la tendinitis de rodilla. Por su parte, Moran (2022) recomienda brindar terapia de calor, vibración, crioterapia, electroestimulación transcutánea y el uso de rodilleras de forma alternada para obtener mejores resultados en la rehabilitación y propiciar el fortalecimiento muscular tras una tendinitis o artrosis. Sin embargo, en el mercado aún no existe un producto o proyecto que combine estos tipos de terapias de forma unitaria. La brecha identificada radica en la ausencia de dispositivos ortésicos personalizados que integren simultáneamente control térmico, vibración terapéutica y monitoreo electrónico accesible.

Por ello es importante desarrollar investigaciones que favorezcan la rehabilitación de pacientes que viven con estas afecciones, para mejorar su calidad de vida y su rendimiento deportivo.

Planteamiento del problema

A pesar de la evidencia clínica que respalda el uso de termoterapia, vibración y ortesis funcionales en la rehabilitación de la tendinitis rotuliana, actualmente no existen dispositivos accesibles que integren de manera personalizada y controlada estas terapias en una sola solución tecnológica. En deportistas jóvenes con antecedentes de lesiones de rodilla, la falta de dispositivos inteligentes personalizados limita la adherencia terapéutica y la optimización de cargas articulares. Por lo que surge la necesidad de desarrollar y validar un soporte de rodilla personalizado que integre control térmico y vibratorio mediante electrónica embebida.

Objetivo general

Desarrollar y validar preliminarmente un soporte de rodilla personalizado que integra termoterapia y vibración controlada electrónicamente para rehabilitación funcional.

Objetivos específicos

- Diseñar el soporte mediante escaneo 3D y modelado paramétrico.
- Integrar sistema embebido basado en ESP32.
- Evaluar funcionamiento térmico y vibratorio.
- Analizar preliminarmente efectos biomecánicos.
- Evaluar usabilidad de la interfaz móvil.

Metodología

Diseño del estudio

La presente investigación adopta un enfoque cualitativo y experimental. Su propósito es diseñar, desarrollar y evaluar un soporte de rodilla inteligente orientado a la rehabilitación y prevención de lesiones en deportistas que practican disciplinas de alto impacto, que proporcione termoterapia y terapia de vibración. A continuación, se presenta la metodología utilizada.

Participante y criterios de inclusión

Se delimitó una población objetivo compuesta por hombres de 18 a 27 años, cuyo peso estuviera en el rango de 65 a 90 kilogramos, estatura promedio de 1.80 metros, con antecedentes de lesiones en los miembros inferiores, específicamente meniscopatía o tendinitis. Además, se consideró como criterio de inclusión la práctica activa o interrumpida de deportes de impacto como halterofilia, powerlifting o levantamiento de pesas, debido a la alta prevalencia de lesiones músculo-esqueléticas en esta población (Conade, 2018). Partiendo de esta delimitación, se seleccionó a un único sujeto de prueba, quien cumplía con las características descritas.

Desarrollo del prototipo

Para garantizar el ajuste anatómico preciso, se realizó un escaneo tridimensional del miembro afectado del sujeto, utilizando el software VXelements de Creaform. A partir de éste se desarrolló el diseño personalizado del soporte, empleando la plataforma de modelado paramétrico OnShape. El mismo se imprimió con Ácido Poliláctico (pla), utilizando la impresora Bambu Lab P1S. El diseño personalizado permitió obtener un producto elaborado a medida de manera individual, el cual se adapta a las medidas y formas de la extremidad. El diseño tuvo como base e inspiración distintos diseños previos realizados por diversas empresas enfocadas en la rehabilitación. No obstante, se trata de un diseño de desarrollo propio. Se encontró que el uso de OnShape proporciona la alternativa más viable para facilitar el diseño.

El prototipo incorpora un sistema dual de termoterapia y terapia de vibración, controlado mediante un microcontrolador ESP32, elegido por su alta eficiencia

energética, su conectividad inalámbrica (Wi-Fi y Bluetooth) y su bajo costo (Sánchez, 2019). El sistema fue programado para interactuar con una interfaz de usuario desarrollada en App Inventor, herramienta del Massachusetts Institute of Technology (mit) que permite el control desde dispositivos Android.

Para la emisión de calor se empleó un módulo Peltier de 40x40 mm, con requerimientos de alimentación entre 5 y 12 V DC, temperatura máxima de 138°C y una vida útil estimada de 200 000 horas de uso moderado (Hebei, 2014). El módulo de vibración fue compuesto por micromotores cilíndricos de 3.5 mm de diámetro y 5 V de operación, seleccionados por su tamaño compacto y su bajo consumo energético.

Se diseñó e imprimió una tarjeta de circuito personalizada para el control de ambos sistemas, sobre la cual se realizaron pruebas eléctricas de continuidad, sobrecorriente (hasta 220 mA) y funcionamiento prolongado.

La interfaz desarrollada posibilita que el usuario active de forma independiente los sistemas de termoterapia y vibración, que module la temperatura deseada y defina un tiempo de terapia programado, tras el cual el sistema se apaga automáticamente. Esta funcionalidad busca facilitar su uso durante rutinas de recuperación y mejorar la adherencia al tratamiento terapéutico no invasivo.

Resultados y discusiones

1.1 Diseño y validación ergonómica del soporte

Los primeros prototipos del soporte de rodilla, desarrollados sin personalización anatómica, resultaron insatisfactorios en cuanto a comodidad y ergonomía. El sujeto de prueba reportó incomodidad y falta de ajuste, lo que comprometía la funcionalidad del diseño. En respuesta a estas observaciones, se procedió a realizar un escaneo tridimensional de la rodilla del participante (figura 1), con el objetivo de generar un diseño completamente personalizado. Posteriormente, se imprimió el nuevo modelo y se realizaron pruebas preliminares en el usuario. Los resultados fueron favorables: el participante manifestó de forma verbal su conformidad total con el ajuste y la comodidad del dispositivo. Este nuevo diseño permitió su uso continuo sin molestias, lo cual representa un avance significativo respecto del prototipo inicial.

Figura 1.

Modelado 3D de la rodilla derecha del primer sujeto de pruebas, se escaneo por medio de Creaform, procesado en VXelement



1.2 Evaluación biomecánica mediante análisis de marcha

Una vez validada la ergonomía del soporte, se llevó a cabo un análisis de marcha para evaluar su impacto sobre la cinemática de la extremidad inferior. Los resultados indicaron una variación mínima en los patrones de movimiento, con una diferencia de aproximadamente 6° en el ángulo de flexión y 15° en la rotación de la rodilla durante la fase de apoyo. Estas variaciones fueron interpretadas como positivas, ya que se mantuvo la movilidad articular funcional sin restricciones importantes.

Los hallazgos obtenidos son consistentes con los postulados de Rogoschin (2025), quien señala que las rodilleras de descarga bien adaptadas pueden mejorar significativamente la movilidad articular y contribuir a una mayor eficiencia biomecánica durante el movimiento (figura 2).

A diferencia de los dispositivos comerciales mencionados, el presente prototipo incorpora, además, estimulación vibratoria y control térmico activo, lo cual podría potenciar los efectos analgésicos y funcionales descritos en la literatura.

Figura 2.

Diseño CAD de ambas partes del soporte de rodilla (superior e inferior), desarrollada en OnShape y reestructurado en SolidWorks



1.3 Evaluación de materiales y distribución de cargas

Durante las pruebas de resistencia mecánica del material utilizado en la fabricación del prototipo inicial, se identificó que el ácido poliláctico (pla) no es la opción más adecuada para aplicaciones que impliquen altas exigencias mecánicas, como sucede en deportes de impacto. El material mostró alta vulnerabilidad a los impactos y esfuerzos de flexión, lo cual compromete su integridad estructural bajo condiciones reales de uso, como las que se presentan en actividades como la halterofilia. Ante esta limitación, se propone la evaluación de materiales alternativos con mayor resistencia mecánica y durabilidad, tales como el Polietileno Tereftalato de Glicol (petg) y el Acrilonitrilo Butadieno Estireno (abs), los cuales han demostrado mejor desempeño en aplicaciones funcionales sometidas a cargas dinámicas.

Por otro lado, los resultados de las pruebas de carga realizadas durante el uso del soporte indicaron que la distribución del peso sobre la articulación es favorable. Se observó una reducción de 6 % en la fuerza ejercida sobre la rótula al utilizar el dispositivo, lo que respalda la hipótesis de diseño orientada a disminuir el impacto mecánico sobre la articulación patelofemoral. Este hallazgo representa un avance relevante en el desarrollo de dispositivos ortésicos de descarga para deportistas con antecedentes de lesión articular.

1.4 Sistema de vibración

Respaldao las afirmaciones de Moran (2022), las terapias de vibración, combinadas con termoterapia y distribución de cargas facilitan la recuperación e incluso detienen el proceso de lesión de personas afectadas por tendinitis o meniscopatía. El sistema de vibración diseñado para que funcione de manera tanto intermitente como ininterrumpido y se acciona por medio de un control on/off, lo cual, además de favorecer el proceso de recuperación, relaja la capa superficial muscular de la rodilla y no tiene un impacto negativo sobre la rodilla. Cabe señalar que un tratamiento de vibración mal realizado y en zonas no adecuadas puede llegar a perjudicar la recuperación e integridad de la rodilla y comprometer la extremidad.

1.5 Sistema de termoterapia

El sistema de termoterapia se implementó mediante el uso de módulos Peltier como elementos activos de transferencia térmica. La selección de este componente termoeléctrico resultó adecuada. En este sentido, los ensayos de fiabilidad eléctrica confirmaron que los módulos cumplen con los requerimientos funcionales del proyecto de investigación. Durante las pruebas, los módulos fueron alimentados a un voltaje constante de 5.03 V y una corriente de 0.25 A, operando de forma continua durante dos horas y 30 minutos sin presentar fallas, caídas de tensión ni variaciones térmicas fuera de los rangos establecidos. En condiciones sin control on/off, se registró una temperatura máxima de 144.3°C, lo cual confirma la alta capacidad térmica del componente. Tras integrar el sistema de control térmico a través de la interfaz desarrollada, fue posible modular la temperatura de forma estable y precisa, ajustándola a los valores predefinidos por el usuario, lo que mejoró la seguridad y eficiencia del tratamiento térmico.

Un factor clave en la elección del módulo fue su tamaño compacto (40 x 40 mm), que permite su incorporación sin comprometer la ergonomía del dispositivo. Las pruebas de movilidad demostraron que el prototipo mantiene su flexibilidad y comodidad, sin interferir con los ángulos de flexión de la articulación durante su uso.

El diseño del sistema eléctrico de control fue realizado en el software Proteus, especializado en la creación de esquemas eléctricos y circuitos impresos (pcb). En la figura 3 se presenta el diagrama esquemático de la placa desarrollada, que

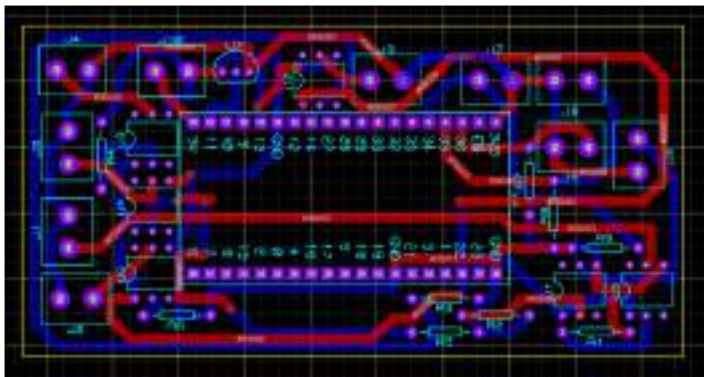
incluye los componentes necesarios para la activación, modulación térmica y monitoreo del sistema. De acuerdo con Arenas (2006), la aplicación adecuada de calor localizado, bajo condiciones controladas de tiempo y temperatura, favorece la relajación muscular, acelera procesos de rehabilitación y previene la aparición de nuevas lesiones en tejidos blandos.

1.6 Interfaz para el usuario

La interfaz de usuario desarrollada para controlar el sistema de termoterapia y vibración fue evaluada como funcional y eficaz en esta etapa de la investigación. La comunicación entre la interfaz (diseñada en App Inventor para el sistema operativo Android) y el microcontrolador ESP32 mediante Bluetooth mostró un desempeño positivo, con un tiempo promedio de respuesta de aproximadamente 1.5 segundos. Aunque esta latencia es perceptible, se considera optimizable en futuras iteraciones del software, pues la investigación aún se encuentra en su fase de prototipo alfa (versión 2.1).

Figura 3.

Diseño realizado en el software Proteus del circuito impreso (PCB) usado para el control del aditamento terapéutico



El diseño de la interfaz (figura 4) representó un reto significativo, ya que se buscó una disposición intuitiva y accesible de los elementos operativos (botones, campos de entrada y controladores de tiempo y temperatura). Para validar la usabilidad, se realizaron pruebas con 25 usuarios voluntarios, encontrándose los siguientes resultados:

- 22 usuarios (88 %) lograron establecer conexión sin inconvenientes, comprendiendo correctamente el funcionamiento de la aplicación.
- 2 usuarios (8 %) no lograron establecer conexión inicial con el dispositivo.
- 3 usuarios (12 %) reportaron pérdida de la conexión Bluetooth al alejarse del rango de operación óptimo.
- 1 usuario (4 %) expresó inconformidad por la exclusividad para Android y sugirió que se desarrollara una versión compatible con el sistema operativo iOS.

El resultado preliminar de la interfaz se presenta en la figura 4.

Figura 4.

Captura de pantalla de la version 1.3 de la interfaz de control, diseñada en el sitio web AppInventor



AppInventor

Los resultados obtenidos indican que la interfaz cumple su función principal de permitir el control independiente de los módulos de calor y vibración, como también la configuración de parámetros de temperatura y tiempo de uso. La facilidad de uso percibida por la mayoría de los participantes respalda la viabilidad de la solución digital propuesta y sugiere un alto potencial de adopción con ajustes menores de accesibilidad y compatibilidad multiplataforma.

Los resultados corresponden a una validación preliminar exploratoria en fase alfa del prototipo, sin pretensión de generalización estadística.

Conclusiones

El desarrollo del soporte de rodilla con aditamento terapéutico representa un avance significativo en la búsqueda de soluciones accesibles, funcionales y adaptables para el apoyo en procesos de rehabilitación física. El prototipo integra tecnologías de fabricación digital, elementos electrónicos terapéuticos y un diseño ergonómico que responde a necesidades reales de usuarios que requieren alivio del dolor, estabilidad articular y apoyo durante la recuperación.

Las pruebas preliminares demostraron que el dispositivo es capaz de ofrecer compresión, calor y vibraciones controladas, elementos comúnmente utilizados en terapias musculoesqueléticas. La estructura del soporte mostró ser estable y cómoda durante los ensayos iniciales, lo que confirma la viabilidad de combinar técnicas de impresión 3D y componentes comerciales en un producto funcional. Asimismo, el proyecto evidencia la importancia del trabajo interdisciplinario entre ingeniería biomédica, diseño industrial y fabricación digital, que posibilita la creación de soluciones innovadoras con tiempos de desarrollo reducidos y costos accesibles. De igual manera, el proceso hizo posible que se identificarán áreas clave de mejora que servirán de base para versiones futuras del dispositivo. En conclusión, este trabajo demuestra que es posible desarrollar tecnologías terapéuticas emergentes desde entornos académicos utilizando herramientas modernas, metodologías iterativas y un enfoque centrado en el usuario. Con las mejoras propuestas, el soporte de rodilla tiene el potencial de convertirse en una herramienta útil para fisioterapeutas, deportistas y personas en rehabilitación, contribuyendo al bienestar y calidad de vida de los usuarios. Los hallazgos encontrados en esta etapa corresponden a la validación funcional preliminar. Las proyecciones clínicas y aplicaciones terapéuticas requieren estudios en una muestra ampliada y protocolos controlados.

Limitaciones y trabajos futuros

A pesar de los resultados prometedores del prototipo, el desarrollo del soporte de rodilla con aditamento terapéutico presenta diversas limitaciones que deben atenderse en futuras etapas de investigación. En primer lugar, el dispositivo fue evaluado únicamente en un número reducido de usuarios, por lo que los hallazgos no pueden generalizarse a una población más amplia ni representar

variabilidad antropométrica significativa. Asimismo, la duración de las pruebas funcionales fue restringida, lo que impide determinar la resistencia del prototipo frente al uso prolongado, la actividad física intensa o entornos de rehabilitación real.

En cuanto al diseño, aunque los materiales empleados permiten una fabricación rápida y accesible, aún es necesario estudiar su biocompatibilidad, flexibilidad y comportamiento mecánico bajo cargas repetitivas. Del mismo modo, la integración de elementos térmicos y de vibración funcionó adecuadamente en pruebas controladas; sin embargo, se requiere optimizar el consumo energético, la disipación de calor y la estabilidad de los sistemas electrónicos durante sesiones terapéuticas más largas.

Respecto a la interfaz de control, su funcionalidad resulta suficiente para las pruebas iniciales, pero todavía necesita mejoras en usabilidad, seguridad de operación y compatibilidad con dispositivos móviles. También es necesario desarrollar un sistema de retroalimentación que permita monitorear parámetros fisiológicos en tiempo real, intensidad de tratamiento y registros de uso para apoyar la toma de decisiones clínicas.

Como trabajos futuros se plantean los siguientes:

- Validar el prototipo con una muestra más amplia y diversa de usuarios.
- Evaluar su desempeño en escenarios de rehabilitación profesional.
- Optimizar el diseño mediante materiales más ergonómicos y resistentes.
- Reducir el tamaño y el peso de los componentes electrónicos.
- Integrar sensores biométricos que permitan personalizar el tratamiento.
- Desarrollar una aplicación móvil multiplataforma que centralice el control del dispositivo y el registro de datos.

Referencias

- Arcas, P. (2004). Manual de fisioterapia. Módulo I. Generalidades. Editorial mad.
- Arenas, A., Fernández, L. E. A. y Ruiz, T. U. (2006). Utilización de la termoterapia en el ámbito deportivo. E-balonmano.com Journal Sports Science, 2(1), 29–36. https://dehesa.unex.es/bitstream/10662/6257/1/1885-7019_2_1_29.pdf
- Bonilla Ugalde, P., Briceño, M. y Navarrete, C. G. (2016). Tendinitis rotuliana (rodilla del saltador) [Tendinopathy of the patella (jumper's knee)]. Revista Médica de Costa Rica y Centroamérica, 83, 519–523. <https://www.medigraphic.com/pdfs/revmedcoscen/rmc-2016/rmc163s.pdf>
- Comisión Nacional de Cultura Física y Deporte. (2018, febrero). Lesiones deportivas, un obstáculo a vencer. Gobierno de México. <https://www.gob.mx/conade/prensa/lesiones-deportivas-un-obstaculo-a-vencer>
- Fuller, C. W., Ekstrand, J., Junge, A., Andersen, T. E., Bahr, R., Dvorak, J., Häggglund, M., McCrory, P. y Meeuwisse, W. H. (2006). Declaración de consenso sobre definiciones de lesión y procedimientos de recogida de datos en estudios de lesiones en el fútbol [Consensus statement on injury definitions and data collection procedures in studies of football (soccer) injuries]. Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports, 16(2), 83–92. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0838.2006.00528.x>
- Hebei I.T. (Shanghai) Co., Ltd. (2018). TEC1-12706 [Hoja técnica]. <https://peltier-modules.com/peltier.datasheet/TEC1-12706.pdf>
- Kahtan, Y., Kubba, A., Hasan, H., Ismail, M. y Mohammed, N. (2025). Mejora de la movilidad con órtesis de rodilla: consideraciones de diseño y necesidades del paciente mediante un estudio de caso [Enhancing mobility with knee orthoses: Design considerations and patient needs through case study]. Advances in Science and Technology Research Journal, 19(6), 108–120. <https://doi.org/10.12913/22998624/202883>
- Morán Lorenzo, J. C. (2022). Cuidados de enfermería en pacientes intervenidos de artrosis de rodilla [Trabajo académico].

- Moroni, R. y Majewska, K. (2025). Innovaciones en dispositivos ortésicos: fabricación aditiva, materiales auxéticos y sensores inteligentes para una rehabilitación mejorada [Innovations in orthotic devices: Additive manufacturing, auxetic materials and smart sensors for enhanced rehabilitation]. *Applied Sciences*, 15(18), 10167. <https://doi.org/10.3390/app151810167>
- Moslemi, N., Gohari, S., Mozafari, F., Zardian, M., Burvill, C., Yahya, M. y Ayob, A. (2020). Nueva férula de rodilla asistiva inteligente incorporando un actuador de alambre de aleación con memoria de forma [A novel smart assistive knee brace incorporated with shape memory alloy wire actuator]. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 31(13), 1543–1556. <https://doi.org/10.1177/1045389X20922911>
- Nagano, H., Sparrow, W. y Begg, R. (2021). Avances en dispositivos ortopédicos multifunción inteligentes para la prevención y tratamiento de la artrosis de rodilla: una revisión de la literatura [Developments in smart multi-function gait assistive devices for the prevention and treatment of knee osteoarthritis—A literature review]. *Applied Sciences*, 11(22), 10947. <https://doi.org/10.3390/app112210947>
- Popișter, F., Dragomir, M., Ciudin, P. y Goia, H. (2024). Potenciando la rehabilitación: diseño y análisis estructural de una ortesis inteligente de bajo costo impresa en 3D [Empowering rehabilitation: Design and structural analysis of a low-cost 3D-printed smart orthosis]. *Polymers*, 16(10), 1303. <https://doi.org/10.3390/polym16101303>
- Rishiraj, N., Taunton, J. E., Regan, W., Woollard, R., Lloyd-Smith, R. y Niven, B. (2025). Efectos sobre el rendimiento de la retirada y el uso prolongado de férulas funcionales de rodilla en atletas masculinos sanos: potencia, aceleración, velocidad y agilidad de la extremidad inferior [Performance effects of functional knee brace removal and prolonged use in healthy male athletes: Lower extremity power, acceleration, speed, and agility]. *Journal of Science and Medicine in Sport*, 28(6), 506–511. <https://doi.org/10.1016/j.jsams.2025.01.004>
- Rogoschin, J., Preiser, T., Hansen, L., Potthast, W. y Komnik, I. (2025). Efectos cinéticos de las férulas descargadoras unicompilares en la artrosis medial de rodilla: un estudio longitudinal de la carga articular durante la marcha en nivel, escaleras y pendiente [Kinetic effects of unicompartmental unloader

braces in medial knee osteoarthritis: A longitudinal study of joint load during level, stair, and slope walking]. *Journal of Biomechanics*. <https://doi.org/10.1016/j.jbiomech.2025.112593>

Sánchez Sánchez, J. A. (2023). Diseño e implementación de una app de monitorización de taquillas a través del módulo ESP32 y las tecnologías Wi-Fi, BLE y RFID [Trabajo de titulación].

Takhakh, A. M., Kadhim, F. M. y Chiad, J. S. (2013, noviembre). Análisis y medición de vibraciones en KAFO (órtesis rodilla-tobillo-pie) de tipo metálico y plástico [Vibration analysis and measurement in knee ankle foot orthosis for both metal and plastic KAFO type]. En ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition (VO3BT03A050). American Society of Mechanical Engineers.

Trivedi, U. y Joshi, A. (2024). Avances en tecnología de férulas activas para la rodilla: una revisión de análisis de la marcha, accionamiento y aplicaciones de control [Advances in active knee brace technology: A review of gait analysis, actuation, and control applications]. *Heliyon*, 10, e26060. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e26060>

Derechos de Autor© 2026 Soto Vega, Diego Alejandro; Nevárez Padilla, Julio Andrés; Parada Benítez, Avner Kalid; López-Aguilar, Héctor Alfredo.



Este texto está protegido por una licencia Creative Commons 4.0, Attribution 4.0 International. Usted es libre para Compartir, copiar y redistribuir el material en cualquier medio o formato y adaptar el documento, remezclar, transformar y crear a partir del material— para cualquier propósito, incluso para fines comerciales, siempre que cumpla la condición de: Atribución: Usted debe dar crédito a la obra original de manera adecuada, proporcionar un enlace a la licencia, e indicar si se han realizado cambios. Puede hacerlo en cualquier forma razonable, pero no de forma tal que sugiera que tiene el apoyo del licenciante o lo recibe por el uso que hace de la obra.

INNOVACIONES TECNOLÓGICAS PARA INCREMENTAR LA CADENA DE VALOR DE LA PAPA AGROECOLÓGICA EN LOS PESCADOS, VERACRUZ

Technological Innovations to Increase the Value Chain of Agroecological Potatoes in Los Pescados, Veracruz

María Salomé Alejandre Apolinar¹, Hugo Amores Pérez² *, Irma Angélica García González³, Juan Carlos Moreno Seceña⁴

*Autor de correspondencia

DOI: [10.56643/rcia.v5i1.239](https://doi.org/10.56643/rcia.v5i1.239)

Como citar este artículo: Alejandre Apolinar, M. S., Amores Pérez, H., García González, I. A. y Moreno Seceña, J. C. (2026). Innovaciones tecnológicas para incrementar la cadena de valor de la papa agroecológica en Los Pescados, Veracruz. Revista Científica de Ingenierías y Arquitectura. 5(1). 40-66. <https://doi.org/10.56643/rcia.v5i1.239>

Resumen

La comunidad de Los Pescados, localizada en el municipio de Perote, en el estado de Veracruz, se dedica principalmente a la agricultura, la ganadería y a actividades forestales en un clima templado de zona montañosa. Entre sus principales cultivos se encuentra la papa, que se ha consolidado como una fuente de ingresos. Sin embargo, los agricultores enfrentan serias dificultades para acceder a mercados que valoren y remuneren adecuadamente su producto, lo que los lleva a destinar una gran parte de la cosecha al autoconsumo o a su transformación artesanal en subproductos como harina o botanas. Las innovaciones tecnológicas para incrementar la cadena de valor de la papa agroecológica en Los Pescados, Veracruz, se desarrolla a partir de la aplicación de la metodología de I+D (Investigación y Desarrollo), que permite implementar estrategias didácticas de Aprendizaje Basado en Proyectos (ABP) para la adquisición de conocimientos por los estudiantes del Instituto Tecnológico Superior de Xalapa.

1 Licenciada en Informática. Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico Superior de Xalapa. ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-0232-8217>

2 Ingeniero Mecánico Electricista. Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico Superior de Xalapa. ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-0260-4872>. Correo electrónico: hugo.ap@xalapa.tecnm.mx

3 Ingeniera en Electrónica. Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico Superior de Xalapa. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0586-1785>

4 Doctor en Ciencias en Agroecosistemas Tropicales. Colegio de Postgraduados. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0251-7586>

Recibido: 06/01/2026 | Aceptado: 02/03/2026 | Publicado: 15/06/2026

Los autores declaran no tener ningún conflicto de interés. La investigación fue financiada con recursos de los autores.

El objetivo de la investigación fue desarrollar habilidades para resolver el problema que supone la colocación de productos en el mercado enfrentado por los agricultores de la localidad. La misma se realizó en tres etapas: 1. investigación-documentación, 2. diseño y construcción de prototipos y 3. presentación de resultados. La aplicación de la metodología de I+D hizo posible que los estudiantes adquirieran conocimientos prácticos que les permitieran abordar la transformación y comercialización de productos. Así, se logró diseñar y construir cuatro prototipos automatizados, que representan soluciones innovadoras para la transformación y valorización de la papa, lo que abonó a conseguir mejores rendimientos en el procesamiento de esta materia prima y disminuir las mermas de residuos. Además, se redujeron los tiempos de procesamiento y de maquila homogénea del producto final.

Palabras clave: Agroindustria, automatización, transformación de los alimentos; educación Superior, tecnología aplicada.

Abstract

The community of Los Pescados, located in the municipality of Perote, in the state of Veracruz, is primarily dedicated to agriculture, livestock farming, and forestry in a temperate mountain climate. Among its main crops is the potato, which has become a significant source of income. However, farmers face serious difficulties accessing markets that value and adequately compensate their product, leading them to allocate a large portion of the harvest to self-consumption or artisanal processing into byproducts such as flour or snacks. Technological innovations to increase the value chain of agroecological potatoes in Los Pescados, Veracruz, are being developed through the application of R&D (Research and Development) methodology, which allows for the implementation of Project-Based Learning (PBL) strategies for knowledge acquisition by students of the Instituto Tecnológico Superior de Xalapa.

The objective of this research was to develop skills to address the problem of placing products in the market faced by local farmers. The project was carried out in three stages: 1. research and documentation, 2. design and construction of prototypes, and 3. presentation of results. The application of the R&D methodology enabled students to acquire practical knowledge that allowed them to address the transformation and commercialization of products. Thus, four automated prototypes were designed and built, representing innovative solutions for the transformation and valorization of potatoes. This contributed to

achieving better yields in the processing of this raw material and reducing waste. Furthermore, processing times and the homogeneous production of the final product were reduced.

Keywords: Agroindustry, automation, food processing; Higher Education, applied technology.

Introducción

En México, la educación superior demanda la formación de profesionales con sentido crítico, capaces de resolver los problemas reales con los que se encuentran. En este sentido, las instituciones necesitan un cambio profundo, que las encamine para brindar una educación superior más flexible, centrada en que el aprendizaje del estudiante esté alineado con el contexto social, económico y ambiental. La aplicación de metodologías que fomentan el trabajo en equipo, que permiten al docente y al alumno relacionar la teoría con la práctica mediante el desarrollo de proyectos reales que resuelven problemáticas y son útiles para la sociedad es una opción viable para promover el desarrollo de las competencias planteadas por Del Castillo (2019). El Aprendizaje Basado en Proyectos (ABP) es una metodología que fomenta las relaciones interpersonales, el trabajo colaborativo, la capacidad de organización y planificación, al tiempo que aumenta la motivación extrínseca, la autoeficacia y, por ende, el rendimiento académico (De La Reguera et al., 2019).

Como señalan Zambrano Briones et al. (2022), el Aprendizaje Basado en Proyectos (ABP) es una estrategia metodológica didáctica que propicia un cambio de roles entre los principales actores del proceso de enseñanza-aprendizaje, que difiere de los roles que suelen desempeñar en la educación tradicional. La presente investigación considera el uso de dicha metodología para propiciar el trabajo colaborativo entre el sector productivo y los maestros y alumnos de diversas carreras impartidas en el Instituto Tecnológico Superior de Xalapa, quienes desarrollan una tecnología innovadora con el propósito de apoyar a los agricultores de la localidad de Los Pescados, Veracruz.

La comunidad de Los Pescados, ubicada en el municipio de Perote, Veracruz posee una economía diversificada, que combina la pesca artesanal con la agri-cultura a pequeña escala. El clima de la zona es templado húmedo; su temperatura media anual oscila entre 12°C y 18°C; registra un alto nivel de precipitaciones que favorece el cultivo de papa, maíz y hortalizas, según lo reporta el

Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI, 2020). A pesar de la riqueza natural del lugar, muchos habitantes enfrentan desafíos económicos ocasionados por los bajos costos de los productos agrícolas durante la temporada de cosecha. Esta situación vuelve crucial el desarrollo de tecnologías accesibles que agreguen valor a dichos productos y hagan posible el procesamiento de uno de los principales cultivos de la localidad, la papa, que en este caso es considerada agroecológica, pues en su producción se aplican principios y prácticas que priorizan la sostenibilidad ambiental y la salud del suelo. Se busca que con los prototipos diseñados sea posible procesar excedentes de papa, reduciendo pérdidas y evitando accidentes durante su manipulación, para lograr productos derivados, como harina, papas en rodajas deshidratadas, papas fritas, entre otros que poseen mayor vida útil y el valor comercial indicado por la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO, 2021).

Las papas procesadas son un componente integral de la industria alimentaria. Para producirlas se requiere la transformación de la papa mediante el rebanado, un paso crítico en la elaboración de diversos productos alimenticios. Investigaciones recientes han mostrado un creciente interés en el desarrollo de prototipos automatizados que mejoren la eficiencia y la calidad de los procesos (Smith y Fressoli, 2021).

El diseño y desarrollo de peladores, rebanadores, deshidratadores y molinos de papa automatizados involucra una variedad de disciplinas de ingeniería, incluyendo la ingeniería mecánica, el diseño de sistemas, el control de procesos, a lo que se suman consideraciones de seguridad y normativas alimentarias establecidas por las autoridades sanitarias (Nestlé, 2025, 5 de noviembre). Aunado a ello, para el desarrollo de estos equipos es importante tener en cuenta la selección de materiales a utilizar, ya que estarán en contacto con los alimentos, como también que el diseño sea higiénico (Win et al., 2019).

Considerando lo anterior, hoy en día las instituciones de educación superior son escenarios propicios para desarrollar proyectos que sirvan de apoyo a la sociedad. Los mismos requieren trabajo colaborativo, que fomente las relaciones interpersonales, como lo hace la metodología del Aprendizaje Basado en Proyectos (ABP).

Este trabajo tiene como objetivo describir la implementación del ABP en el Instituto Tecnológico Superior de Xalapa, específicamente en el diseño de tecnologías innovadoras. Para ello se siguió un enfoque de ingeniería aplicada, cuyo propósito central fue abordar los desafíos productivos con que se encuentran los agricultores locales, por ejemplo, cuellos de botella, optimización de tiempo. Con ello se espera contribuir a la eficiencia de la cadena de valor y al fortalecimiento de la agricultura agroecológica en la región. La adopción de este enfoque reside en su capacidad para incrementar la productividad y la rentabilidad, optimizando recursos y reduciendo pérdidas. Así, estas intervenciones realizan un aporte directo a dos objetivos estratégicos: la optimización de la cadena de valor agroalimentaria, que se volverá más eficiente, y el fortalecimiento de la agricultura agroecológica de la región, proveyendo una tecnología innovadora que mejora la productividad y promueve la sostenibilidad ambiental.

MARCO TEÓRICO

La cadena de valor agroecológica enfrenta desafíos críticos en términos de pos-cosecha, lo que limita el acceso a tecnologías, al tiempo que se registra una baja comercialización de productos con valor agregado, como menciona la FAO (2021). Para el caso específico de la papa (*Solanum tuberosum*), cultivo clave en la comunidad de Los Pescados, Veracruz, las condiciones climáticas, que incluyen lluvias excesivas y granizo en un ambiente templado subhúmedo y relativamente fresco durante todo el año, generan dificultades (INEGI, 2020). Esto hace necesario conocer a profundidad dicha problemática, con el propósito de contribuir a su resolución mediante la implementación de tecnologías basadas en la metodología del Aprendizaje Basado en Proyectos (ABP).

1. Agroecología, desarrollo rural y prácticas agroecológicas

La agroecología, una perspectiva que integra sostenibilidad ambiental, equidad social y viabilidad económica, busca fortalecer los sistemas alimentarios locales, en el sentido en que son analizados por Nicholls y Altieri (2018). En comunidades como Los Pescados, la agroecología adquiere relevancia, pues promueve la soberanía alimentaria por medio del uso de técnicas agrícolas tradicionales, entre ellas, manejo de fertilidad del suelo, manejo de plagas, siembra y selección de cultivos que abonen a la sostenibilidad de los medios de subsistencia (Ávila et al., 2019).

El término “sostenibilidad”, que significa “durabilidad” de recursos, surgió para iniciar un movimiento de concientización que permitiera comprender la importancia del cuidado y el mantenimiento del medio ambiente (Benítez et al., 2021, p. 68).

Pachón (2007) define el “Desarrollo Rural como el conjunto de acciones o de propuestas que buscan mejorar las condiciones de producción y los ingresos de los campesinos para lograr mejores niveles de vida y participación, y superar la pobreza”. Claramente, el desarrollo rural fue diseñado para incrementar la producción y elevar la productividad.

Las prácticas agroecológicas, por ende, representan la aplicación de conceptos y principios ecológicos al diseño y manejo de sistemas alimentarios sostenibles (Wezel et al., 2020).

2. Pérdidas poscosecha y valor agregado

Según la FAO (2021), hasta 30% de la producción agrícola de los países en desarrollo se pierde por falta de infraestructura de procesamiento. En el caso de la papa, tecnologías que incluyen deshidratadores automatizados y equipos de pelado, rebanado y molinos automatizados han demostrado que sirven para reducir pérdidas y aumentar su vida útil (Romero, 2019).

Ceroli (2023) señala que uno de los principales problemas de los cultivos de papa es la alta velocidad con que se produce el pardeamiento enzimático. Esto hace necesario implementar procesos que permitan obtener productos o derivados mínimamente procesados cuya vida útil sea mayor a la del producto fresco, modificando de manera ínfima sus características sensoriales. En la actualidad, se agrega valor al producto a partir de la elaboración de nuevos subproductos, por ejemplo, harina, lo que da lugar a nuevas formas de producción y de comercialización de productos frescos, cortados, haciéndolos más atractivos y fáciles de preparar por el consumidor.

3. Innovación tecnológica

El diseño de prototipos automatizados y adaptados a zonas rurales es clave para escalar soluciones sin tener que depender de grandes industrias o de contar con enormes cantidades de recurso económico. En este caso, se propusieron iniciativas sustentadas en el Aprendizaje Basado en Proyectos (ABP),

las cuales lograron implementar diversas tecnologías con la participación de estudiantes, profesores y comunidades (Ayala y Ayala, 2017).

La presente investigación empleó la metodología del Aprendizaje Basado en Proyectos (ABP) con un enfoque activo que integra conocimientos teóricos y habilidades técnicas para resolver problemas reales en contextos educativos en los que se busca vincular el aprendizaje colaborativo con el desarrollo de proyectos en el aula. El aula es el lugar en el que se construye el conocimiento a partir de los saberes previos (Cayambe et al., 2023).

Del Sol-Ávila y Tapia-Bernabé (2025) enfatizan en la articulación del Aprendizaje Basado en Proyectos (ABP) y la teoría del aprendizaje significativo, considerando que ambas perspectivas comparten un enfoque centrado en el aprendiz, en la contextualización del conocimiento y la conexión entre teoría y práctica.

Por su parte, Álvarez (2023) menciona que es necesario ampliar los entornos de aprendizaje mediante la vinculación con herramientas tecnológicas que satisfagan las expectativas de universalidad y que logren que el estudiante multitareas se sienta cómodo, prestando atención a cada conocimiento que se le comparta en el aula. Para esta investigación, se propusieron diversos proyectos a estudiantes de Ingeniería Mecatrónica del Instituto Tecnológico Superior de Xalapa que realizarían sus residencias profesionales. El estudio se estructuró en cinco fases: 1) detección de necesidades de los agricultores, 2) presentación de propuestas tecnológicas con sus respectivos bocetos, 3) prototipado y pruebas, 4) validación de los prototipos propuestos para el preprocesamiento poscosecha de la papa agroecológica y 5) aprendizaje cooperativo del grupo de agricultores y su familia. Una vez definida la metodología que sería aplicada en este proyecto, se dio inicio a la primera etapa, esto es, la formulación del plan de trabajo. Entre las actividades se definió realizar entrevistas semiestructuradas, ideales para recopilar información detallada sobre prácticas, desafíos y percepciones respecto a la adopción de tecnología. Así, se efectuaron siete visitas de campo con el objetivo de determinar las necesidades (véase tabla 1) y plantear posibles soluciones a la problemática detectada.

Tabla 1.*Necesidades identificadas en las entrevistas*

Categoría de proceso	Necesidad identificada	Posible solución
Lavado de papa	Asegurar la limpieza de la papa con el menor consumo de agua	Prototipo automatizado con control de parámetros de temperatura y tiempo
Deshidratado de papa	Control preciso de temperatura y tiempo para un deshidratado uniforme que preserve la calidad	Prototipo automatizado con control de parámetros de temperatura y tiempo
Pelado de papa	Reducir el desperdicio, el pelado irregular, evitar accidente frecuentes	Diseño de un prototipo automatizado de alta velocidad
Molido de papa	Obtener una harina de textura uniforme para evitar contaminación	Prototipo de molino con control de velocidad y temperatura, con sensores de precisión ajustables

Se concluyó que era necesario crear tecnología automatizada que contribuyera a mejorar los procesos realizados de manera constante. Así, se propuso diseñar los siguientes prototipos automatizados:

- Un lavador y pelador de papas
- Un rebanador de papas
- Un deshidratador
- Un molino / pulverizador

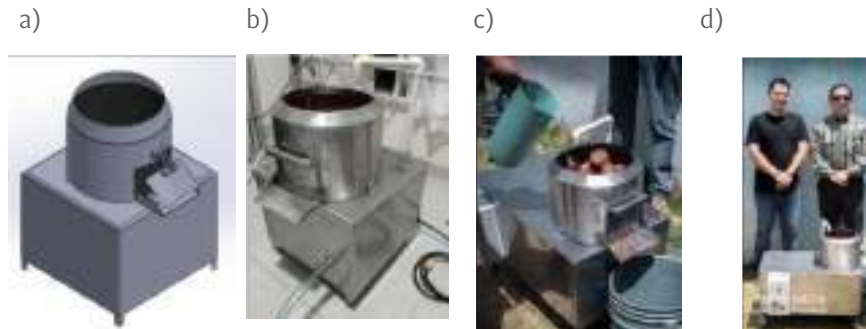
A continuación, se presentan las distintas técnicas utilizadas para el desarrollo de los prototipos automatizados.

1. Diseño y creación de un prototipo lavador y pelador de papas

Con el apoyo de un estudiante de residencias profesionales de la carrera de Ingeniería Mecatrónica se diseñó y construyó un prototipo lavador y pelador de papas (figura 1), con el objetivo de facilitar y agilizar estos procesos. Además, se identificó la necesidad de que este prototipo fuera automatizado. Para desarrollarlo, el estudiante aplicó conocimientos de diseño mecánico, automatización, programación, sistemas y máquinas de fluidos, entre otros; el prototipo se construyó con acero inoxidable de grado quirúrgico y permitió realizar el lavado y pelado de las papas de manera simultánea, empleando muy poca agua.

Figura 1.

Prototipo lavador / pelador de papa



Nota: Estas imágenes corresponden al proceso: a) boceto del lavador / pelador; b) prototipo concluido; c) prueba del prototipo; d) estudiante responsable.

2. Diseño y creación de un rebanador de papas automatizado

Este equipo complementa al lavador y pelador de papas. Fue elaborado por un estudiante de residencias profesionales de la carrera de Ingeniería Mecatrónica. Algunos de los problemas que se presentan con frecuencia al rebanar papa son los accidentes, el remanente y los tiempos de rebanado. Por este motivo se optó por desarrollar un rebanador automatizado, con el que se obtuvieron rodajas uniformes para fritura. El rebanador fue construido con materiales de alta calidad, como se muestra en la figura 2; se elaboró con acero inoxidable de grado alimenticio, que garantiza su durabilidad y resistencia en el tiempo y cumple con la norma NMX-FF-109/1-SCFI-2016. El diseño logrado lo hace ideal

para ser usado en cualquier ambiente de producción. El rebanador automatizado permite cortar grandes cantidades de papas en poco tiempo, aumentando la eficiencia del proceso de producción. Además, el corte uniforme de las papas posibilita una cocción más homogénea y una presentación más atractiva del producto final.

Figura 2.

Prototipo rebanador de papa



Notas: Estas imágenes corresponden al proceso: a) boceto del rebanador abierto; b) boceto del rebanador cerrado; c) prueba del prototipo; d) estudiante responsable.

Al rebanar la papa agroecológica, se detectó que era posible aprovechar el desperdicio o merma resultante. Por eso, con apoyo de un estudiante de Ingeniería Mecatrónica en residencias profesionales se decidió crear un prototipo deshidratador completamente automatizado. Para hacerlo, el estudiante aplicó sus conocimientos de termodinámica, automatización, diseño mecánico, programación, transferencia de calor, entre otros (figura 3b). El prototipo construido permite aprovechar la merma de papa deshidratada, destinándola a la elaboración de otros productos. La deshidratación, esto es, la eliminación de agua de la merma, la transforma en un producto seco, que puede ser molido en polvo, procedimiento que posibilita la preservación de los alimentos por un periodo prolongado. Dicho procedimiento reduce significativamente el peso y el volumen de las papas. La eficiencia de deshidratación determina la cantidad de polvo disponible.

Considerando que la eficiencia de deshidratación de la papa corresponde al porcentaje del peso original retenido tras eliminar el agua, la cantidad de polvo disponible depende del contenido de agua de la papa y del método de deshidratación utilizado. Habitualmente, el contenido de agua de las papas frescas es de 75 a 80%. El peso final de la papa después de deshidratarla estará dado, principalmente, por el peso de los sólidos secos. Si una papa fresca tiene 80% de agua, el restante 20% es sólido seco. Por lo tanto, la eficiencia de la deshidratación tras aplicar el procedimiento es de aproximadamente 20%. Esto significa que habrá alrededor de 20 gramos de papa deshidratada por cada 100 gramos de papa fresca. Sin embargo, este valor puede variar ligeramente dependiendo de varios factores, a saber: el tipo de papa y la forma en que se deshidrata. En este caso se utilizó papa fresca y para deshidratarla se colocó su merma directamente en el prototipo automatizado, como se muestra en la figura 3.

Figura 3.

Prototipo deshidratador



Notas: Estas imágenes corresponden al proceso: a) boceto del deshidratador; b) prototipo concluido; c) prueba del prototipo; d) estudiante responsable.

4. Diseño y creación de un molino / pulverizador automatizado

Una vez construido el deshidratador se platicó con los agricultores sobre la posibilidad de aprovechar la merma o residuo para agregar valor al producto deshidratado. Así, se planteó que sería posible transformar la papa en harina, lo que supuso el desarrollo de un prototipo especializado para su molienda. Con este propósito, se estableció una colaboración interdisciplinaria con los estudiantes residentes de Ingeniería Mecatrónica.

Una encuesta realizada por López et al. (2025) indica que la mayor parte de residuo que genera la población rural responde a la merma ocasionada por la descomposición de cosechas / productos cuya vida de anaquel es reducida. Considerando esta información, el desarrollo del prototipo se fundamentó en la aplicación de conocimientos de diseño mecánico, automatización, programación avanzada y control para la selección de materiales, mecanizado de componentes y cálculo estructural, a fin de asegurar la robustez y eficiencia del prototipo que permitiría reutilizar ese residuo. Asimismo, se integraron principios de automatización y control para la implementación de componentes electrónicos, como Arduino, y se diseñaron la interfaz de operación y algoritmos de control que fueron desarrollados en el software Arduino IDE.

El prototipo se construyó con acero inoxidable, para asegurar su estabilidad y durabilidad. Se le incorporaron aspas para el molido, también de acero inoxidable (figura 4), que permitieran un pulverizado eficiente, haciendo polvo todo lo que se requiriera, como se muestra en la figura 4c. A la par se definió que debía ser portátil y ligero, para permitir su fácil traslado hacia el lugar en que sería utilizado y pudiera adaptarse a cualquier entorno.

Figura 4. Prototipo molino pulverizador



Notas: Estas imágenes corresponden al proceso: a) boceto del deshidratador; b) prototipo concluido; c) prueba del prototipo.

Resultados y discusión

El aprendizaje cooperativo del grupo de agricultores y su familia

En este proyecto participaron activamente habitantes de la localidad de Los Pescados, Veracruz, incluyendo a todos los integrantes de un hogar de emprendedores —padres, hijo, nuera, nietos— y a vecinos. La historia de esta familia agricultora evidencia que el trabajo en equipo ha sido fundamental para el logro de las metas y objetivos que se propusieron alcanzar. En este sentido, cada miembro de esta familia desempeña un papel crucial en el desarrollo y éxito de su emprendimiento. Su labor se enfoca en la producción de papas fritas, un producto que ha ganado popularidad en la región gracias a su sabor y calidad.

Distribución de las actividades agrícolas y comerciales

Cada integrante de la familia conoce el rol que desempeña en cada uno de los procesos, a saber: siembra, cosecha, lavado, pelado, corte, freído y empaquetado. El papel de cada miembro de la familia es relevante para el funcionamiento de este pequeño negocio. Los padres, a pesar de su avanzada edad, siguen siendo la columna vertebral de la finca; supervisan las labores y aconsejan a su hijo en la toma de decisiones importantes. El hijo, por su parte, se encarga de las tareas más exigentes, desde la siembra y el cuidado del ganado hasta la cosecha y el procesamiento de las papas. La nuera, por su lado, es una pieza clave en la elaboración de las papas fritas. Dada su habilidad en la cocina, se encarga de la cocción y el sazonamiento, asegurándose de que cada bolsa de papas tenga el sabor característico que las ha hecho tan populares. La hija también aporta al negocio, ayudando en el empaquetado y en otras tareas menores. Los nietos colaboran de igual manera, contribuyendo al funcionamiento general del emprendimiento familiar.

A pesar de las dificultades que enfrenta a diario, esta familia ha logrado consolidar su negocio gracias a su esfuerzo y dedicación. Cada día trabajan juntos para ofrecer un producto de calidad y asegurar el bienestar de su hogar y de su comunidad. Su historia es un ejemplo inspirador de cómo el trabajo en equipo y la colaboración pueden hacer la diferencia en cualquier proyecto. Ahora, con el apoyo de la tecnología, podrán generar mayores ingresos, su tarea será más eficiente y tendrán más tiempo para realizar otras actividades.

En la educación superior, el ABP prepara a los futuros profesionales para desa- fíos laborales, ya que simula entornos como los de esta propuesta, en los que deben tomar decisiones y comunicar los resultados esperados por una comu- nidad para hacer más eficientes sus procesos.

La inclusión de estudiantes de Ingeniería Mecatrónica que desarrollaron distin- tos prototipos de innovación tecnológica está dirigida a optimizar el procesa- miento de la papa agroecológica poscosecha en Los Pescados, Veracruz.

El apoyo a esta comunidad con innovaciones tecnológicas que contribuyen al procesamiento de este tubérculo no sólo mejoró sus ingresos; además, promo- vió la seguridad alimentaria y el desarrollo sostenible, aspectos alineados con los objetivos de desarrollo sostenible.

El diseño y la puesta en marcha del lavador y pelador de papas benefició de manera significativa a los agricultores de la localidad de Los Pescados, ya que permitió optimizar estos procesos brindando una solución eficiente y mejo- rando las condiciones en que realizan su trabajo en la región. En la tabla 2 se comparan los resultados del lavado y el pelado manual con los obtenidos en el proceso automatizado:

Tabla 2.
Proceso de lavado manual versus automatizado

Proceso	Tiempo lavado	Tiempo Pelado	Tiempo total (pelado y lavado)	Masa inicial
Manual	4.92 minutos	6.50	11.42 minutos	2 kg
Automatizado	1 minuto	1 minuto	2 minutos	2Kg

De acuerdo con los resultados consignados en la tabla 2, el desempeño del prototipo superó las expectativas iniciales. El pelado y lavado para obtener dos kilogramos de papa tomó 11.42 minutos, que representan el tiempo acumula- do medido en una muestra real, 4.92 minutos dedicados al lavado y 6.50 al pelado. El proceso manual de lavado y pelado de 10 kilogramos de papa requ- ría dedicar aproximadamente 56 minutos. Con la implementación del sistema automatizado, el tiempo destinado a estas tareas se redujo a sólo cinco minu- tos, utilizando únicamente un litro de agua. Ello representa una reducción de

91.07% en el tiempo de procesamiento, atribuible a la ejecución simultánea de ambas actividades a la vez (lavado y pelado). Consecuentemente, la capacidad de procesamiento experimentó un incremento sustancial, pasando de 10 kg / hora a 120 kg / hora. Para calcular la reducción del tiempo de procesamiento, en este caso 91.07%, primero se calcula el tiempo de ahorro, es decir, $56 - 5$ minutos = 51 minutos. Posteriormente, se obtiene el porcentaje que representa ese ahorro: $51 / 56 \times 100\% = 91.07\%$.

Este dispositivo fue diseñado específicamente para hacer frente a los desafíos enfrentados por los agricultores al producir frituras de papa en la región de Los Pescados. El pelador de papas automatizado, con capacidad para pelar y lavar hasta dos kilogramos de papas por minuto, se posiciona como una herramienta invaluable para agilizar estos procesos y mejorar la eficiencia. En el ámbito industrial, la eficiencia y la automatización desempeñan un papel crucial en el aumento de la productividad y la optimización de los procesos. En este caso, el dispositivo fue diseñado para agilizar y simplificar los procesos de pelado y lavado de papas en entornos comerciales y de producción a pequeña escala.

Por otra parte, cabe señalar que los peladores deben contar con sistemas de drenaje que faciliten el flujo de agua y de residuos hacia los puntos de recolección y eliminación (Pantoja, 2020). Los residuos generados durante el lavado de las papas pueden contener partículas de suciedad, piel, sedimentos y otros elementos indeseables (Chancy et al., 2021). El prototipo desarrollado atendió este importante aspecto, con un diseño apropiado que posibilita la eficiente evacuación de los desechos generados durante el lavado. Aunado a ello, se logró implementar un mecanismo que permite recolectar los residuos provenientes de ese desagüe.

El rebanador de papa automatizado es capaz de cortar las papas en rebanadas uniformes, ajustando el espesor deseado con gran precisión y rapidez. Su diseño ergonómico hace sencilla y segura la manipulación del producto. Además, este diseño evita el contacto directo entre el usuario y los alimentos, garantizando la higiene y seguridad de los productos finales. El rebanador automatizado opera a una velocidad de 2 kg / min, permitiendo cortar 30 kilogramos de papas en tan sólo 15 minutos. En contraste, el método manual, cuya velocidad de operación alcanza 0.25 kg / min, supone dedicar 120 minutos para cortar la misma cantidad de papas. De manera que el uso del prototipo automatizado redujo el tiempo de procesamiento en 88%. Para obtener la reducción del tiempo de procesamiento, se calcula primero el tiempo ahorrado, es decir,

120 - 15 minutos = 105 minutos; posteriormente se obtiene el porcentaje que representa dicho ahorro:

$$(105/120) \times 100\% = 87.5\%$$

El espesor y peso del producto final son importantes y deben ser uniformes. Como se observa en la tabla 3, el uso del prototipo permitió una eficiencia mayor; en tanto el grosor fue inferior y de menor peso, aumentó la cantidad de producto obtenido.

Tabla 3.

Comparativa de grosor y peso (manual versus automatizado)

N°	Grosor (mm)	Peso (g)	Peso acumulado (g)			
			Manual	Automatizado	Manual	Automatizado
Rodaja						
1	3.2	1.5	8	4	8	4
2	4.1	1.2	10	3	18	7
3	3.8	2	9	5	27	12
4	4.5	1.8	11	4	38	16
5	3.3	2.3	8	6	46	22

El análisis comparativo entre los procesos manual y automatizado revela la clara superioridad de este último. El corte manual muestra alta variabilidad en el grosor (de 3.2 a 4.5 milímetros) y en el peso (de 8 a 11 gramos); el sistema automatizado ofrece una precisión excepcional en el grosor (de 1.2 a 2.3 milímetros) y en el peso (de 3 a 6 gramos), los cuales son notablemente menores y consistentes. Esta eficiencia se traduce en que el material utilizado se reduce a menos de la mitad (22 gramos versus 46 gramos acumulados), lo que, a su vez, disminuye costos y desechos. Por lo que, la automatización garantiza un producto uniforme y un proceso significativamente más eficiente y económico.

La producción de papas es una importante fuente de ingreso para los agricultores de la región de Los Pescados. Por esta razón, es esencial aprovechar al máximo cada papa, minimizando el desecho y asegurando que el producto final sea de alta calidad. Los agricultores elaboran sus papas fritas siguiendo

un proceso cuidadoso y tradicional, que maximiza el rendimiento y la calidad del producto final.

Controlar de manera precisa el grosor y el peso al cortar la papa es determinante en la producción de papas fritas. Un corte preciso asegura una cocción homogénea y mejora la aceptación del producto. Los agricultores señalan que el espesor ideal es de 1 a 3 milímetros.

Como se puede observar en la tabla 3, el espesor obtenido al emplear el prototipo automatizado cumple lo solicitado, al tiempo que el peso disminuye en 50%. Ello supone un mayor rendimiento del producto. Leyva et al. (2023) consideran que una porción de 175 gramos de papa proporciona: 126 kilocalorías de energía, 27 gramos de carbohidratos, 0.17 gramos de grasa, 3.15 gramos de proteínas, 2.1 gramos de fibra, 0.5 miligramos de vitamina C y 0.43 miligramos de vitamina B6. Romero (2019) valora que la papa seca proporciona 322 kilocalorías, 8.2% de proteína, 72.8% de carbohidratos, 0.7% de grasa y 47 miligramos de calcio, siendo un producto nutritivo.

Los datos aportados por Leyva et al. (2023) y Romero (2019) resaltan el alto valor nutricional de la papa, tanto en su estado fresco como deshidratado, lo que refuerza la importancia de implementar un deshidratador automatizado. Mientras la papa fresca aporta energía, fibra y vitaminas esenciales, el proceso de deshidratación concentra sus nutrientes, incrementando su aporte de proteínas (8.2%) y carbohidratos (72.8%), lo que la convierte en un alimento ideal para hacer frente a la desnutrición, al mismo tiempo que se prolonga su vida útil. Además de reducir las pérdidas, el proceso de deshidratación y la tecnología utilizada para llevarlo a cabo transforman un producto perecedero en uno estable, nutritivo y con mayor valor comercial.

La deshidratación de la papa agroecológica cumple con los parámetros estipulados por Balbuena y Díaz (2021), a saber: la deshidratación básica se realiza a una temperatura de 55-65°C; insume un tiempo de 6-10 horas (dependiendo del corte), con una humedad final $\leq 10\%$. En el caso de la producción de harina, los parámetros contemplan una temperatura de 60-70°C, un tiempo de 4-8 horas (dependiendo del corte) con una granulometría ideal de 80-150 micrómetros.

Al realizar seis pruebas del deshidratador automatizado, se obtuvieron resultados favorables que respaldan su eficacia y su rendimiento. Durante el proceso

de deshidratación se logró mantener una temperatura constante y adecuada, que favoreció la deshidratación efectiva de los alimentos sin comprometer su calidad. El deshidratador automatizado redujo significativamente el contenido de agua, prolongando la vida útil de la papa sin comprometer sus propiedades nutricionales y organolépticas. Durante el deshidratado de la merma de la papa se mantuvo un umbral de humedad de entre 15% y 20% en el prototipo (véase tablas 4 y 5).

Tabla 4.
Merma obtenida

Muestra (kg)	Merma (g)	Merma (kg)
1	98	0.098
2	80	0.080
3	66	0.066
4	78	0.078
5	36	0.036
6	68	0.068
Total	426	0.426

La fórmula utilizada para calcular la producción de harina a partir de la merma es:

Peso de la harina (kg) = Merma (kg) * Eficiencia de deshidratación

Tabla 5.
Peso final de la merma para cada muestra

Muestra	Peso de la Merma (kg)
1	0.098
2	0.080
3	0.066
4	0.078
5	0.036
6	0.068

Eficiencia de deshidratación: se considera una eficiencia de deshidratación de 20%, esto es, 20% del peso del desecho se convierte en harina. Para su cálculo se debe convertir el porcentaje a número decimal, conversión crucial cuando se utilizan porcentajes en cálculos matemáticos.

Porcentaje = 20%

Para convertir esto en un número decimal:

$$\text{Número decimal} = \% / 100 = 20 / 100 = 0.20$$

Aplicación de la fórmula a cada muestra

Peso de la harina = $0.098 \text{ kg} \times 0.20 = 0.0196 \text{ kg}$

Peso de la harina = $0.080 \text{ kg} \times 0.20 = 0.0160 \text{ kg}$

Peso de la harina = $0.066 \text{ kg} \times 0.20 = 0.0132 \text{ kg}$

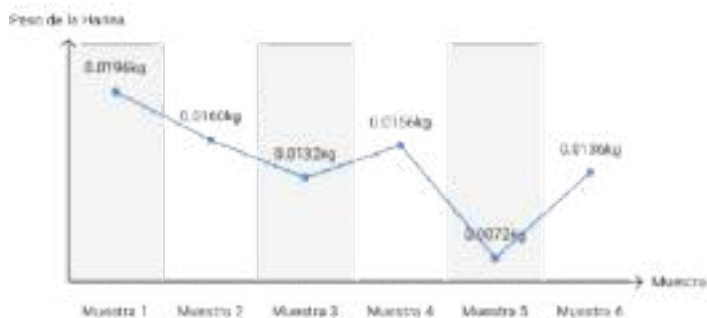
Peso de la harina = $0.078 \text{ kg} \times 0.20 = 0.0156 \text{ kg}$

Peso de la harina = $0.036 \text{ kg} \times 0.20 = 0.0072 \text{ kg}$

Peso de la harina = $0.068 \text{ kg} \times 0.20 = 0.0136 \text{ kg}$

Figura 5.

Aplicación de la fórmula a cada muestra



Nota: Este gráfico representa las seis muestras, aplicando fórmula.

Suma de porcentajes:

$$1.96 + 1.60 + 1.32 + 1.56 + 0.72 + 1.36 = 85.2$$

Por lo tanto, el porcentaje promedio total de harina por cada kilogramo es:

$$\text{Porcentaje total de Harina (\%)} = \frac{\text{Suma de Porcentajes Muestras}}{\text{Muestras}}$$

Sustituyendo:

$$\text{Porcentaje total de harina (\%)} = 85.2/6$$

$$\text{Porcentaje total de harina (\%)} = 1.42$$

Tabla 6.

Porcentaje total de harina de papa

Muestra (kg)	Merma (g)	Merma (kg)	Merma (%)	Merma (kg)	Peso final después de merma (kg)	Peso de la harina (g)	Peso de la harina (%)
1	98	0.098	9.8%	0.902	0.0196	19.6	1.96%
2	80	0.080	8.0%	0.920	0.0160	16.0	1.60%
3	66	0.066	6.6%	0.934	0.0132	13.2	1.32%
4	78	0.078	7.8%	0.922	0.0156	15.6	1.56%
5	36	0.036	3.6%	0.964	0.0072	7.2	0.72%
6	68	0.068	6.8%	0.932	0.0136	13.6	1.36%
Total	426	0.426	7.1%	5.574	0.0852	85.2	1.42%

Nota: Estos datos representan el porcentaje de harina de seis muestras.

Además de ser eficaz para la deshidratación de la papa, como muestra la tabla 6, el prototipo deshidratador automatizado representa una solución innovadora para procesar diversos productos agroecológicos. Su diseño permite conservar frutas, hierbas aromáticas, hortalizas, entre otros productos, manteniendo sus propiedades nutricionales y reduciendo el desperdicio poscosecha.

Este prototipo optimiza el procesamiento de papa e impulsa la innovación en la agroecología, beneficiando a múltiples sectores de la cadena alimentaria.

Molino / pulverizador automatizado

Como muestran los datos recogidos en la tabla 7, se obtuvieron mejores resultados al utilizar el molino automatizado. Esto se refleja claramente en tres parámetros: 1) tiempo, 2) calidad de triturado / pulverizado y 3) esfuerzo físico.

Tabla 7.

Molido manual versus automatizado

Proceso	Tiempo molienda	Masa inicial (g)	Masa final (g)
Manual	1.46 minutos	200 g	190g
Automatizado	1 minuto	200 g	194g

El molino / pulverizador automático demostró ser netamente superior en términos de eficiencia, tiempo y calidad de molienda en comparación con el molino manual. El proceso de pulverizado se completó en menos tiempo, consiguiendo un producto más uniforme con menor esfuerzo físico del operador. Asimismo, el molino automatizado permitió mantener una mayor consistencia en la calidad del producto final, lo que resulta fundamental en procesos que requieren precisión, como la producción de harina.

Conclusiones

El proyecto presentado, desarrollado con base en el Aprendizaje Basado en Proyectos (ABP), logró implementar cuatro prototipos automatizados — lavador / pelador, rebanador, deshidratador y molino de papa— en la comunidad de Los Pescados en Perote, Veracruz. En este sentido se destaca la participación activa de las familias, pues cada uno de sus integrantes colaboró en el proceso, demostrando que el uso e implementación de innovaciones tecnológicas en el campo pueden ser posibles cuando existe un esfuerzo colectivo e intergeneracional.

La incorporación de los prototipos a las tareas cotidianas permitió a los agricultores reducir pérdidas, evitar accidentes, optimizar tiempos de trabajo, reducir el esfuerzo físico humano y generar productos con mayor valor agregado.

El Aprendizaje Basado en Proyectos (ABP) supuso un aprendizaje práctico y colaborativo, a partir del cual se propusieron soluciones adaptadas a las necesidades reales de los agricultores. Los prototipos diseñados demostraron ser versátiles y escalables, con potencial para procesar otros cultivos, lo que puede ampliar su impacto en la seguridad alimentaria y los ingresos. Además de mejorar el procesamiento de la papa, este proyecto fortaleció los lazos comunitarios y familiares como deriva de las jornadas de trabajo realizadas en conjunto, mostrando que la tecnología y el aprendizaje colaborativo son herramientas útiles para el desarrollo sostenible.

Agradecimientos

Un sincero agradecimiento a los agricultores de Los Pescados, Veracruz; a la Asociación Aroma de la Montaña de esa misma localidad y a los estudiantes de la carrera de Ingeniería Mecatrónica participantes en este proyecto por el apoyo en el diseño y la creación de los prototipos automatizados, así como por las pruebas realizadas a los mismos.

- Maximiliano Tirado Cagnant – Lavador / Pelador
- Erik Gaona San Gabriel – Deshidratador
- Gustavo Ángel Roldán Jiménez- Rebanador
- Elías Ramsés Guevara Guzmán- Molino/Pulverizador

Referencias

- Álvarez, R. L. J. (2023). Utilización e impacto de simuladores en la enseñanza de electrónica [Use and impact of simulators in electronics teaching]. Anuario de Investigación: Universidad Católica de El Salvador, 12, 81–94. <https://cam-jol.info/index.php/aiunicaes/issue/view/1801>
- Ávila, R. L. E., Cordero, O. E. I., Ledezma, R. J., Galvis, A. C. y Ávila, R. A. (2019). La agroecología como alternativa: movimiento, ciencia y práctica para la justicia y soberanía alimentaria [Agroecology as an alternative: movement, science and practice for food justice and sovereignty]. Revista Inter Disciplinaria, 7(19), 195–218. <https://doi.org/10.22201/ceiich.24485705e.2019.19.70293>
- Ayala, M. y Ayala, S. (2017). Aprendizaje basado en problemas (ABP) como técnica didáctica en extensión: construcción de conocimientos entre integrantes de cooperativas “Ellas Hacen” en la Universidad Nacional de Formosa [Problem-based learning (PBL) as a teaching technique in extension: Knowledge construction among members of “Ellas Hacen” cooperatives at the National University of Formosa]. Revista de la Facultad de Agronomía, 116(3), 121–132. <https://revistas.unlp.edu.ar/revagro/article/view/6151/5100>
- Balbuena López, H. L. y Díaz Valencia, Y. R. (2021). Análisis de deshidratado de papa y malanga a través de secadores solares [Dehydration analysis of potato and malanga using solar dryers] [Tesis de licenciatura, Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas]. Repositorio INICACH. <https://repositorio.unicach.mx/handle/20.500.12753/4113>
- Benítez, A. A., Espinoza, E. A. y Márquez, O. M. (2021). Teoría y educación ambiental. Reflexiones en tiempo de pandemia [Theory and environmental education. Reflections in pandemic times]. En J. M. Rivera Ramírez y H. Becerra Espinoza (Eds.), Revisión documental: Implementación de estrategias educativas medioambientales a favor del desarrollo sustentable en IES (pp. 67–83).
- Ceroli, P. (2023). Calidad y tecnología de postcosecha de papa y agregado de valor [Postharvest quality and technology of potato and value addition] [Mesa redonda]. IV Congreso Argentino de Biología y Tecnología Postcose-

cha, Balcarce, Buenos Aires, Argentina. <https://revistas.unlp.edu.ar/InvJov/article/view/16072/15341>

Cayambe Gordillo, J. K., Lucero Bolaños, F. N. y Vargas Naranjo, M. del R. (2023). El aprendizaje colaborativo para el desarrollo e implementación de un proyecto de aula vinculado a la asignatura de Emprendimiento y Gestión en estudiantes de bachillerato [Collaborative learning for development and implementation of a classroom project linked to Entrepreneurship and Management]. *Ciencias Latinas Revista Científica Multidisciplinar*, 7(6), 434–453. https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v7i6.8699

Chancy, M. V., Lozano, H. C. A. y Palma, C. D. (2021). Proceso de tratamiento para mitigar la contaminación del agua generada en el proceso del lavado de la papa en el municipio de Pasca, Cundinamarca [Treatment process to mitigate water contamination from potato washing in Pasca, Cundinamarca] [Tesis de licenciatura, Universidad Militar Nueva Granada]. Repositorio institucional UMNG. <https://repository.umng.edu.co/server/api/core/bitstreams/a71241e0-1447-4840-944d-23020d0a8eb4/content>

Del Castillo, A. L. Z. (2019). Capital intelectual en instituciones de educación superior en México [Intellectual capital in higher education institutions in Mexico]. *Revista Venezolana de Gerencia*, 24(86), 489–505. <https://biblat.unam.mx/hevila/Revistavenezolanadegerencia/2019/Vol.%2024/No.%2086/10.pdf>

Del Sol-Ávila, Y. y Tapia-Bernabé, I. R. (2025). El impacto de los proyectos de intervención pedagógica en el aprendizaje significativo en estudiantes de pedagogía [The impact of pedagogical intervention projects on meaningful learning in pedagogy students]. *Revista Eduscientia. Divulgación de la ciencia educativa*, 8(16), 67–86. <https://eduscientia.com/index.php/journal/article/download/635/296>

De La Reguera, J. a. P. F., Cabezas, M. F. y Esparrell, J. F. (2019). Innovación metodológica en posgrado: aprendizaje basado en proyectos desde la interdisciplinariedad [Methodological innovation in postgraduate studies: Project-based learning from interdisciplinarity]. *Revista de Currículum y Formación del Profesorado*, 23(3), 113–128. <https://doi.org/10.30827/profesorado.v23i3.9497>

- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2020). Anuario estadístico de Veracruz [Statistical yearbook of Veracruz]. <https://www.inegi.org.mx>
- Leyva, G. A., López, R. Y., Salomón, D. J. L. y Terry, A. E. (2023). Producción agroecológica de papa (*Solanum tuberosum* L.) con semilla sexual y uso de alternativas nutritivas [Agroecological production of potato (*Solanum tuberosum* L.) with sexual seed and use of nutritional alternatives]. *Revista Cultivos Tropicales-INCA*, 44(3), 1–5. https://www.redalyc.org/journal/1932/193279250008/193279250008_2.pdf
- López-Hernández, V., Limón-Hernández, R. y Morales-Moguel, O. (2025). Diagnóstico de la generación de residuos en municipios del norte de Veracruz [Diagnosis of waste generation in municipalities of northern Veracruz]. *Revista Investigium IRE: Ciencias Sociales y Humanas*, 16(1), 136–158. <https://doi.org/10.15658/INVESTIGIUMIRE.251601.06>
- Nestlé. (2025, 5 de noviembre). Tipos de cuchillos de cocina: guía profesional para chefs [Types of kitchen knives: professional guide for chefs]. <https://www.nestleprofessional-latam.com/ve/tendencias-e-ideas/tipos-cuchillos-cocina-profesional>
- Nicholls, C. I. y Altieri, M. A. (2018). Vías para la ampliación de la agroecología [Pathways for the amplification of agroecology]. *Agroecology and Sustainable Food Systems*, 42(10), 1170–1193. <https://doi.org/10.1080/21683565.2018.1499578>
- Smith, A. y Fressoli, M. (2021). Desarrollo de un cortador automático de papa para aplicaciones en la industria alimentaria [Development of an automatic potato slicer for food industry applications]. *Journal of Food Engineering*, 132, 1–13. <https://doi.org/10.1016/j.futures.2021.102778>
- Wezel, A., Herren, B. G., Kerr, R. B., Barrios, E., Rodríguez, G. A. L. y Sinclair, F. (2020). Principios y elementos agroecológicos y sus implicaciones para la transición hacia sistemas alimentarios sostenibles: una revisión [Agroecological principles and elements and their implications for transitioning to sustainable food systems: A review]. *Agronomy for Sustainable Development*, 40, 40. <https://doi.org/10.1007/s13593-020-00646-z>

- Win, H. H., Thein, M. y Aung, C. M. (2019). Diseño y evaluación de desempeño de un cortador de papa usando ingeniería asistida por computadora [Design and performance evaluation of a potato slicer using computer-aided engineering]. *International Journal of Mechanical Engineering*, 3(2), 379–383. <https://www.irejournals.com/formatedpaper/1701544.pdf>
- Zambrano Briones, M. A., Hernández Díaz, A. y Mendoza Bravo, K. L. (2022). El aprendizaje basado en proyectos como estrategia didáctica [Project-based learning as a teaching strategy]. *Revista Conrado*, 18(84), 172–182. <http://scielo.sld.cu/pdf/rc/v18n84/1990-8644-rc-18-84-172.pdf>

Derechos de Autor© 2026 Alejandro Apolinar, María Salomé; Amores Pérez, Hugo; García González, Irma Angélica; Moreno Seceña, Carlos.



Este texto está protegido por una licencia Creative Commons 4.0, Attribution 4.0 International. Usted es libre para Compartir, copiar y redistribuir el material en cualquier medio o formato y adaptar el documento, remezclar, transformar y crear a partir del material— para cualquier propósito, incluso para fines comerciales, siempre que cumpla la condición de: Atribución: Usted debe dar crédito a la obra original de manera adecuada, proporcionar un enlace a la licencia, e indicar si se han realizado cambios. Puede hacerlo en cualquier forma razonable, pero no de forma tal que sugiera que tiene el apoyo del licenciante o lo recibe por el uso que hace de la obra.

APROVECHAMIENTO SUSTENTABLE DEL OREJÓN (ENTEROLOBIUM CYCLOCARPUM PARA LA ELABORACIÓN DE UN JABÓN BIODEGRADABLE

Sustainable utilization of orejón (Enterolobium cyclocarpum) for the production of a biodegradable soap

Ana Lilia Medellín Castillo^{1*}, Cynthia Wong Argüelles², Cuitláhuac Mojica Mesinas³

**Autor de correspondencia*

[DOI: 10.56643/rcia.v5i1.244](https://doi.org/10.56643/rcia.v5i1.244)

Como citar este artículo: Medellín Castillo, A. L., Wong Argüelles, C. y Mojica Mesinas, C. (2026). Aprovechamiento sustentable del orejón (Enterolobium cyclocarpum) para la elaboración de un jabón biodegradable. Revista Científica de Ingenierías y Arquitectura. 5(1). 67-79. <https://doi.org/10.56643/rcia.v5i1.244>

Resumen

Los jabones convencionales representan un problema ambiental significativo, pues liberan compuestos químicos persistentes que favorecen la formación de espuma en cuerpos de agua y contribuyen a procesos de eutrofización. Estos efectos alteran los ecosistemas acuáticos y generan impactos negativos en la calidad del agua y en la biodiversidad. Ante esta situación, una alternativa viable es el desarrollo de jabones biodegradables, capaces de reducir el tiempo de degradación, con lo que se minimiza el impacto ambiental asociado a su uso cotidiano (Pupiales, 2023).

El objetivo de esta investigación fue evaluar dos métodos de extracción y analizar las propiedades de las saponinas presentes en el fruto del orejón (Enterolobium cyclocarpum) para la elaboración de un jabón biodegradable. Para ello se aplicaron dos técnicas de extracción: la primera consistió en una infusión a diferentes temperaturas durante 30 minutos, mientras que la segunda se realizó mediante arrastre de vapor. Los extractos obtenidos fueron posteriormente

1 Estudiante del Tecnológico Nacional de México Campus Ciudad Valles: Ciudad Valles, San Luis Potosí. ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-5430-4092>. Correo electrónico: 23690251@tecvalles.mx

2 Doctora en Ciencias Ambientales. Instituto Tecnológico de Ciudad Valles: Ciudad Valles. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9637-5023>

3 Doctor en Gestión Educativa. Tecnológico Nacional de México Campus Ciudad Valles: Ciudad Valles, San Luis Potosí. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8585-8249>

Recibido: 14/01/2026 | Aceptado: 02/03/2026 | Publicado: 15/06/2026

Los autores declaran no tener ningún conflicto de interés. La investigación fue financiada con recursos de los autores.

filtrados y centrifugados a 2 700 rpm durante 45 minutos, empleando carbopol como agente gelificante para mejorar la calidad del producto (Ribeiro, 2014).

Con el propósito de determinar la viabilidad de los extractos, se llevaron a cabo pruebas cualitativas y cuantitativas que incluyeron la evaluación del tiempo de extracción, la formación y permanencia de espuma, el porcentaje de saponinas, así como la valoración de las características organolépticas, entre ellas, color, olor y turbidez. Los resultados mostraron que el método de arrastre de vapor presentó un rendimiento de 1.1% de saponinas y una permanencia de espuma de 95 minutos. Estos valores superaron los de los jabones comerciales biodegradables disponibles en el mercado, al demostrar mayor estabilidad de la espuma y menor presencia de residuos (Khoang et al., 2022).

En conclusión, los hallazgos sugieren que el jabón elaborado a partir del fruto del orejón constituye una alternativa sustentable y de bajo impacto ambiental frente a los productos convencionales, ofreciendo beneficios tanto en términos de eficiencia como de protección ecológica (Chris, 2011).

Palabras clave: arrastre de vapor, biodegradable, eutrofización, jabones ecológicos, saponinas vegetales.

Abstract

Conventional soaps represent a significant environmental problem, as they release persistent chemical compounds that promote foam formation in bodies of water and contribute to eutrophication processes. These effects alter aquatic ecosystems and generate negative impacts on water quality and biodiversity. In response to this situation, a viable alternative is the development of biodegradable soaps, capable of reducing degradation time and minimizing the environmental impact associated with their daily use (Pupiales, 2023).

The objective of this research was to evaluate two extraction methods and analyze the properties of saponins present in the fruit of **Enterolobium cyclocarpum** (commonly known as orejón) for the production of a biodegradable soap. Two extraction techniques were applied: the first consisted of an infusion at different temperatures for 30 minutes, while the second was performed through steam distillation. The obtained extracts were subsequently filtered and centrifuged at 2700 rpm for 45 minutes, using carbopol as a gelling agent to improve product quality (Ribeiro, 2014).

In order to determine the viability of the extracts, qualitative and quantitative tests were carried out, including the evaluation of extraction time, foam formation and persistence, saponin percentage, as well as organoleptic characteristics such as color, odor, and turbidity. The results showed that the steam distillation method yielded 1.1% saponins and a foam persistence of 95 minutes. These values surpassed those of commercially available biodegradable soaps, demonstrating greater foam stability and lower residue presence (Khoang et al, 2022).

In conclusion, the findings suggest that soap produced from the orejón fruit represents a sustainable alternative with low environmental impact compared to conventional products, offering benefits both in terms of efficiency and ecological protection (Chris, 2011).

Keywords: Biodegradable, eutrophication, ecological soaps, plant saponins, steam distillation.

Introducción

Desde tiempos ancestrales, el ser humano ha utilizado recursos naturales para cubrir necesidades básicas como la higiene personal y doméstica. Antes del desarrollo de la industria moderna del jabón, diversas culturas empleaban plantas con propiedades limpiadoras, muchas de ellas ricas en saponinas, compuestos cuyo nombre proviene del latín “sapo” (jabón) (Real Academia Nacional de Medicina de España, 2025). Estos metabolitos vegetales, presentes en raíces, frutos, hojas y cortezas de distintas especies, incluido *Enterolobium cyclocarpum*, poseen la capacidad de generar espuma, reducir la tensión superficial y emulsionar grasas, lo que permitió su uso tradicional en el lavado de ropa y utensilios, así como en la higiene corporal (Chris, 2011). Este conocimiento empírico demuestra la capacidad de las comunidades ancestrales para aprovechar recursos locales en prácticas de limpieza (Navas-Camacho et al., 1993).

E. cyclocarpum, conocido como guanacaste, orejón, parota, corotú o carocaro, pertenece a la subfamilia Mimosoideae y es nativo del Neotrópico americano. Se distribuye desde México hasta Sudamérica, incluyendo a Venezuela y Brasil, y también en el Caribe (Grisebach, 1860). Su adaptabilidad a bosques tropicales secos y húmedos ha favorecido su aprovechamiento maderable, forrajero y ornamental, prosperando incluso en áreas perturbadas como especie secundaria (Burkart et al., 1978).

El fruto de *E. cyclocarpum* es una legumbre indehisciente, coriácea y leñosa, de color pardo oscuro al madurar, con semillas duras y brillantes de aproximadamente un centímetro (Burkart, 1993). Este órgano es rico en saponinas que, al contacto con el agua, generan espuma y ejercen acción detergente y desinfectante. Por ello, los extractos del orejón se emplean en jabones, champús y limpiadores naturales de tejidos como lana, además de poseer usos medicinales como analgésico, antiséptico y cicatrizante (Chris, 2011).

El uso de jabones “duros” constituye un problema ambiental por su composición basada en hidróxidos de sodio o potasio y sales de ácidos grasos sintéticos. Estos residuos generan espuma superficial, disminuyen la oxigenación y favorecen la eutrofización, afectando la biodiversidad acuática (Pupiale, 2023). En contraste, los jabones biodegradables, elaborados con sustancias naturales degradables por microorganismos, representan una alternativa sostenible (Augustin, 2011).

En este contexto, *E. cyclocarpum* ofrece una opción viable para producir jabones biodegradables de bajo impacto ambiental. En México, algunas instituciones han promovido la sustitución de productos convencionales por alternativas biodegradables, por ejemplo, vinagre y bicarbonato de sodio, para fomentar la ecoeficiencia. La integración del conocimiento ancestral con la investigación científica moderna impulsa el aprovechamiento de recursos locales y las prácticas de higiene sostenibles (Pupiales, 2023). El presente estudio evalúa métodos de extracción y propiedades de las saponinas del fruto del orejón para elaborar un jabón biodegradable (Khoang et al., 2022).

Materiales y métodos

La investigación se realizó en la zona tenek del ejido La Lima, en el municipio de Ciudad Valles, San Luis Potosí, México. Ésta incluyó análisis fisicoquímicos, que se efectuados en el laboratorio de Química del Instituto Tecnológico de Ciudad Valles. El estudio se enfocó en la extracción de saponinas de frutos maduros de orejón (*E. cyclocarpum*), recolectados entre marzo y junio, etapa de máxima concentración de estos compuestos. La selección de frutos consideró criterios de madurez, integridad y ausencia de plagas o daños mecánicos (Secretaría de Economía, 2018).

Las muestras fueron lavadas con agua potable, para eliminar impurezas y microorganismos superficiales, secadas a temperatura ambiente bajo ventilación

controlada para evitar la degradación térmica de los compuestos activos y posteriormente molidas, con el fin de aumentar la superficie de contacto y mejorar la eficiencia de extracción (El Hosry, 2025).

El proceso experimental utilizó matraces Erlenmeyer de 1 000 mililitros, planchas de calentamiento eléctrico, contenedores para calentamiento solar, tubos de ensayo, centrífuga, balanza analítica, termopares digitales y bitácoras de registro. Se aplicaron tres métodos principales que se describen a continuación:

1. Extracción térmica controlada: mezcla de fruto molido y agua destilada en proporción 1:2 (p / V), calentada a una temperatura de entre 60 y 90°C durante 30 minutos, realizando monitoreo constante. El extracto se filtró y clarificó mediante centrifugación a 2 700 rpm durante 45 minutos.

2. Extracción solar: mezcla fruto-agua expuesta a calentamiento solar durante 30 minutos, seguida de filtración y centrifugación.

3. Arrastre de vapor: fruto molido sometido a vapor durante una hora, con recuperación del líquido, filtración y clarificación por centrifugación.

En todos los casos, al extracto clarificado se añadió carbopol, agitando hasta obtener una mezcla homogénea. El producto final se envasó en recipientes desinfectados, etiquetados con información de la extracción y la fecha de elaboración, que fueron almacenados bajo condiciones controladas de temperatura y humedad (Pupiales, 2023).

Las variables de estudio incluyeron: (a) temperatura de extracción 60-90°C, solar y arrastre de vapor); (b) tiempo de infusión 30 minutos en térmica, ocho horas en solar y 180 minutos en arrastre de vapor); (c) concentración de saponinas, evaluada mediante propiedades de espuma y análisis químico UV-Vis; (d) claridad del extracto tras centrifugación y (e) homogeneidad del gel con carbopol.

El análisis estadístico se expresó como el promedio $\pm$ desviación estándar ($\bar{X} \pm S$), comparando concentraciones de saponinas según temperatura y método de extracción. Los resultados se graficaron en función del tiempo y el porcentaje de peso, asegurando su reproducibilidad y permitiendo la comparación entre los tratamientos evaluados.

Resultados

La evaluación de la extracción de saponinas de frutos maduros de orejón (*E. cyclocarpum*) incluyó parámetros cualitativos como espuma, color, olor, turbidez y presencia de microorganismos (tabla 1), y parámetros cuantitativos: tiempo de permanencia de la espuma, duración de la extracción y contenido de saponinas (tabla 2). Los métodos aplicados permitieron determinar la eficiencia del proceso y la calidad sensorial y microbiológica del extracto, aspectos clave para las buenas prácticas en la industria cosmética e higiénica.

En la tabla 1 se observa que todas las condiciones de extracción generaron espuma y estuvieron libres de microorganismos, excepto la extracción directa por calor a 60°C, en la que se detectó contaminación microbiana. Este resultado subraya la importancia de controlar temperatura, tiempo y manipulación, ya que al no alcanzar la pasteurización a 63°C se favorece la proliferación de microorganismos indeseados. El color del extracto varió de claro (60-65°C) a muy oscuro (90°C y arrastre de vapor), lo que indica que el aumento de la temperatura facilita la liberación de compuestos pigmentados, posiblemente asociados a la descomposición de moléculas vegetales complejas o a reacciones de Maillard parciales (El Hosry et al., 2025).

Figura 1.

Proceso de elaboración



Tabla 1.*Parámetros cualitativos*

Método / °C	Espuma	Color	Olor	Turbidez	Presencia de microorganismos
60	Sí	Claro	Poco Fuerte	Media	Positivo
65	Sí	Claro	Poco Fuerte	Media	Negativo
70	Sí	Poco oscuro	Fuerte	Media	Negativo
75	Sí	Poco oscuro	Fuerte	Alta	Negativo
80	Sí	Oscuro	Fuerte	Alta	Negativo
85	Sí	Oscuro	Fuerte	Alta	Negativo
90	Sí	Muy oscuro	Intenso	Alta	Negativo
Arrastre de Vapor	Sí	Muy oscuro	Suave	Baja	Negativo

El olor aumentó con la temperatura, aunque el arrastre de vapor generó un aroma más suave y delicado, preservando mejor los compuestos volátiles. La turbidez también creció con la temperatura, pero el arrastre de vapor mostró baja turbidez, mejorando la apariencia y calidad del extracto.

Tabla 2.*Resultado de las pruebas cuantitativas de extracción de saponinas a diferentes temperaturas, solar y por el proceso de arrastre de vapor*

Método (°C)	Permanencia de Espuma (min)	Tiempo de Extracción (min)	Saponinas (%)
60	30	120	0.61
65	45	90	0.63
70	45	85	0.66
75	45	80	0.68
80	48	75	0.72
85	48	70	0.75

90	48	65	0.81
Arrastre de Vapor	95	45	1.10

En el análisis cuantitativo (tabla 2) se observó que el contenido de saponinas aumentó progresivamente con la temperatura de extracción, alcanzando un máximo de 0.81% a 90°C. Este comportamiento coincide con lo reportado por Ribeiro et al. (2014) en *Polyscias fruticosa*, donde el incremento de 35°C a 55°C favoreció el rendimiento y la concentración de saponinas, aunque a 75°C se registró una disminución por degradación térmica. De manera similar, Khoang et al. (2022) señalaron que el rendimiento aumenta hasta un punto óptimo, pero decrece al superarse dicho límite debido a la desnaturalización de los compuestos. Los resultados obtenidos en *E. cyclocarpum* sugieren que la estabilidad térmica de las saponinas es determinante en la eficiencia de extracción.

El método de arrastre de vapor se destacó por lograr un tiempo de permanencia de espuma de 95 minutos, muy superior al observado a otras temperaturas (30–48 minutos). Esta característica es esencial en la formulación de jabones biodegradables, pues investigaciones previas muestran que sólo algunos extractos mantienen la espuma más allá de 10 minutos, lo que indica un mejor perfil como biosurfactante. Además, el arrastre de vapor exigió un tiempo de extracción corto (45 minutos), más eficiente que tratamientos prolongados que requieren mayor energía y pueden degradar compuestos activos.

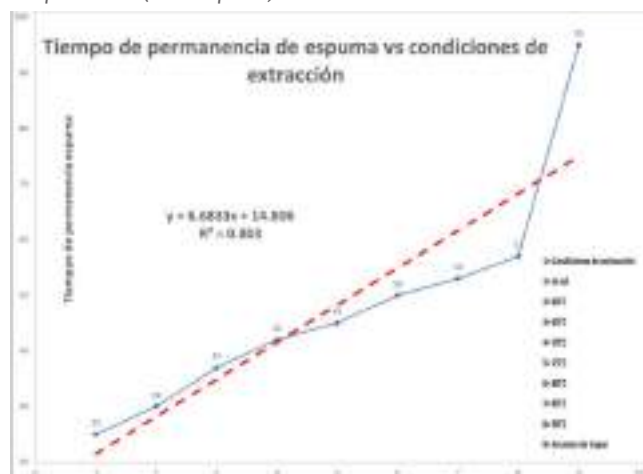
La combinación de alto rendimiento en saponinas, estabilidad de espuma, baja turbidez, olor suave y ausencia de microorganismos confirma que el arrastre de vapor es el método más adecuado para producir jabón biodegradable, ya que optimiza la eficiencia, la calidad sensorial y la seguridad microbiológica. Estos hallazgos coinciden con los de Augustin et al. (2011) y Babayemi (2006), quienes señalaron que las saponinas presentan mayor solubilidad y eficiencia de extracción a temperaturas elevadas, hasta alcanzar un punto de equilibrio en que el exceso de calor puede inducir degradación. En este estudio, la condición de arrastre de vapor saturado (100°C) produjo el mayor rendimiento sin evidencia de deterioro visible.

La figura 2 muestra el incremento en la concentración de saponinas (% peso) obtenida a diferentes temperaturas de extracción. Los resultados obtenidos confirman el potencial del orejón como recurso local estratégico para la producción de productos de higiene sustentables, lo que se alinea con la creciente

necesidad de reducir el impacto ambiental generado por el uso de jabones convencionales basados en surfactantes sintéticos. La utilización de este recurso propicia la valorización de especies nativas con alto contenido de saponinas y la promoción de prácticas productivas más responsables y cercanas a principios de economía circular. En este sentido, los jabones elaborados con extractos naturales muestran una rápida biodegradabilidad y menor persistencia en ecosistemas acuáticos, lo que disminuye los riesgos asociados a la acumulación de compuestos químicos y contribuye a la protección ambiental a largo plazo.

Figura 2.

Cantidad de saponinas (% en peso)



Conclusiones

El presente estudio demostró que el método de arrastre de vapor es la técnica más eficiente para la extracción de saponinas de frutos maduros de orejón (*E. cyclocarpum*). En este sentido, se logró una mejor calidad del extracto en comparación con el obtenido por el método de extracción a diferentes temperaturas, con un rendimiento de 1.10%, un tiempo de permanencia de espuma de 95 minutos y baja turbidez; además, se generó un extracto con aroma suave y libre de contaminación microbiana. Asimismo, se redujo la intensidad del olor y se mantuvo controlada la turbidez, asegurando la ausencia de microorganismos, lo que resulta en un jabón sensorialmente agradable y ambientalmente seguro.

Este trabajo expuso el uso potencial del orejón como recurso local estratégico para la producción de productos de higiene sustentables, de manera de contribuir a la reducción del impacto ambiental asociado a los jabones convencionales basados en surfactantes sintéticos. La valorización de esta especie nativa con alto contenido de saponinas promueve prácticas productivas más responsables y alineadas con los principios de economía circular en las regiones donde se desarrolla. Este estudio constituye una primera aproximación; como a futuro se realizarán otros estudios, no se realizaron ciertas evaluaciones complementarias que permitirían caracterizar de manera integral el producto y su impacto ambiental. Entre éstas se incluyen: análisis detallado de la composición química del extracto (perfil específico de saponinas y otros metabolitos), estudios experimentales de biodegradabilidad en agua y suelo, caracterización fisicoquímica del jabón final (pH, humedad, dureza, estabilidad, tiempo de degradación ambiental), pruebas de toxicidad acuática y comparación por “NMX-Q-003-NYCE-2018” con jabones biodegradables comerciales.

Estas evaluaciones representan una oportunidad para investigaciones futuras, que permitirán optimizar el proceso de producción, caracterizar de manera completa el jabón formulado, confirmar su menor impacto ambiental frente a tensoactivos sintéticos y evaluar la viabilidad de escalado y la comparación de costos con productos comerciales.

Referencias

- Babayemi, O. J. (2006). Factores antinutricionales, valor nutritivo y producción de gas in vitro del follaje y frutos de *Enterolobium cyclocarpum* [Antinutritional factors, nutritive value and in vitro gas production of foliage and fruits of *Enterolobium cyclocarpum*]. *World Journal of Zoology*, 1(2), 113–117.
- Burkart, A. (1978). Flora ilustrada de Entre Ríos (Argentina), parte III. Dicotiledóneas Metaclamídeas. A: Salicales a Rosales (Incluso Leguminosas). Editorial Instituto Nacional Agropecuario, Colección Científica INTA.
- Burkart, L. R. (1993). Leguminosae. En A. L. Cabrera (Ed.), *Flora de la provincia de Buenos Aires* (vol. 5, pp. 1–552). Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA).
- Ecología. (14 de noviembre de 2024). Saponinas: qué son y sus usos en productos de limpieza natural. *Vida Ecológica*. <https://vidaecologica.info/saponinas-que-son-y-sus-usos-en-productos-de-limpieza-natural/>
- El Hosry, L., Elias, V., Chamoun, V., Halawi, M., Cayot, P., Nehme, A. y Bou-Maaron, E. (2025). Reacción de Maillard: mecanismo, parámetros que influyen, ventajas, inconvenientes y aplicaciones en la industria alimentaria: una revisión [Maillard reaction: Mechanism, influencing parameters, advantages, disadvantages, and food industrial applications: A review]. *Foods*, 14(11), 1881. <https://doi.org/10.3390/foods14111881>
- Khoang, L. T., Huyen, H. T. T., Van Chung, H., Duy, L. X., Toan, T. Q., Bich, H. T., Minh, P. T. H., Pham, D. T. N. y Hien, T. T. (2022). Optimización de la extracción de saponinas totales de raíces de *Polyscias fruticosa* mediante el método asistido por ultrasonido y metodología de superficie de respuesta [Optimization of total saponin extraction from *Polyscias fruticosa* roots using the ultrasonic-assisted method and response surface methodology]. *Processes*, 10(10), 2034. <https://doi.org/10.3390/pr10102034>
- Pupiales Brusil, J. P. (2023). Evaluación del impacto ambiental entre productos tensoactivos: caso shampoo convencional y shampoo ecológico [Environmental impact assessment between surfactant products: conventional shampoo vs. eco-friendly shampoo] [Tesis de licenciatura, Universidad Técnica del Norte].

- Ribeiro, A. B., Oliveira, J. V. y Oliveira, A. P. (2014). Optimización de la extracción de saponinas de *Polyscias fruticosa* usando metodología de superficie de respuesta [Optimization of saponin extraction from *Polyscias fruticosa* using response surface methodology]. *Industrial Crops and Products*, 52, 702–708. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2013.11.034>
- Rodríguez, R. y Fondevila, M. (2012). Efecto de las saponinas de *Enterolobium cyclocarpum* sobre la fermentación microbiana in vitro del pasto tropical *Pennisetum purpureum* [Effect of saponins from *Enterolobium cyclocarpum* on in vitro microbial fermentation of the tropical grass *Pennisetum purpureum*]. *Journal of Animal Physiology and Animal Nutrition*, 96(5), 762–769. <https://doi.org/10.1111/j.1439-0396.2011.01161.x>
- Secretaría de Economía. (2018). NMX-Q-003-NYCE-2018: Jabón de tocador — especificaciones y métodos de prueba [Laundry soap — specifications and test methods]. Dirección General de Normas.

Derechos de Autor© 2026 Medellín Castillo, Ana Lilia; Wong Arguelles, Cynthia; Mojica Mesinas, Cuitláhuac.



Este texto está protegido por una licencia [Creative Commons 4.0, Attribution 4.0 International](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/). Usted es libre para Compartir, copiar y redistribuir el material en cualquier medio o formato y adaptar el documento, remezclar, transformar y crear a partir del material— para cualquier propósito, incluso para fines comerciales, siempre que cumpla la condición de: Atribución: Usted debe dar crédito a la obra original de manera adecuada, proporcionar un enlace a la licencia, e indicar si se han realizado cambios. Puede hacerlo en cualquier forma razonable, pero no de forma tal que sugiera que tiene el apoyo del licenciante o lo recibe por el uso que hace de la obra.

COMPARACIÓN DE DOS SOLUCIONES ORGÁNICAS NUTRITIVAS EN LA SOBREVIVENCIA DEL PIMIENTO MORRÓN, *CAPSICUM ANNUUM*, CULTIVADO EN HIDROPONÍA

Comparison of two organic nutrient solutions on the survival of Capsicum annuum bell pepper grown hydroponically

Saúl Fernández Arauz¹ *, Luis Roberto Bonilla Toscano² , Montserrat Gómez Sulvarán³

*Autor de correspondencia

[DOI: 10.56643/rcia.v5i1.245](https://doi.org/10.56643/rcia.v5i1.245)

Como citar este artículo: Fernández Arauz, S., Bonilla Toscano, L. R. y Gómez Sulvarán, M. (2026). Comparación de dos soluciones orgánicas nutritivas en la sobrevivencia del pimiento morrón, *Capsicum annuum*, cultivado en hidroponía. Revista Científica de Ingenierías y Arquitectura. 5(1). 80-97. <https://doi.org/10.56643/rcia.v5i1.245>

Resumen

La horticultura sustentable bajo sistemas hidropónicos destaca por su eficiencia en el uso de recursos hídricos y la integración de nutrientes. Este estudio evaluó el efecto de tres soluciones en la sobrevivencia de *Capsicum annuum* cultivado en tezontle rojo, a saber: lixiviado de estiércol de borrego (lb) diluido en agua potable (1:10), té de residuos orgánicos (tro) y agua potable como testigo (Ti). La investigación se condujo siguiendo un enfoque cuantitativo. Así, se empleó un diseño que estableció tres tratamientos con 20 repeticiones, uno denominado testigo y dos alternativos, con la finalidad analizar el efecto provocado por los tratamientos aplicados sobre el desarrollo del cultivo de pimiento morrón (*Capsicum annuum*). Esta comparación permitió identificar diferencias entre los resultados obtenidos. Se sembraron 400 semillas en al-

¹ Alumno de Ingeniería en Agronomía. Universidad del Valle de Puebla. Línea de investigación: Evaluación del impacto de soluciones nutritivas, hidroponía, sustentabilidad. ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-0857-0097> . Correo electrónico: lg47754@uvp.edu.mx

² Maestro en Ciencias en Biodiversidad y Conservación. Director de la división de Ciencias de la Vida. Universidad del Valle de Puebla. Líneas de investigación: reconstrucción de paisajes, "Paleontología, sustentabilidad. ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-5760-5873>. Correo electrónico: dirvida@uvp.mx

³ Alumna de Ingeniería en Agronomía. Universidad del Valle de Puebla. Línea de investigación: Evaluación del impacto de soluciones nutritivas, hidroponía, sustentabilidad. ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-2619-8221>. Correo electrónico: ig46611@uvp.edu.mx

Recibido: 17/01/2026 | Aceptado: 02/03/2026 | Publicado: 15/06/2026

Los autores declaran no tener ningún conflicto de interés. La investigación fue financiada con recursos de los autores.

máxicos de plástico durante dos semanas; a los 35 días las plántulas fueron trasplantadas a bolsas con capacidad de 10 litros con un sistema de riego por goteo. Se determinó el porcentaje de sobrevivencia por tratamiento mediante una prueba de lifetest. Los análisis mostraron diferencias significativas entre tratamientos (Gehan-Breslow-Wilcoxon $p = 0.0083$; Logrank test for trend $p = 0.0311$). tro presentó la mayor mediana de sobrevivencia (35.5 días), seguido de lb (32.5 días) y Ti (22 días). El primer suceso de muerte se registró a los 22 días después del trasplante en Ti y lb. tro mantuvo 100% de sobrevivencia hasta el día 30, evidenciando mayor resistencia, por lo que se concluye que tro favorece la sobrevivencia del cultivo.

Palabras clave: Agronomía, Análisis estadístico, Aprovechamiento de Recursos, Hidroponía, Sobrevivencia.

Abstract

Sustainable horticulture using hydroponic systems is notable for its efficient use of water resources and nutrient integration. This study evaluated the effect of three solutions—sheep manure leachate (LB) diluted in potable water (1:10), organic waste tea (TRO), and potable water as a control (Ti)—on the survival of *Capsicum annuum* grown on red tezontle soil. The research was conducted using a quantitative approach, employing a design with three treatments and 20 replicates each: one control and two alternative treatments. The aim was to analyze the causal effect of the applied treatments on the development of the bell pepper (*Capsicum annuum*) crop. This comparison allowed for the identification of differences in the results obtained. Four hundred seeds were sown in plastic seed trays for two weeks. After 35 days, the seedlings were transplanted into 10-liter bags with a drip irrigation system. The survival percentage for each treatment was determined using a lifetest. The analyses showed significant differences between treatments (Gehan-Breslow-Wilcoxon $p = 0.0083$; Logrank test for trend $p = 0.0311$). TRO had the longest median survival (35.5 days), followed by LB (32.5 days) and Ti (22 days). The first death event was recorded 22 days after transplantation in Ti and LB. TRO maintained 100% survival until day 30, demonstrating greater resistance and concluding that TRO favors culture survival.

Keywords: Agronomy, statistical analysis, resource utilization, hydroponics, survival.

Introducción

El abuso de los recursos naturales, el uso de combustibles fósiles y de tóxicos han provocado la contaminación del agua, el suelo y de los productos con que nos alimentamos, dañando de manera directa a los seres vivos de la tierra (Velázquez y Castro, 2018)

A lo largo de la historia de la humanidad, la agricultura se constituyó como un pilar fundamental para el desarrollo cultural, social y económico de las civilizaciones. Desde los primeros asentamientos humanos hasta la consolidación de complejas organizaciones sociales, las actividades agrícolas han permitido que las comunidades aseguren la disponibilidad de alimentos, fortalezcan sus sistemas de subsistencia y garanticen las condiciones necesarias para su crecimiento demográfico. Este proceso no sólo marcó la transición hacia sociedades más estables, sino que abrió la posibilidad de construir estructuras políticas, económicas y culturales cada vez más sofisticadas. En consecuencia, la agricultura no debe entenderse únicamente como una actividad productiva, sino como un factor decisivo que definió el rumbo de la evolución social (Medina, 2024).

En la actualidad, esta actividad milenaria atraviesa una etapa de transformación sin precedentes, resultado de la interacción entre descubrimientos científicos, avances tecnológicos y un conocimiento cada vez más profundo sobre los sistemas ecológicos y biológicos. La incorporación de estas innovaciones dio origen a una nueva etapa en la agricultura contemporánea, en la que las prácticas tradicionales, que durante siglos sostuvieron la producción de alimentos, fueron sustituidas por metodologías de alta precisión; entre éstas destacan la agricultura digital, el uso de inteligencia artificial aplicada a la gestión de cultivos, la expansión de sistemas hidropónicos y aeropónicos, además del uso de sensores inteligentes y datos provenientes de plataformas satelitales para la toma de decisiones (Medina, 2024).

El pimiento morrón, como se le conoce comúnmente en México, tiene su origen en América, desarrollándose en regiones del centro y el norte de Sudamérica. En la actualidad se ha consolidado como uno de los principales productos hortícolas destinados a la exportación de diversos países, como Canadá, Estados Unidos y España. Es un producto atractivo por sus característicos colores vibrantes, los cuales dependen de su estado de maduración y su bajo contenido en capsaicina. Ello le otorga una gran versatilidad en la cocina mexicana e internacional, pues tiene aromas y sabores distintivos que hacen que sea

utilizado como un condimento o un vegetal con alto contenido de nutrientes (Servicio Nacional de Sanidad, Inocuidad y Calidad Agroalimentaria, 2024).

En México, el pimiento morrón se cultiva predominantemente bajo esquemas de agricultura protegida, lo que asegura su disponibilidad durante todo el año. Cerca de 50% de la producción nacional se realiza en estas condiciones, destacando el estado de Sinaloa como el principal productor del pimiento morrón a cielo abierto, con una aportación anual de 166 000 toneladas (Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural, 2022).

En los últimos años ha ganado relevancia la hidroponía, una técnica de cultivo sin suelo que utiliza soluciones minerales nutritivas, debido a su eficiencia en el uso de recursos hídricos y su viabilidad para la producción de hortalizas en espacios urbanos o reducidos. Entre sus principales ventajas se encuentra la reducción de costos, la eliminación del uso de maquinaria agrícola, el aprovechamiento del espacio y las facilidades que brinda para cultivar en zonas urbanas, como azoteas y espacios reducidos, así como la posibilidad de tener cosecha fuera de temporada (Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural, 2015).

En este marco, el uso de agroquímicos como componente central del paquete tecnológico destinado a la producción agrícola enfrenta serios cuestionamientos por sus efectos sobre el ambiente y sobre la inocuidad de los alimentos y la salud humana. En relación con lo anterior, los bioinsumos representan un medio que permite abordar diversas problemáticas, entre ellas, el combate y la regulación de plagas y enfermedades, la inducción de defensas y la promoción del crecimiento y el desarrollo vegetal sin demandar derivados de recursos no renovables para su producción ni dejar trazas de residuos tóxicos en los alimentos.

Los desarrollos existentes tienden a aplicarse por medio de métodos compatibles con las técnicas tradicionalmente utilizadas por los productores y presentan precios de mercado competitivos.

Por esto, los sistemas hidropónicos sustentan el uso de diversos sustratos e incluso la ausencia de los mismos para la producción. En México existen diversos tipos de sustratos en el mercado; no obstante, una desventaja es que la mayoría son importados de otros países, lo que deriva en un aumento en los costos de producción. Por esto, para el cultivo hidropónico se recomiendan los sustratos regionales, dada su disponibilidad y su menor costo (Cruz-Campos et al., 2016).

Con base en lo antes mencionado, resulta necesario explorar alternativas que favorezcan los sistemas hidropónicos mediante el uso de bioinsumos, lo que contribuirá a la reducción de costos para los productores. Una de estas alternativas puede ser el uso de soluciones elaboradas a partir de residuos orgánicos ricos en nutrientes esenciales.

En este sentido, el objetivo central de este proyecto fue evaluar el efecto de tres soluciones para riego —lixiviado de estiércol de borrego (lb) diluido en agua potable (1:10), té de residuos orgánicos (tro) y agua potable como testigo (Ti)— en la sobrevivencia de *Capsicum annuum* cultivado en tezontle rojo en condiciones de invernadero como una alternativa para mejorar su rendimiento y calidad mediante una evaluación comparativa y controlada de los tratamientos propuestos.

Materiales y métodos

Área de estudio

Este estudio se llevó a cabo en la ciudad de Puebla, perteneciente al territorio del altiplano central de México. Esta región destaca por su gran importancia económica y urbana; además, se posiciona como un área de oportunidad para la elaboración de investigaciones con enfoque en sostenibilidad agraria en zonas periurbanas.

Las coordenadas geográficas del área comprenden los paralelos 18° 50' y 19° 14' de latitud norte, y los meridianos 98° 01' y 98° 18' de longitud oeste, según datos del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (inegi, 2010).

La fase práctica y experimental se realizó en las instalaciones del laboratorio y vivero del Centro de Innovación, Medio Ambiente y Sostenibilidad (cimas), perteneciente a la Universidad del Valle de Puebla (uvp), ubicado en la calle 2 Sur #5732, de la ciudad de Puebla.

Posteriormente, se instaló el sistema hidropónico en el invernadero del cima, ubicado en la misma zona en que se realizaron la siembra y el trasplante.

Diseño experimental

El diseño experimental se aplicó completamente al azar, ya que se asignó cada tratamiento sin seguir un orden específico, con el fin de evitar sesgos y asegurar resultados que reflejen el efecto de cada uno de ellos.

De forma simultánea se prepararon dos tratamientos experimentales. El primero fue un lixiviado de estiércol de borrego (lb) elaborado a partir de materia fresca siguiendo un protocolo específico, para garantizar su contenido nutritivo y su inocuidad de manera controlada; el segundo consistió en un té de residuos orgánicos (tro), en el que se utilizaron como materia prima desechos orgánicos provenientes de la cocina de cinco hogares distintos, los cuales fueron recolectados, clasificados y utilizados con el objetivo de obtener una solución rica en compuestos beneficiosos para el desarrollo vegetal. Ambos fueron realizados en el Laboratorio de Ciencias del Medio Ambiente y Sostenibilidad (cimas) de la Universidad del Valle de Puebla. Además de un tratamiento testigo sin fertilización.

Preparación de los tratamientos

Se aplicaron tres tratamientos, realizándose 20 repeticiones de cada uno. Dichos tratamientos son los descritos a continuación.

El tratamiento 1 (T1) consistió en la dilución del lixiviado de borrego en agua, en una proporción de 1:10 dentro de un contenedor de 100 litros. Para ello se recolectó estiércol fresco de borrego. Posteriormente se lo combinó con agua potable dentro de recipientes de 100 litros, utilizando una relación 1:3 (una de estiércol por tres de agua potable), lo cual permitió generar una mezcla homogénea.

Una vez preparada, la mezcla se mantuvo cubierta y en reposo para favorecer su proceso de fermentación, el cual se extendió durante tres semanas. Transcurrido ese periodo de tiempo, se llevó a cabo el filtrado con el propósito de separar sólidos y obtener un lixiviado limpio. El producto restante se colocó nuevamente en contenedores con capacidad de 100 litros y se mezcló con agua potable en una relación de 1:10 (una parte de lixiviado por 10 de agua potable). Luego, la mezcla obtenida se aplicó como nuestro primer tratamiento.

Para el tratamiento 2 (T2), que corresponde al té de residuos orgánicos (tro), se recolectaron desechos procedentes de las cocinas de cinco estudiantes de

la Universidad del Valle de Puebla, evitando de manera intencional aquellos de origen cítrico con el fin de prevenir la presencia de compuestos que pudieran alterar la acidez de la mezcla o afectar el desarrollo de las plantas.

Una vez reunidos, los residuos se integraron y se colocaron en una olla con capacidad de 50 litros, a la que se adicionó agua potable. El contenido se llevó a ebullición y tras alcanzar este punto, se permitió que enfriara de manera natural hasta llegar a la temperatura ambiente. Posteriormente se realizó un colado con el propósito de separar los sólidos de la fracción líquida, obteniéndose un té orgánico de color claro. El extracto obtenido fue vertido en contenedores con capacidad de 100 litros, en los cuales se diluyó nuevamente con agua potable en una proporción 1:10 (una parte de té por diez de agua), para luego ser aplicado a las muestras.

Como parte del diseño experimental, se estableció un tratamiento testigo cuyo objetivo fue contar con una referencia base que permitiera evaluar de manera comparativa los efectos de los tratamientos enriquecidos. Este tratamiento consistió en el uso exclusivo de agua potable, la cual fue aplicada sin ningún tipo de enriquecimiento, es decir, sin la incorporación de nutrientes, bioestimulantes o cualquier otro aditivo. El agua utilizada provenía de una fuente segura y apta para consumo humano, cumpliendo con los estándares de calidad requeridos. Este tratamiento permitió observar el desarrollo de las plantas bajo condiciones mínimas de aporte nutricional, limitándose únicamente a la hidratación proporcionada por el riego.

Para la realización de este proyecto se utilizaron semillas de *Capsicum annum* L. var. *grossum*, las cuales fueron obtenidas de frutos maduros adquiridos directamente en uno de los mercados locales de la ciudad de Puebla. Su selección se realizó tomando en cuenta sus características morfológicas y su estado de madurez, con el fin de asegurar la viabilidad y homogeneidad de las semillas utilizadas.

Se prepararon y dispusieron dos charolas germinadoras, cada una con una capacidad de 200 cavidades. Éstas fueron llenadas de manera uniforme con tierra negra mezclada con tierra volcánica, seleccionada como sustrato debido a su estructura física ligera, su capacidad para permitir la aireación de las raíces y su eficiencia para retener la humedad necesaria sin llegar a provocar encharcamientos o saturación de agua.

Luego se llenaron 60 bolsas negras con capacidad de 10 litros; el sustrato elegido para esta etapa por sus características físicas que favorecen el desarrollo radicular fue tezontle rojo.

Para la preparación de los tratamientos experimentales se habilitaron contenedores de plástico con una capacidad individual de 100 litros cada uno. Dichos recipientes se conectaron a una red de mangueras diseñadas específicamente para sistemas hidropónicos. Esta red de distribución permitió el suministro controlado de la solución nutritiva a cada una de las plantas a través de goteros tipo estaca, asignando un gotero individual por planta, con la finalidad de asegurar una aplicación uniforme y eficiente del riego.

Figura 1.

*Sistema hidropónico en chile pimiento morrón (*Capsicum annuum* L. var. *grossum*) conformado por bolsas negras con tezontle como sustrato bajo condiciones de invernadero*



Trasplante de plántulas

A partir del momento en que comenzó a evidenciarse la emergencia de plántulas, se procedió a realizar una medición diaria, con el propósito de llevar un registro preciso y continuo del desarrollo, principalmente de la altura de cada una de ellas. Este monitoreo periódico se llevó a cabo durante 35 días; al término de este periodo se confirmó que las plántulas habían alcanzado una altura promedio de 10 centímetros aproximadamente (Sánchez et al., 2016).

La capacidad germinativa se evaluó mediante el conteo del número de semillas que lograron germinar en cada una de las charolas utilizadas. En la charola 1 se registró la germinación de 56 semillas, lo que representa 28% del total sembrado. En la charola 2, germinaron 70 semillas, correspondientes a 35% del total. Estos resultados evidencian una baja tasa de germinación general, con una ligera diferencia entre ambas charolas (tabla 1).

Tabla 1.

Capacidad germinativa.

Situación germinativa	Charola 1	Charola 2
Semillas por charola	200 → 100%	200 → 100%
Semillas germinadas	56 → 28%	70 → 35%
Nota: La tabla muestra los porcentajes de germinación de plantas de chile pimiento morrón (<i>Capsicum annuum</i> L. var. <i>Grossum</i>) en cada una de las charolas utilizadas.		

Una vez alcanzada esta altura y considerándola adecuada se procedió a la siguiente etapa del proceso: las plántulas fueron trasplantadas a bolsas de polietileno color negro previamente llenadas con tezontle rojo.

Figura 2.

*Trasplante de plántulas de chile pimiento morrón (*Capsicum annuum* L. var. *gros-sum*) a contenedores finales bajo condiciones de invernadero.*

Mantenimiento del cultivo



Cada uno de los tratamientos experimentales y el tratamiento control recibieron riego de manera regular y controlada, con una duración diaria de 40 minutos, únicamente de lunes a viernes. Durante el fin de semana, específicamente sábado y domingo, el riego se suspendió para simular condiciones variables de humedad y permitir la evaluación de la capacidad de retención del sustrato, así como para poder observar la respuesta fisiológica de las plantas ante breves periodos sin riego.

De manera simultánea se realizaron observaciones diarias y sistemáticas del estado general de salud, poniendo especial atención a la aparición de signos de estrés hídrico, falta de nutrientes, daños físicos, presencia de plagas o cualquier posible enfermedad fitopatológica.

Análisis estadístico

Para evaluar la tasa de supervivencia de las plántulas bajo los distintos tratamientos, se empleó un análisis de supervivencia utilizando el procedimiento lifetest mediante el software prism (GraphPad Software, Inc., 2012). Este tipo de análisis es especialmente útil cuando se desea evaluar no sólo el número de individuos que sobreviven, sino también cuánto tiempo sobreviven bajo determinadas condiciones.

Por medio de esta prueba se estimó la función de supervivencia para cada tratamiento a lo largo del tiempo; de esta forma fue posible determinar diferencias significativas en la permanencia y viabilidad de las plántulas durante el periodo experimental.

Resultados

Los resultados obtenidos evidencian una baja tasa de germinación general, con una ligera diferencia entre ambas charolas (tabla 1). Estos bajos niveles podrían deberse a diferentes factores como la viabilidad de la semilla, las condiciones ambientales durante la siembra, que en este caso se realizó en un lugar cerrado con condiciones no controladas pero constantes, entre otros. Estos aspectos deben considerarse para evaluar las etapas iniciales, que pueden influir en la uniformidad del trasplante y el rendimiento final del cultivo (Moreno et al., 2011).

La evaluación de la sobrevivencia en plantas de chile pimiento morrón (*Capsi-cum annuum L. var. grossum*) sometidas a tres tratamientos orgánicos reveló diferencias marcadas durante el periodo de análisis. La figura 3 presenta las curvas de supervivencia correspondientes a los distintos tratamientos: lixiviado de estiércol de borrego (lb), té de residuos orgánicos (tro) y agua potable como testigo (Ti). El día 0 de la gráfica corresponde al momento del trasplante.

El tratamiento con tro mostró mayor eficacia, pues mantuvo la sobrevivencia de 100% de las plántulas hasta el día 30 después del trasplante. En contraste, los primeros eventos de muerte se registraron desde el día 22 en los tratamientos Ti y lb. La mediana de supervivencia fue mayor en tro (35.5 días), seguida de lb (32.5 días), mientras que Ti mostró la mediana más baja, con sólo 22 días.

Considerando la totalidad de los días de evaluación, las plantas tratadas con tro conservaron consistentemente los valores más altos de sobrevivencia, mientras que Ti presentó una reducción progresiva más pronunciada. Este comportamiento sugiere que el tro generó un entorno más favorable para la adaptación y resistencia de las plantas en la etapa crítica posterior al trasplante, posiblemente debido a su aporte de nutrientes solubles, compuestos bioestimulantes y microorganismos benéficos presentes en la mezcla orgánica. Este resultado concuerda con reportes previos (Vela et al., 2018; Gutiérrez et al., 2023) sobre el uso de lixiviados de composta y extractos orgánicos como bioinsumos líquidos que favorecen el establecimiento de plántulas en cultivos hortícolas.

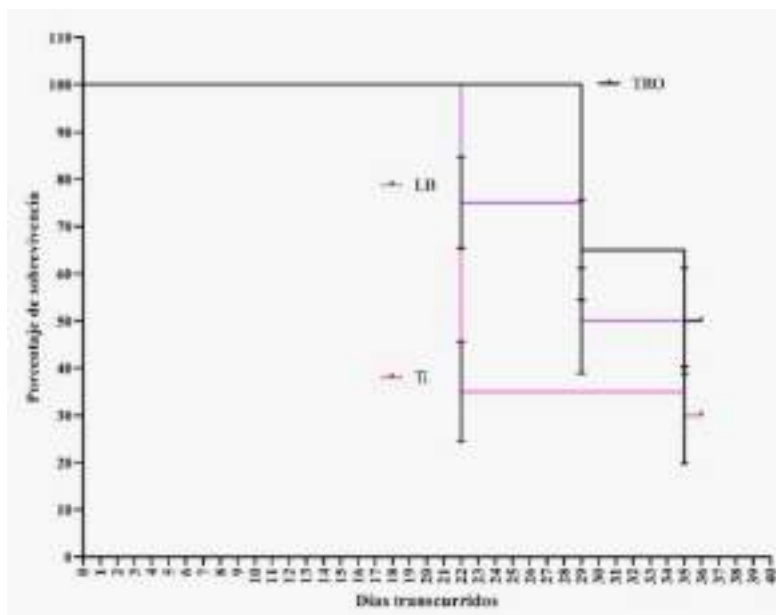
El tratamiento con lixiviado de estiércol de borrego (lb), diluido en una proporción 1:10 con agua potable, mostró un desempeño intermedio. Si bien fue más efectivo que el testigo, su curva de sobrevivencia reflejó un descenso más temprano y sostenido, lo que da cuenta de un efecto benéfico limitado o de menor duración sobre la vitalidad de las plantas. Estudios como el de Vela et al. (2018) han reportado beneficios similares, pero subrayan la importancia del equilibrio en la relación carbono nitrógeno y de la mineralización eficiente para sostener el crecimiento inicial.

Los resultados mostraron diferencias significativas entre tratamientos (Gehan-Breslow-Wilcoxon $p = 0.0083$; Logrank test for trend $p = 0.0311$). Se utilizó el software prism (GraphPad, Inc., 2012).

En conjunto, los resultados indican que el uso de té de residuos orgánicos (tro) mejora significativamente la sobrevivencia, por lo que puede considerarse como una estrategia agroecológica prometedora para fortalecer el establecimiento inicial del cultivo y reducir las pérdidas asociadas al estrés por trasplante. No obstante, la baja germinación inicial señala la necesidad de optimizar las condiciones pregerminativas y de trasplante, así como de evaluar la calidad y viabilidad de la semilla, con la finalidad de maximizar los beneficios potenciales de los bioinsumos en sistemas hidropónicos.

Figura 3.

*Curvas de supervivencia de plantas de chile pimiento morrón (*Capsicum annuum* L. var. *grossum*) bajo tres tratamientos: lixiviado de estiércol de borrego (LB) diluido en agua potable en proporción 1:10, té de residuos orgánicos (TRO) y agua potable como testigo (Ti).*



Conclusiones

La inclusión del tratamiento testigo resultó fundamental para determinar el efecto real de los lixiviados y té de residuos orgánicos aplicados en los demás tratamientos, ya que sirvió como control negativo dentro del estudio, facilitando la identificación de posibles diferencias significativas en el crecimiento, desarrollo o estado fitosanitario de las plantas atribuibles al uso de soluciones nutritivas.

El té de residuos orgánicos (tro) demostró una eficacia superior para la supervivencia de *Capsicum annuum* L. var. *grossum* en condiciones de hidroponía sobre sustrato de tezontle rojo, al mantener 100 % de las plantas vivas hasta el día 30 y prolongar significativamente su mediana de vida.

En comparación con el lixiviado de estiércol de borrego (lb) y el tratamiento testigo con agua potable (Ti), el tratamiento de residuos orgánicos (tro) ofreció

un entorno más favorable para la adaptación de las plántulas, probablemente por su aporte balanceado de nutrientes, compuestos bioactivos y microorganismos benéficos. Este desempeño sugiere que la combinación equilibrada de tro genera un entorno más adecuado y propicio para la adaptación inicial de las plántulas en comparación con los otros tratamientos evaluados.

Desde un enfoque crítico, estos resultados refuerzan el potencial de los bioinsumos orgánicos como alternativas sostenibles frente a fertilizantes inorgánicos, especialmente en sistemas hídricos, siempre y cuando sean correctamente elaborados y aplicados.

El uso de bioinsumos, como el tratamiento de residuos orgánicos (tro), no sólo mejora el desempeño agronómico del cultivo, sino que también promueve prácticas productivas compatibles con la sostenibilidad ambiental y el aprovechamiento de residuos urbanos, consolidando su potencial dentro de las prácticas comunes de bioponia como una estrategia robusta para la horticultura moderna.

En síntesis, los hallazgos mostraron de manera concreta que el tro incrementó la supervivencia entre 7 y 13.5 días respecto a los demás tratamientos, redujo la mortalidad temprana y mejoró significativamente la probabilidad de supervivencia ($p = 0.0083$) en comparación con el lb y el testigo. Estas diferencias cuantitativas confirman que tro fue el tratamiento con más efectividad durante la etapa crítica posterior al trasplante.

No obstante, es importante señalar que este proyecto se limitó a la etapa inicial que siguió al trasplante de las plántulas, por lo que los efectos reportados podrían variar en las fases fenológicas posteriores. Por ello se propone que en futuros estudios se evalúe el impacto de estos bioinsumos en la floración, el rendimiento de frutos y la calidad nutricional, y que se realice la estimación de costos, lo cual podría influir en los productores para adoptar estas prácticas sustentables.

Agradecimientos

Al Laboratorio de Ciencias del Medio Ambiente y Sostenibilidad (CIMAS) de la Universidad del Valle de Puebla UVP.

Referencias

- Beltrano, J. y Giménez, D. O. (2015). Cultivo en hidroponía [Hydroponic cultivation]. Editorial de la Universidad Nacional de La Plata (EDULP). <https://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/46752>
- Conagua. (2025). Climogramas 1981–2010 [Climograms 1981–2010]. Servicio Meteorológico Nacional – CONAGUA. <https://bit.ly/41e3xQJ>
- Cruz-Campos, J. M., Álvarez-Suárez, J. M., Soria-Fregoso, M. D. J. y Candelaria-Martínez, B. (2016). Producción de sustratos orgánicos para ornamentales a menor costo que los importados [Production of organic substrates for ornamentals at lower cost than imported ones]. Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias, 25(1), 44–49. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=93242698008>
- GraphPad Software, Inc. (2012). GraphPad Prism (versión 6.01) [Software]. GraphPad Software, Inc.
- Guerrero, V., Romero, A., Campos, D., Bustos, R., Sosa, M. A. y Núñez, H. G. (2024). Evaluación del crecimiento y abscisión de cultivares de pimiento morrón (*Capsicum annuum* L.) cultivados en hidroponía con diferentes soluciones nutritivas [Evaluation of growth and abscission of bell pepper cultivars (*Capsicum annuum* L.) grown in hydroponics with different nutrient solutions]. Jóvenes en la Ciencia, 28. <https://doi.org/10.15174/jc.2024.4268>
- Gutiérrez, A. G., Robles, L., González, A. C. y Hernández, J. (2023). Hidroponía orgánica, un híbrido interesante [Organic hydroponics, an interesting hybrid]. Recursos Naturales y Sociedad, 9(2), 145–152. <https://bit.ly/4oGleBm>
- Hernández, J. (2024). Evolución de la agricultura en el mundo: Las cinco revoluciones históricas [Evolution of agriculture in the world: The five historical revolutions] [Tesis doctoral, Universidad Autónoma Chapingo]. <http://bit.ly/3jg8Xop>
- Inegi. (2010). Compendio de información geográfica municipal 2010: Puebla, Puebla [Municipal geographic information compendium 2010: Puebla, Puebla]. INEGI. <https://bit.ly/4ltibe9>

- Moreno, E. C., Mora, R., Sánchez, F. y García-Pérez, V. (2011). Fenología y rendimiento de híbridos de pimiento morrón (*Capsicum annuum* L.) cultivados en hidroponía [Phenology and yield of bell pepper (*Capsicum annuum* L.) hybrids grown in hydroponics]. *Revista Chapingo. Serie Horticultura*, 17(spe2), 5–18. <https://bit.ly/4fHNhOs>
- San Martín-Hernández, C., Ordaz-Chaparro, V. M., Sánchez-García, P., Colinas-León, M. T. y Borges-Gómez, L. (2012). Calidad de tomate (*Solanum lycopersicum* L.) producido en hidroponía con diferentes granulometrías de tezontle [Quality of tomato (*Solanum lycopersicum* L.) produced in hydroponics with different tezontle granularities]. *Agrociencia*, 46(3), 243–254. <https://bit.ly/3Jk5vsQ>
- Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural. (2015). Hidroponía, una alternativa de cultivo [Hydroponics, a cultivation alternative]. <https://bit.ly/3Jf4dPT>
- Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural. (2022). México, principal exportador mundial de pimientos frescos: Agricultura [Mexico, world's leading exporter of fresh peppers: Agriculture]. <https://bit.ly/3HhE3vf>
- Servicio Nacional de Sanidad, Inocuidad y Calidad Agroalimentaria. (2024). Pimiento morrón listo para llegar a Japón [Bell pepper ready to arrive in Japan]. <http://bit.ly/41H4LUM>
- Sigala, J., González, M. y Prieto, J. (2013). Supervivencia en plantaciones de *Pinus pseudostrobus* en función del sistema de producción y preacondicionamiento en vivero [Survival in *Pinus pseudostrobus* plantations according to production system and pre-conditioning in nursery]. <https://bit.ly/4oNNHXl>
- Starobinsky, G., Monzón, J., Di Marzo Broggi, E. y Braude, E. (2021). Bioinsumos para la agricultura que demandan esfuerzos de investigación y desarrollo: Capacidades existentes y estrategia de política pública para impulsar su desarrollo en Argentina [Bioinputs for agriculture requiring research and development efforts: Existing capacities and public policy strategy to promote their development in Argentina] (Documento de Trabajo No. 17). Consejo para el Cambio Estructural – Ministerio de Desarrollo Productivo de la Nación. <https://bit.ly/45Hhief>

- Vela, M. A., López, Z. G., Sandoval, E., Tornero, M. A. y Cobos, M. A. (2018). La fertilización órgano-mineral en el rendimiento de haba en suelo e hidroponía en agricultura protegida [Organo-mineral fertilization on bean yield in soil and hydroponics in protected agriculture]. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 9(8), 1603–1614. <https://bit.ly/4mkXD8P>
- Velázquez, E. y Castro, O. R. (2018). Educación ambiental y sustentabilidad: Aportaciones multidisciplinarias para el desarrollo [Environmental education and sustainability: Multidisciplinary contributions for development]. https://www.researchgate.net/publication/327689428_EDUCACION_AMBIENTAL_Y_SUSTENTABILIDAD_Aportaciones_multidisciplinarias_para_el_desarrollo

Derechos de Autor© 2026 Fernández Arauz, Saúl; Bonilla Toscano, Luis Roberto; Gómez Sulvarán, Montserrat.



Este texto está protegido por una licencia Creative Commons 4.0, Attribution 4.0 International. Usted es libre para Compartir, copiar y redistribuir el material en cualquier medio o formato y adaptar el documento, remezclar, transformar y crear a partir del material— para cualquier propósito, incluso para fines comerciales, siempre que cumpla la condición de: Atribución: Usted debe dar crédito a la obra original de manera adecuada, proporcionar un enlace a la licencia, e indicar si se han realizado cambios. Puede hacerlo en cualquier forma razonable, pero no de forma tal que sugiera que tiene el apoyo del licenciante o lo recibe por el uso que hace de la obra.

SENSIBILIDAD DE LOS IMPACTOS AMBIENTALES DE BIORREFINERÍA ASOCIADAS AL USO REDUCIDO DE FOSFATO DE SODIO

Sensitivity of biorefinery environmental impacts associated with reduced use of sodium phosphate

Alejandra Gabriela Yáñez-Vergara¹*, Héctor Mario Poggi-Varaldo², León Felipe Cano-Arteaga³

*Autor de correspondencia

DOI: [10.56643/rcia.v5i1.246](https://doi.org/10.56643/rcia.v5i1.246)

Como citar este artículo: Yáñez-Vergara, A. G., Poggi-Varaldo, H. M. y Cano-Arteaga, L. F. (2026). Sensibilidad de los impactos ambientales de biorrefinería asociadas al uso reducido de fosfato de sodio. Revista Científica de Ingenierías y Arquitectura. 5(1). 98-119. <https://doi.org/10.56643/rcia.v5i1.246>

Resumen

La Evaluación del Ciclo de Vida (ecv) en la biorrefinería (brf) mostró que el fosfato de sodio contribuye significativamente a la toxicidad carcinogénica humana (tch). El fosfato de sodio sirve como agente de control de pH y es una fuente de el hongo *Trichoderma reesei* utiliza como nutriente. Éste le permite producir enzimas en la etapa Z de la brf. Sin embargo, otros autores han demostrado que el hongo podría alcanzar rendimientos competitivos de enzimas en medios de cultivo sin fósforo. Por ello, en la etapa Z se reemplazó el fosfato de sodio por carbonato; este nuevo escenario se denominó brf-CanoP2. Para realizar la ecv, se utilizó el método ReCiPe (H) midpoint 2016, software SimaPro. Se aplicó un nuevo sistema de indicadores de sustentabilidad ambiental (sa), conocido como conjunto α , ∂ y π . Los potenciales impactos ambientales normalizados (pian) disminuyeron de 40.7 a 28.6 (persona*año)/ unidad funcional (uf). La tch disminuyó de 13 933 a 6 356 (persona*año) / uf. En conclusión, la reducción de fosfato de sodio y su reemplazo por carbonato de sodio y bicarbonato de sodio mejoraron la sa de la brf-CanoP2.

1 Ingeniera Química. Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional (Cinvestav). ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-1185-9738>. Correo electrónico: alejandra.yanez@cinvestav.mx

2 Doctor en Ciencias. Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional (Cinvestav) Departamento de Biotecnología y Bioingeniería. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2479-5448>. Correo electrónico: hpoggi@cinvestav.mx

3 Ingeniero Bioquímico. Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional (Cinvestav) Departamento de Biotecnología y Bioingeniería. Correo electrónico: leon.canoa@cinvestav.mx

Recibido: 17/01/2026 | Aceptado: 02/03/2026 | Publicado: 15/06/2026

Los autores declaran no tener ningún conflicto de interés. La investigación fue financiada con recursos de los autores.

Palabras clave: Evaluación del ciclo de vida, índices, métricas, sustentabilidad ambiental.

Abstract

A Life Cycle Assessment (LCA) of the biorefinery (BRF) showed that sodium phosphate significantly contributed to human carcinogenic toxicity (HCT). The sodium phosphate used serves as a pH control agent and phosphorus nutrient source for the fungus *Trichoderma reesei* to produce enzymes in the Z stage of the BRF. However, other authors have demonstrated that the fungus could achieve competitive enzyme yields in phosphorus-free culture media. Therefore, sodium phosphate in the Z stage was replaced with carbonate; this new scenario was named BRF-Canop2. The ReCiPe (H) midpoint 2016 method was used for the LCA in SimaPro. A new system of environmental sustainability (ES) indicators, known as the ∂ , $\ddot{o}$, and π set, was applied. The potential normalized environmental impacts (PIAN) decreased from 40.7 to 28.6 (person*years)/functional unit (FU). The total human consumption (THC) decreased from 13,933 to 6,356 (person*years)/FU. In conclusion, reducing sodium phosphate use and replacing it with sodium carbonate and sodium bicarbonate improved the environmental performance of the BRF-Canop2.

Keywords: environmental sustainability, indices, life cycle assessment, environmental metrics

Introducción

En México, la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (Semarnat) reporta que se generan alrededor de 44×10^6 toneladas de residuos sólidos urbanos (rsu) al año (Semarnat, 2020), mientras que el Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (inecc) indicó que la eliminación de estos residuos libera, aproximadamente, 29 029 Gg de CO₂e (inecc, 2020). Los rso están compuestos por 43.91% de cartón y 9.62% de papel (Semarnat, 2020). La fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos (forsu) rara vez es aprovechada. A ello responde, la inadecuada disposición de los residuos, que contribuye a la contaminación de los ecosistemas (Victorino y Velázquez, 2018).

En este sentido, los rso tienen potencial para generar biogás u otros productos de valor (López et al., 2025). Es importante destacar la factibilidad económica inherente a la relación costo-beneficio derivada de la implementación

de tecnologías de procesamiento de residuos (Mendoza et al., 2023). Resulta indispensable generar conciencia ambiental, posibilitar la conectividad con las problemáticas ambientales para construir redes que permitan mejorar el ecosistema (Ávalos et al., 2025).

La BRF es una tecnología alternativa que permite el aprovechamiento de la FORSU; dicha tecnología pone en marcha varios procesos biotecnológicos para transformar los desechos orgánicos en múltiples productos con valor agregado, a la vez que se alinea al principio de sustentabilidad ambiental (SA) (Escamilla-Alvarado et al., 2017; Fava et al., 2017).

La literatura da cuenta de múltiples configuraciones y conceptos de la BRF. Un modelo mexicano de BRF es el esquema H-M-E-Z-S-NN generado por el Grupo de Biotecnología Ambiental y Energías Renovables (GBAER). Este esquema de BRF comprende seis etapas principales que originan bioproductos y bioenergías a partir de la FORSU: H produce biohidrógeno; M produce biogás; E extrae ácidos orgánicos; Z produce un concentrado enzimático celulítico; S produce licores sacarificados para otros bioprocesos, mientras que NN genera nanopartículas naturales para usar en distintos tratamientos.

La SA de la BRF H-M-E-Z-S-NN ha sido evaluada en comparación con otras tecnologías de procesamiento de RSO, como la incineración con recuperación de energía, utilizando herramientas de análisis estandarizadas como la ECV (ISO 14040 y 14044, 2006) y respaldadas por métodos de evaluación de impacto de ciclo de vida, como el método ReCiPe 2016 y los indicadores de sustentabilidad ambiental GBAER (Yáñez-Vergara et al., 2025).

En trabajos previos se ha señalado que el uso de Na_3PO_4 en el medio de crecimiento utilizado en la etapa Z de la BRF H-M-E-Z-S-NN contribuye hasta en 60% a los impactos de toxicidad carcinogénica humana, lo que representa el PIAN más alto, con 13.93 (persona*año) / UF. Esto último responde al uso de fosfatos en la formulación del medio de cultivo en la etapa Z, lo cual está relacionado con el impacto ambiental causado por los residuos del tratamiento con H_3PO_4 (Yáñez-Vergara et al. 2025). El tratamiento de residuos de purificación de H_3PO_4 , usado en la producción del Na_3PO_4 , lleva emisiones de As, Al, Mg y Zn al agua (Tayibi et al., 2009; Rutherford et al., 1994). Por ello se recomendó buscar un material que sustituyera al Na_3PO_4 , de manera que el Na_3PO_4 añadido fuera reducido y sólo reemplazara el fósforo necesario para el crecimiento y el título enzimático necesarios. Esto reduciría los potenciales

impactos asociados a la toxicidad y ecotoxicidad en la BRF H-M-E-Z-S-NN (Yáñez-Vergara et al. 2025).

En la etapa Z de la BRF, el Na_3PO_4 es usado como agente de control de pH y fuente de nutriente de fósforo para el hongo *Trichoderma reesei*, a fin de que produzca enzimas en esta etapa. Sin embargo, algunos autores han demostrado que el hongo podría alcanzar rendimientos competitivos de enzimas en medios de cultivo sin fósforo (Callow et al., 2016). Por ello, el objetivo de este trabajo fue realizar la ECV de la BRF H-M-S-Z-NN con reducción de Na_3PO_4 en dos casos alternativos propuestos: BRF Cano-P1 y Cano-P2, con el propósito de aumentar la SA de la BRF H-M-S-Z-NN.

Metodología

El diseño experimental se centró en la comparación paralela de la ECV de las BRF Cano-P1 y Cano-P2 con respecto a la BRF H-M-E-Z-S-NN (caso basal), utilizando métodos y métricas basados o alineados con la ECV y las normas ISO 14040 e ISO 14041 (2006). Para las métricas se destacan los nuevos índices de sustentabilidad ∂ , δ y π utilizados para determinar la sustentabilidad ambiental en ambos casos.

1.1. Descripción del sistema de biorrefinería

Yáñez-Vergara et al. (2025) realizan la descripción completa de la BRF H-M-E-Z-S-NN basal. A partir del Inventario de Ciclo de Vida (ICV) de la configuración basal de la BRF se proponen dos casos modificados:

La BRF Cano-P1 se sustentó en la relación empírica carbón / fósforo = $50 \text{ g}_c / \text{g}_p$, que es común para el crecimiento de hongos filamentosos como *T. reesei* (Chen et al., 2022).

La BRF Cano-P2 se basó en la investigación publicada por Callow et al. (2016), que reporta una cuasi-independencia de la producción enzimática de celulasas por *T. reesei* y el contenido de fósforo en el medio de cultivo. Para evitar la ausencia total de fósforo en la etapa Z, se eligió una proporción carbón/ fósforo = $1,000 \text{ g}_c / \text{g}_p$.

1.1.1. Cálculo de sales de fosfatos

Para determinar las cantidades requeridas de sales de fosfato, es necesario conocer el contenido de carbono provisto por los sólidos fermentados y la peptona a la entrada en la etapa Z. Para ello se usaron las ecuaciones [1-6]. Como primer paso se calculó el contenido de carbono con la ecuación [1]:

$$m_C = (m_{FW,db} * X_{C/FW,db}) + (m_{Peptone} * X_{C/Peptone}) \quad [1]$$

donde:

m_C Masa de carbono en el caldo de cultivo de la etapa Z, kg_C

$m_{FW,db}$ Masa de residuos fermentados que ingresan a la etapa Z, $kg_{FW,db}$.

$X_{C/FW,db}$ Fracción de carbono contenida en los residuos fermentados en base seca, $kg_C / kg_{FW,db}$.

$m_{Peptone}$ Masa de peptona en el caldo de cultivo de la etapa Z, $kg_{Peptone}$.

$X_{C/Peptone}$ Fracción de carbono contenida en la peptona, $kg_C / kg_{Peptone}$.

Posteriormente, se usó la ecuación [2] para calcular la masa de fósforo que ingresa a la etapa Z en el caso basal:

$$m_P = \frac{m_{Na_3PO_4}}{X_{Na_3PO_4/P}} \quad [2]$$

donde:

m_P Masa de fósforo en el caldo de cultivo de la etapa Z, kg_P .

$m_{Na_3PO_4}$ Masa de Na_3PO_4 que ingresa a la etapa Z, $kg_{Na_3PO_4}$.

$X_{Na_3PO_4/P}$ Coeficiente estequiométrico de contenido de fósforo en Na_3PO_4 , $kg_{Na_3PO_4} / kg_P$.

La masa de fósforo requerida en los casos Cano-P1 y Cano-P2 se calculó con la ecuación [3]:

$$m_{P,i} = \frac{m_C}{C/P_i} \quad [3]$$

donde:

$m_{P,i}$ Masa de fósforo en el caldo de cultivo de la etapa Z de la BRF i (Base, Cano-P1 o Cano-P2), kgC.

m_C Masa de carbono en el caldo de cultivo de la etapa Z, kgC.

C / P_i Relación másica de carbono y fósforo en la BRF i (Base, Cano-P1 o Cano-P2), kg_C/kg_P.

La masa de Na₃PO₄ requerida para Cano-P1 y Cano-P2 se calculó con la ecuación [4]:

$$m_{Na_3PO_4,i} = m_{P,i} * X_{Na_3PO_4/P} \quad [4]$$

donde:

$m_{Na_3PO_4,i}$ Masa de Na₃PO₄ en el caldo de cultivo de la etapa Z de la BRF i (Base, Cano-P1 o Cano-P2), kg_{Na3PO4}.

$m_{P,i}$ Masa de fósforo que ingresa a la etapa Z de la BRF i (Base, Cano-P1 o Cano-P2), kg_P.

$X_{Na_3PO_4/P}$ Coeficiente estequiométrico de contenido de fósforo en Na₃PO₄, kg_{Na3PO4} / kg_P.

La concentración de Na₃PO₄ en el caldo de cultivo se calculó con la ecuación [5]:

$$[Na_3PO_4]_i = \frac{m_{Na_3PO_4,i}}{V} \quad [5]$$

donde:

$[Na_3PO_4]_i$ Concentración de Na₃PO₄ en el caldo de cultivo de la etapa Z (Base, Cano-P1 o Cano-P2), kg_{Na₃PO₄} / L.

$m_{Na_3PO_4,i}$ Masa de Na₃PO₄ en el caldo de cultivo de la etapa Z de la BRF i (Base, Cano-P1 o Cano-P2), kg_{Na₃PO₄}.

V Volumen del sistema de la etapa Z, 11 000 L.

En el caso Cano-P2 es necesario introducir un sistema de sales de carbonato para proveer la alcalinidad requerida en la etapa Z. Para este cálculo se utilizaron las ecuaciones [6-8]. Las consideraciones y el proceso de cálculo se presentan en la sección 3.1.

La alcalinidad, expresada en concentración equivalente de CaCO₃, en los casos Cano-P1 y Cano-P2, se calculó con la ecuación [6]:

$$[CaCO_3]_{eq,i} = \frac{[Na_3PO_4]_i \cdot m_{CaCO_3,eq}}{m_{Na_3PO_4,eq}} \quad [6]$$

donde:

$[CaCO_3]_{eq,i}$ Concentración de CaCO₃ equivalente en el caldo de cultivo de la etapa Z de la BRF i (Base, Cano-P1 o Cano-P2), kg_{CaCO₃}/L.

$[Na_3PO_4]_i$ Concentración de Na₃PO₄ en el caldo de cultivo de la etapa Z de la BRF i (Base, Cano-P1 o Cano-P2), kg_{Na₃PO₄}/L.

$m_{CaCO_3,eq}$ Masa de CaCO₃ por equivalente de alcalinidad, 50 mg_{CaCO₃}/eq.

$m_{Na_3PO_4,eq}$ Masa de Na₃PO₄ por equivalente de alcalinidad, 54.647 mg_{Na₃PO₄}/eq.

La ecuación [7] se usó para calcular el valor mínimo de alcalinidad equivalente requerida.

$$[CaCO_3]_{eq,Req,i} = [CaCO_3]_{eq,min} - [CaCO_3]_{eq,i} \quad [7]$$

donde:

$[CaCO_3]_{eq,Req,i}$ Concentración de $CaCO_3$ equivalente que se requiere suplir en el caldo de cultivo de la etapa Z (Base, Cano-P1o Cano-P2) para alcanzar la concentración mínima requerida de alcalinidad, kg_{CaCO_3}/L .

$[CaCO_3]_{eq,min}$ Concentración de $CaCO_3$ equivalente mínima requerida en el caldo de cultivo de la etapa Z, kg_{CaCO_3}/L .

$[CaCO_3]_{eq,i}$ Concentración de $CaCO_3$ equivalente en el caldo de cultivo de la etapa Z de la BRF i (Base, Cano-P1 o Cano-P2), kg_{CaCO_3}/L .

Las masas de sales agregadas según la alcalinidad requerida del sistema de BRF se calcularon con la ecuación [8]:

$$m_{sal,i} = \frac{[CaCO_3]_{eq,Req,i} * m_{sal\ eq} * V}{m_{CaCO_3\ eq}} \quad [8]$$

donde:

$m_{Sal,i}$ Masa de sal en el caldo de cultivo de la etapa Z de la BRF i (Base, Cano-P1 o Cano-P2), $kg_{Na_2CO_3}$ o kg_{NaHCO_3} .

$[CaCO_3]_{eq,Req,i}$ Concentración de $CaCO_3$ equivalente que se requiere suplir en el caldo de cultivo de la etapa Z (Base, Cano-P1 o Cano-P2) para alcanzar la concentración mínima requerida de alcalinidad, kg_{CaCO_3}/L .

$m_{sal\ eq}$ Masa de sal por equivalente de alcalinidad, $kg_{Na_2CO_3}/eq$ o kg_{NaHCO_3}/eq .

$m_{CaCO_3\ eq}$ Masa de $CaCO_3$ por equivalente de alcalinidad, $50\ mg_{CaCO_3}/eq$.

1.2. Evaluación de Ciclo de Vida

1.2.1. Objetivo, alcance y limitaciones

El objetivo de la ECV es valorar los potenciales impactos ambientales (PIA) de dos casos (Cano-P1 y Cano-P2) que requieren menor cantidad de fosfatos en la etapa Z de la BRF H-M-E-Z-S-NN basal. La unidad funcional (UF) de los tres casos es 1 000 kilogramos de FORSU, cuya composición de esta corriente es 40% papel y cartón, y 60% desechos de comida; también posee 35% de humedad. El alcance de este estudio abarca desde la recepción de la FORSU en las instalaciones de la BRF hasta su disposición final.

1.2.2 Inventario de Ciclo de Vida

El Inventario de Ciclo de Vida (ICV) de la BRF basal se sustenta en el publicado por Yáñez-Vergara et al. (2025), que consideró como unidad funcional 1 000 kilogramos de FORSU. La etapa Z recibe como input una fracción de los sólidos fermentados en la etapa H de la BRF. En los ICV de Cano-P1 y Cano-P2 se calcularon las cantidades de sal removidas y añadidas con las ecuaciones mostradas en la sección 2.1.1.

La relación $\text{kg}_c / \text{kg}_p$ del input a la entrada de la etapa Z es igual a la masa de carbono de los sólidos fermentados y la peptona añadida dividida entre la masa de fósforo de las sales de fosfato. Los sólidos fermentados en base seca poseen una composición de carbono de $0.46 \text{ kg}_c / \text{kg}_{\text{FW,db}}$ (Fermented Waste, dry base) y la peptona derivada de la leche de $0.44 \text{ kg}_c / \text{kg}_{\text{Peptona}}$ (Moreira et al., 2020).

1.2.3 Evaluación de Impacto Ambiental

La ECV fue realizada siguiendo las normas ISO 14040 e ISO 14041 (2006). El software utilizado fue SimaPro versión 9.0.0.35 y el método con que se obtuvieron los PIA fue ReCiPe 2016 punto intermedio jerárquico v.1.03. Se evaluaron 18 impactos ambientales. A partir de los valores caracterizados de PIA, pueden obtenerse los potenciales impactos ambientales normalizados (PIAN). Los PIAN emplean las mismas unidades (persona*año / UF), de manera que es posible determinar la proporción relativa de cada categoría de impacto y / o comparar las magnitudes de las ECV de diferentes procesos o tecnologías (considerando

que la UF en las ECV sea la misma). Esta homogeneidad de unidades permite generar nuevos índices de SA, como los indicadores GBAER (Yáñez-Vergara et al., 2025).

1.2.4. Comparación de sustentabilidad ambiental de los casos de BRF usando métricas de sustentabilidad ambiental GBAER

Para comparar diferentes tecnologías y determinar sus SA, se desarrollaron los índices de sustentabilidad ambiental α , θ y π . Estas métricas pueden consultarse en Yáñez-Vergara et al. (2025). Las métricas de SA permiten analizar los resultados obtenidos por medio del software SimaPro y posicionar las tecnologías en un plano θ - π para facilitar su comparación (Yáñez-Vergara, 2022; Sierra-Gachuz et al., 2022); el índice α permite obtener la SA total de una tecnología. La ecuación [9] representa el impacto ambiental potencial normalizado; j es el subíndice que representa el j -ésimo impacto. Por lo tanto, cuando α es mayor, la sustentabilidad es menor.

$$\alpha = \sum_{j=1}^{18} \text{PIAN}_j \quad [9]$$

donde:

PIAN = Potencial impacto ambiental normalizado

El plano θ - π mostrado en Yáñez-Vergara et al. (2025) permite ubicar las variables θ y π como un punto P dentro del plano y comparar diferentes tecnologías para determinar su SA según la posición P.

Resultados

En la tabla 1 se muestran los resultados de las cantidades de fosfato, Na_3PO_4 y sales de carbonato requeridas para la BRF: basal, Cano-P1 y Cano-P2. La cantidad de carbono a la entrada de la etapa Z se calculó con la ecuación [1]. Considerando la UF de 1 000 kilogramos de FORSU que ingresan a la BRF, 215.41 $\text{kg}_{\text{FW,db}}$ y 10 479 $\text{kg}_{\text{Peptona}}$ se incorporan a la etapa Z, y corresponden a 103.7 kg_C . La relación C / P del caso basal se calculó con la ecuación [2]. Los valores de cantidad de sales y alcalinidad se obtuvieron usando las ecuaciones [3-6] para Cano-P1 y las ecuaciones [3-8] para Cano-P2.

De acuerdo con los datos presentados en la tabla 1, la cantidad de Na_3PO_4 se redujo significativamente para la BRF Cano-P2 con respecto al caso base y se sustituyó por un sistema de sales de carbonato.

Tabla 1.

Fosfato de sodio y sales de carbonato requerido

Biorrefinería	C/ P (kgC/ kgP)	mNa_3PO_4 (kg Na_3PO_4)	mNa_2CO_3 (kg Na_2CO_3)	mNaHCO_3 (kg NaHCO_3)
Base	26.19	20 958	0	0
Cano-P1	50	10. 973	0	0
Cano-P2	1 000	0.549	2 654	4 208

Sistema de carbonatos requerido en la biorrefinería Cano-P2

De acuerdo con Callow et al. (2016), la reducción de fosfato en la etapa Z no afectará su papel como nutriente. Sin embargo, tendrá influencia en el nivel de alcalinidad y en el pH del reactor. Por ello, se decidió compensarlo con un sistema de sales de carbonato, que además de ser una fuente de alcalinidad empleada en estudios de cultivos sumergidos, también es económico (Tyagi et al., 2023). Se calculó la alcalinidad del bicarbonato y el carbonato de sodio necesarios para reemplazar el fosfato requerido. Se estableció una concentración de alcalinidad de 500 mg / L de CaCO_3 equivalente en el biorreactor. La alcalinidad proporcionada por el sistema de carbonatos debe de alcanzar dicha concentración. Para convertir la concentración a miligramos de CaCO_3 equivalentes / L se realizó el cálculo con la ecuación [6], obteniéndose 45.665 miligramos de CaCO_3 / L. Esta cantidad es inferior al requerimiento mínimo de alcalinidad, por lo cual la alcalinidad faltante se reemplazó con un sistema de carbonato/ bicarbonato de sodio. De acuerdo con la ecuación [7] se obtuvieron 455.335 miligramos de CaCO_3 / L. Para Na_2CO_3 y NaHCO_3 son necesarios 227.668 miligramos de CaCO_3 / L, respectivamente. La ecuación [8] se utilizó para convertir estas cantidades en masa para carbonato y bicarbonato de sodio. Para el carbonato de sodio se obtuvieron 2 654 kilogramos de Na_2CO_3 y 4 208 para NaHCO_3 . Estas cantidades se sustituyeron en el ICV y se realizó el ECV para Cano-P1 y Cano-P2.

Evaluación ambiental de las BRF Cano-P1 y Cano-P2

Los valores totales de PIA en todas las categorías de impacto de la BRF Cano-P1 presentan una reducción con respecto al caso base. En la figura 1 se muestran las contribuciones de los potenciales impactos ambientales caracterizados de impactos selectos de la BRF base, Cano-P1 y Cano-P2. Las categorías de impacto que presentan las mayores reducciones porcentuales fueron toxicidad humana carcinogénica (se redujo de 38.60 a 28.23 kilogramos 1,4-DCB eq), escasez de recursos minerales (de 1.78 a 1.01 kilogramos Cu eq) y consumo de agua (de 9.16 a 7.48 metros cúbicos), lo que equivale a reducciones de alrededor de 26, 43 y 18 puntos porcentuales, respectivamente.

La reducción generalizada de los PIA con respecto a la BRF base indica que el uso de Na_3PO_4 involucra una contribución importante en todas las etapas de la BRF. La producción y refinamiento de sales de fosfato contribuye a la escasez de recursos minerales, puesto que compromete sustancias como el ácido sulfúrico y la liberación de metales pesados tóxicos, que abonan al deterioro de la salud humana y requieren una gran cantidad de agua para su tratamiento posterior (Rachid et al., 2025; Tayibi et al., 2009).

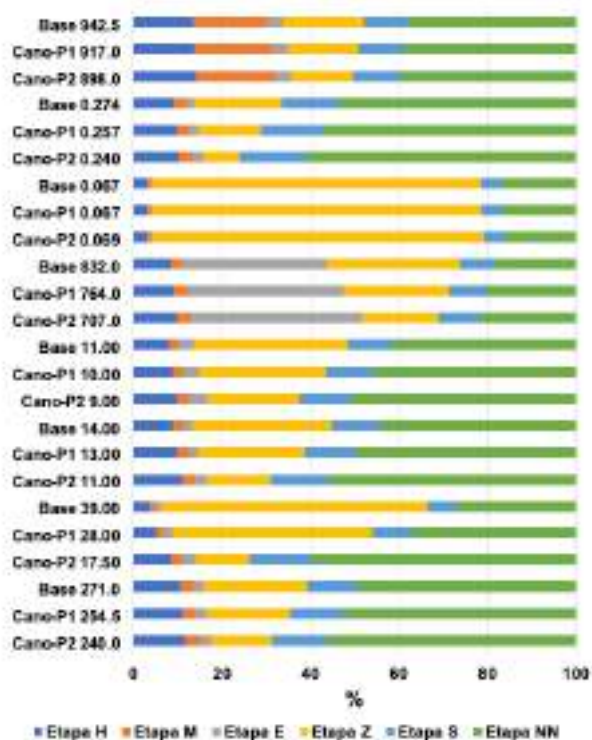
Diecisiete PIA muestran reducciones importantes con respecto al caso base. La toxicidad humana carcinogénica disminuyó de 38.60 a 17.54 kilogramos 1,4-DCB eq, la escasez de recursos minerales de 1.78 a 0.20 kilogramos Cu eq y el consumo de agua de 9.16 a 5.97 metros cúbicos.

Por su parte, la categoría de eutrofización marina incrementó el PIA en 2.7% con respecto a la BRF base. Este incremento está relacionado con el proceso de producción de carbonato de sodio (Solvay modificado dual o de Hou [Modified Solvay Process], Hou's Process, UPR, Ecoinvent 3.6, Allocation, APOS | GLAD, s. f.; Rahimpour et al., 2024).

Figura 1.

Contribución de los potenciales impactos ambientales caracterizados de impactos selectos de la BRF base, Cano-P1 y Cano-P2

Calentamiento global (kg CO2 eq)
Eutrofización de agua dulce (kg P eq)
Eutrofización marina (kg N eq)
Ecotoxicidad terrestre (kg 1,4-DCB eq)
Ecotoxicidad de agua dulce (kg 1,4-DCB eq)
Ecotoxicidad marina (kg 1,4-DCB eq)
Toxicidad carcinogénica humana (kg 1,4-DCB eq)



Dado que la producción de carbonato de sodio resulta en un coproducto al cloruro de amonio (puede ser utilizado como fertilizante), lleva emisiones de nitrógeno a los cuerpos de agua marina (Rahimpour et al., 2024), por lo que puede explicar el aumento de la eutrofización marina para la BRF Cano-P2.

Comparación de la sustentabilidad global de los casos de biorrefinería base

En la tabla 2 se muestran los valores PIAN (valores alfa) de las BRF: base, Cano-P1 y Cano-P2.

Tabla 2.

Potenciales impactos ambientales normalizados BRF: base, Cano-P1, Cano P2

Categoría de impacto	pian (persona*año / uf)		
	brf Base	brf Cano-P1	brf Cano-P2
Calentamiento global	0.118	0.115	0.112
Agotamiento del ozono estratosférico	0.039	0.039	0.039
Radiación ionizante	0.043	0.042	0.041
Formación de ozono, Salud humana	0.133	0.131	0.129
Formación de partículas finas	0.130	0.127	0.125
Formación de ozono, Ecosistemas terrestres	0.196	0.193	0.191
Acidificación terrestre	0.465	0.460	0.456
Eutrofización de agua dulce	0.422	0.395	0.370
Eutrofización marina	0.015	0.015	0.015
Ecotoxicidad terrestre	0.803	0.738	0.683
Ecotoxicidad de agua dulce	8.756	7.981	7.232
Ecotoxicidad marina	13.604	12.233	10.906
Toxicidad carcinogénica humana	13.933	10.192	6.333
Toxicidad no carcinogénica humana	1.819	1.708	1.608
Uso de tierra	0.007	0.006	0.006

Escasez de recursos minerales	0.000	0.000	0.000
Escasez de recursos fósiles	0.207	0.201	0.196
Consumo de agua	0.034	0.028	0.022
Índice ∂	40.725	34.602	28.463

Es importante notar que los PIAN de los casos Cano-P1 y Cano-P2 se redujeron con respecto al caso base en la mayoría de las categorías y la toxicidad humana carcinogénica disminuyó más de la mitad para Cano-P2. En la tabla 2 se observa que el alfa del caso base es más alto que los de Cano-P1 y Cano-P2, que son 15% y 30% más sustentables, respectivamente, que el caso base.

Tabla 3.

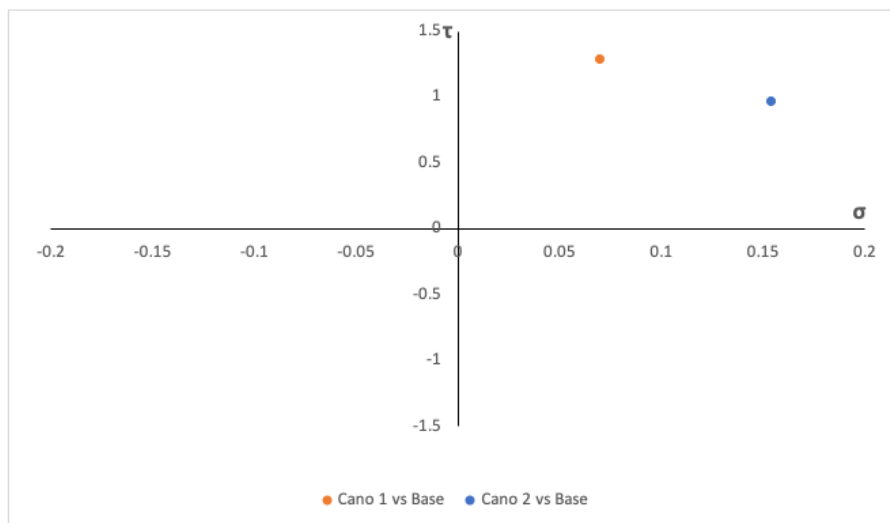
Indicadores de sustentabilidad ambiental GBAER, BRF Cano-P1, BRF Cano-P2, con respecto al caso base

Caso	A	Σ	N_{EVT}	N_{RFT}	T
Base	40.725	-	-	-	-
Cano-P1	34.60	0.0708	18	0	1.2788
Cano-P2	28.46	0.156	17	1	0.9542

En la tabla 3 se muestran los indicadores de sustentabilidad ambiental ∂ , ∂_y y π GBAER de la BRF Cano-P1 y BRF Cano-P2 con respecto al caso base. Estos indicadores se ubicaron en el plano ∂ - π (figura 2) para determinar la sustentabilidad global de las BRF Cano-P1 y Cano-P2. Se observó que el punto que representa la comparación del caso Cano-P1 con el caso base se encuentra en el cuadrante 1, lo cual representa una mejora estricta o dominante del caso Cano-P1 sobre el caso base. Por su parte, la posición del punto que representa la comparación de la BRF Cano-P2 con el caso base indica que la BRF Cano-P2 es más sostenible ambientalmente que el caso base.

Figura 2.

Plano δ - π : BRF base versus Cano-P1 y Cano-P2



Conclusiones

La ECV y los indicadores GBAER muestran que la sustitución de fosfato en las BRF Cano-P1 y Cano-P2 mejoró la SA con respecto a la BRF base: el índice ∂ se redujo 30% (40.7 a 28.5) para la BRF Cano-P2 respecto al de la BRF basal. Mientras que la BRF Cano-P1 redujo su índice ∂ de 40.7 a 34.6, lo que equivale a una reducción total de 15%. La ECV muestra que la BRF Cano-P2 fue la que más redujo sus PIAN en la etapa Z, en 74%; en tanto la BRF Cano P1 disminuyó en 37% con respecto a la BRF basal.

La BRF Cano-P2 presenta un valor menor del indicador de SA ∂ que los otros dos casos analizados. La BRF Cano-P2 posee mayor impacto en la categoría de eutrofización marina; sin embargo, se considera que este hecho no afecta la superioridad de la BRF Cano-P2 sobre las BRF basal y Cano-P1. Por su parte, la etapa NN contribuye de manera significativa a la toxicidad humana carcinogénica para la BRF.

Los PIA que más se redujeron con respecto de la BRF base fueron las categorías ecotoxicidad marina y toxicidad humana carcinogénica, con 19.83% y 54.55%, respectivamente, para la BRF Cano-P2. Por su parte la BRF Cano-P1 disminuyó en 10% y 26.85%, respectivamente, para las mismas categorías.

En la BRF Cano-P2 las categorías eutrofización de agua dulce, ecotoxicidad terrestre, ecotoxicidad de agua dulce y toxicidad humana no carcinogénica disminuyeron en más de 10% en sus respectivos impactos caracterizados. Esta reducción también se refleja de manera proporcional en los PIAN.

Referencias

- Ávalos-Rodríguez, M. L., Díaz-Abrego, M. y Rangel-Vargas, J. M. (2025). La sostenibilidad en los posgrados. Creación de contenidos ambientales en el Doctorado en Innovación UVEG. Sustainability in postgraduate studies. Creation of environmental contents in the UVEG Innovation Doctorate [La sostenibilidad en los posgrados. Creación de contenidos ambientales en el Doctorado en Innovación UVEG]. *Revista Electrónica en Educación y Pedagogía*, 9(16), 128–144. <https://doi.org/10.15658/rev.electron.educ.pedagog25.06091606>
- Callow, N. V., Ray, C. S., Kelbly, M. A. y Ju, L. K. (2016). Control de nutrientes para la producción de celulasa en fase estacionaria en *Trichoderma reesei* Rut C-30 [Nutrient control for stationary phase cellulase production in *Trichoderma reesei* Rut C-30]. *Enzyme and Microbial Technology*, 82, 8–14. <https://doi.org/10.1016/j.enzmictec.2015.08.012>
- Chen, W., Zhan, Y., Zhang, X., Shi, X., Wang, Z., Xu, S., Chang, Y., Ding, G., Li, J. y Wei, Y. (2022). Influencia de las relaciones carbono:fósforo en la transformación de fracciones de fósforo y la sucesión de la comunidad bacteriana en compostaje con exceso de fósforo [Influence of carbon-to-phosphorus ratios on phosphorus fractions transformation and bacterial community succession in phosphorus-enriched composting]. *Bioresource Technology*, 362, 127786. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2022.127786>
- Escamilla-Alvarado, C. (2014). Integración de un proceso modelo de biorrefinería para la obtención de hidrógeno, metano, enzimas y sacarificados a partir de la fracción orgánica de residuos sólidos urbanos [Integration of a model biorefinery process for obtaining hydrogen, methane, enzymes and saccharides from the organic fraction of municipal solid waste] [Tesis de doctorado, Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional].
- Escamilla-Alvarado, C., Poggi-Varaldo, H. M. y Ponce-Noyola, M. T. (2017). Bioenergía y bioproductos de residuos orgánicos municipales como alternativa al vertedero: una evaluación comparativa de ciclo de vida con aplicación prospectiva a México [Bioenergy and bioproducts from municipal organic waste as alternative to landfilling: A comparative life cycle assessment with prospective application to Mexico]. *Environmental Science and Pollution Research*, 24, 25602–25617. <https://doi.org/10.1007/s11356-016-6939-z>

- Fava, F., Totaro, G., Diels, L., Reis, M., Duarte, J., Carioca, O. B., Poggi-Varaldo, H. M. y Ferreira, B. S. (2015). Biorrefinería de biopasos en Europa: oportunidades y necesidades de investigación y desarrollo [Biowaste biorefinery in Europe: Opportunities and research & development needs]. *New Biotechnology*, 32, 100–108. <https://doi.org/10.1016/j.nbt.2013.11.003>
- Global LCA Data Access Network. (s. f.). Modified Solvay process, Hou's process, upr, ecoinvent 3.6, Allocation, apos [Proceso Solvay modificado, proceso de Hou, upr, ecoinvent 3.6, asignación, apos]. Recuperado el 10 de julio de 2025 de <https://www.globalcadataaccess.org/modified-solvay-process-hous-process-upr-ecoinvent-36-allocation-apos>
- Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC). (2020). Inventario nacional de emisiones de gases y compuestos de efecto invernadero, 1990–2019 [National inventory of greenhouse gas and compounds emissions, 1990–2019]. <https://www.gob.mx/inecc>
- International Organization for Standardization. (2006). Environmental management—Life cycle assessment—Principles and framework (ISO 14040) [Gestión ambiental — Evaluación del ciclo de vida — Principios y esquema].
- International Organization for Standardization. (2006). Environmental management—Life cycle assessment—Requirements and guidelines (ISO 14044) [Gestión ambiental — Evaluación del ciclo de vida — Requisitos y guías].
- López-Hernández, V., Limón-Hernández, R. y Morales-Moguel, O. (2025). Diagnóstico de la generación de residuos en municipios del norte de Veracruz [Diagnosis of waste generation in municipalities of northern Veracruz]. *Revista Investigium IRE: Ciencias Sociales y Humanas*, 16(1), 136–158. <https://doi.org/10.15658/INVESTIGIUMIRE.251601.06>
- Mendoza Rossano, J. A., Cruz Hernández, J. y Herrera Pérez, L. (2023). Determinación de parámetros físicos y químicos de digeridos de bagazo de agave (*Agave angustifolia* Haw.) obtenidos con pacas biodigestoras [Determination of physical and chemical parameters of digested agave bagasse (*Agave angustifolia* Haw.) obtained with biodigester bales]. *Revista Chapingo Serie Agricultura Tropical*, 3(2), 1–8. <https://doi.org/10.5154/r.rchsagt.2023.03.10>

- Moreira, J. V., Silva, S. C. M. y Cremasco, M. A. (2020). Evaluación de la relación carbono:nitrógeno en medio de cultivo semidefinido para la biosíntesis de tacrolimus por *Streptomyces tsukubaensis* y el efecto sobre el crecimiento bacteriano [Evaluation of carbon:nitrogen ratio in semi-defined culture medium to tacrolimus biosynthesis by *Streptomyces tsukubaensis* and the effect on bacterial growth]. *Biotechnology Reports*, 26, e00440. <https://doi.org/10.1016/J.BTRE.2020.E00440>
- Rachid, S., Taha, Y., Muller, E. y Benzaazoua, M. (2025). Evaluación del ciclo de vida de la minería y beneficiación de fosfato en Marruecos: evaluación de desempeño [Life cycle assessment of phosphate mining and beneficiation in Morocco: Performance evaluation]. *Journal of Environmental Management*, 373, 123453. <https://doi.org/10.1016/J.JENVMAN.2024.123453>
- Rahimpour, H., Fahmi, A. y Zinatloo-Ajabshir, S. (2024). Hacia la producción sostenible de sosa cáustica: una revisión crítica sobre impactos eco, modificaciones y enfoques innovadores [Toward sustainable soda ash production: A critical review on eco-impacts, modifications, and innovative approaches]. *Results in Engineering*, 23, 102399. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.102399>
- Ritchie, E., Boyd, P., Lawson-Halasz, A., Hawari, J., Saucier, S., Scroggins, R. y Princz, J. (2017). Ecotoxicidad del zinc y sustancias que contienen zinc en suelo con consideración de enfoques de modalidad metal y complejos organometálicos [The ecotoxicity of zinc and zinc-containing substances in soil with consideration of metal-moiety approaches and organometal complexes]. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 36(12), 3324–3332. <https://doi.org/10.1002/ETC.3910>
- Rutherford, P. M., Dudas, M. J. y Samek, R. A. (1994). Impactos ambientales del fosfogypsum [Environmental impacts of phosphogypsum]. *Science of The Total Environment*, 149(1–2), 1–38. [https://doi.org/10.1016/0048-9697\(94\)90002-7](https://doi.org/10.1016/0048-9697(94)90002-7)
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). (2020). Diagnóstico básico para la gestión integral de los residuos [Basic diagnosis for integral waste management]. <https://www.gob.mx/inecc>

- Sierra-Gachuz, H., Poggi-Varaldo, H. M., Sotelo-Navarro, P. X., Escamilla-Alvarado, C., Sojo-Benítez, A., Barrera-Cortés, J. y González-Cardoso, G. (2022). Evaluación de la sostenibilidad ambiental de las biorrefinerías de la familia H-M-Z-S [Evaluation of environmental sustainability of H-M-Z-S family bio-refineries]. En P. Sotelo-Navarro et al. (Eds.), *Ambiente y bioenergía. Perspectivas y avances de la sostenibilidad* (pp. 2–12). ABIAER A. C.
- Tayibi, H., Choura, M., López, F. A., Alguacil, F. J. y López-Delgado, A. (2009). Impacto ambiental y gestión del fosfogypsum [Environmental impact and management of phosphogypsum]. *Journal of Environmental Management*, 90(8), 2377–2386. <https://doi.org/10.1016/J.JENVMAN.2009.03.007>
- Tyagi, S., Mani, S., Tyagi, S. y Mani, S. (2023). Preparación de medios y buffers para cultivo de células [Media and buffer preparation for cell culture]. En *Basic Cell Culture Protocols* (pp. 77–88). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-031-19485-6_5
- Victorino Ramírez, L. y Velázquez Cigarroa, E. (2018). Educación ambiental, cambio climático y sustentabilidad: Saberes locales y multidisciplinarios para el desarrollo [Environmental education, climate change and sustainability: Local and multidisciplinary knowledge for development]. Universidad Autónoma Chapingo. ISBN: 978-607-12-0495-0
- Yáñez-Vergara, A. G. (2022). Análisis de sustentabilidad de dos escenarios de gestión de residuos urbanos: biorrefinería que genera bioenergías, enzimas y nanobiopartículas (H-M-Z-S-NN) e incineración con recuperación de energía [Sustainability analysis of two urban waste management scenarios: biorefinery generating bioenergies, enzymes and nanobioparticles (H-M-Z-S-NN) and incineration with energy recovery] [Tesis de maestría, Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional].
- Yáñez-Vergara, A., Poggi-Varaldo, H. M., Pérez-Morales, G., Sotelo-Navarro, P. X., Padilla-Viveros, A., Matsumoto-Kuwahara, Y., Ponce-Noyola, T. y Sánchez-Pérez, R. (2025). Evaluación de la sostenibilidad ambiental de biorrefinería e incineración con recuperación de energía basada en evaluación de ciclo de vida [Evaluation of environmental sustainability of biorefinery and incineration with energy recovery based on life cycle assessment]. *Fermentation*, 11(4), 232. <https://doi.org/10.3390/fermentation11040232>

Derechos de Autor© 2026 Yáñez-Vergara, Alejandra Gabriela; Poggi-Varaldo, Héctor Mario; Cano-Arteaga, León Felipe



Este texto está protegido por una licencia Creative Commons 4.0, Attribution 4.0 International. Usted es libre para Compartir, copiar y redistribuir el material en cualquier medio o formato y adaptar el documento, remezclar, transformar y crear a partir del material— para cualquier propósito, incluso para fines comerciales, siempre que cumpla la condición de: Atribución: Usted debe dar crédito a la obra original de manera adecuada, proporcionar un enlace a la licencia, e indicar si se han realizado cambios. Puede hacerlo en cualquier forma razonable, pero no de forma tal que sugiera que tiene el apoyo del licenciante o lo recibe por el uso que hace de la obra.

ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD DE LA SUSTENTABILIDAD AMBIENTAL DE BIORREFINERÍA CON SUSTITUCIÓN DE CARBÓN ACTIVADO

Sensitivity analysis of the environmental sustainability of a biorefinery with activated carbon substitution

Alejandra Gabriela Yáñez-Vergara^{1*}, Héctor Mario Poggi-Varaldo², América Padilla-Viveros³

**Autor de correspondencia*

DOI: [10.56643/rcia.v5i1.247](https://doi.org/10.56643/rcia.v5i1.247)

Como citar este artículo: Yáñez-Vergara, A. G., Poggi-Varaldo, H. M. y Padilla-Viveros, A. (2026). Análisis de sensibilidad de la sustentabilidad ambiental de biorrefinería con sustitución de carbón activado. Revista Científica de Ingenierías y Arquitectura. 5(1). 120-138. <https://doi.org/10.56643/rcia.v5i1.247>

Resumen

Mediante la evaluación del ciclo de vida (ECV) de una biorrefinería (BRF) se determinó que el carbón activado fósil (CAF) usado en la producción de bio-nanobiopartículas tiene un alto impacto en la ecotoxicidad y la toxicidad. Este trabajo propone mejoras a la sustentabilidad ambiental (SA) de la BRF y, por primera vez, muestra un análisis cuantitativo de la SA dirigido a reducir los impactos ambientales. El objetivo fue evaluar la sustentabilidad ambiental tras sustituir CAF por CAV en la BRF (H-M-Z-S-NN), usando la ECV y las métricas de sustentabilidad ambiental para determinar si se registraban reducciones en los potenciales impactos ambientales. El inventario del ciclo de vida (ICV) se obtuvo con el proxy de SimaPro “Activated carbon, granular {RoW} activated carbon production |Cut-off, U” y se comparó con un ICV de CAV tomado de la literatura. La ECV se realizó con el método ReCiPe (H) midpoint 2016. Los resultados muestran que la BRF-CAV registró mayores disminuciones principalmente en eutrofización del agua dulce (48.3%), toxicidad no carcinogénica humana (44.9%), ecotoxicidad del agua dulce (37.9%) y el agua marina (40.5%).

¹ Ingeniera Química. Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional (Cinvestav). ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-1185-9738>. Correo electrónico: alejandra.yanez@cinvestav.mx

² Doctor en Ciencias. Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional (Cinvestav) Departamento de Biotecnología y Bioingeniería. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3222-9945>. Correo electrónico: hpoggi@cinvestav.mx

³ Doctora en Ciencias Químico-Biológicas. Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional (Cinvestav)-Programa Transdisciplinario en Desarrollo Científico y Tecnológico para la Sociedad. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3438-4463>. Correo electrónico: aviveros@cinvestav.mx

Recibido: 17/01/2026 | Aceptado: 02/03/2026 | Publicado: 15/06/2026

Los autores declaran no tener ningún conflicto de interés. La investigación fue financiada con recursos de los autores.

Esta última fue la reducción más significativa, de 14 a 8 (persona*año) / unidad funcional (UF). Los potenciales impactos ambientales normalizados totales de la BRF en la que se sustituyó CAF por CAV se redujeron de 41 a 27 (persona*año) / UF, lo cual indica que el uso de CAV mejoró significativamente la sustentabilidad ambiental de la BRF.

Palabras clave: carbón activado vegetal, evaluación del ciclo de vida, índices de sustentabilidad ambiental.

Abstract

The Life Cycle Assessment (LCA) of a biorefinery (BRF) determined that using fossil activated carbon (FAC) in the bionanobioparticles production stage carries a high impact in terms of ecotoxicity and toxicity. This work proposes improvements to the environmental sustainability of the BRF and, for the first time, presents a quantitative analysis of ES to reduce its environmental impacts. The objective was to evaluate the environmental sustainability of replacing FAC with activated carbon (AC) in the GBAER (HMZS-NN) BRF using LCA and environmental sustainability metrics, and to determine whether the potential environmental impacts decreased. The life cycle inventory (LCI) was based on the SimaPro proxy “Activated carbon, granular {RoW} | activated carbon production | Cut-off, U”. It was compared with an LCI of AC taken from the literature. Environmental impacts were assessed using the ReCiPe(H) midpoint 2016 method. The results show that most significant reduction in environmental impacts was for the BRF-CAV system, primarily for freshwater eutrophication (48.3%), non-carcinogenic toxicity to humans (44.9%), freshwater ecotoxicity (37.9%), and marine ecotoxicity (40.5%). The latter was the most significant reduction, from 14 to 8 person-years per functional unit (FU). The total normalized potential environmental impacts of the BRF system with CAF substitution for CAV were reduced from 41 to 27 person-years per FU, indicating that the use of CAV significantly improved the sustainability of the BRF system.

Keywords: environmental sustainability indices, life cycle assessment, plant-based activated carbon

Introducción

La generación de residuos, aunada a las deficiencias en la recolección, el tratamiento y la inadecuada disposición, es fuente de impactos ambientales negativos y contribuye al deterioro de los ecosistemas (Victorino y Velázquez, 2018). En este estudio se utilizó la fracción orgánica de residuos sólidos urbanos (FORSU), pues éstos poseen potencial para generar bioenergía y productos con valor agregado (López et al., 2025).

El Grupo de Biotecnología Ambiental y de Energías Renovables (GBAER) ha estudiado modelos de BRF que procesan residuos sólidos orgánicos para producir bioenergía y bioproductos. El GBAER desarrolló la BRF H-M-S-Z-NN, la cual procesa FORSU y posee seis etapas: hidrógeno (H), metano (M), ácidos orgánicos (E), licores sacarificados (S), enzimas industriales (Z) y bionanobio-partículas (NN). En Sotelo-Navarro et al. (2022) y Yáñez-Vergara et al. (2022) pueden consultarse las etapas y procesos detallados de la BRF H-M-E-Z-S-NN.

En trabajos previos, Yáñez-Vergara et al. (2024) analizaron el desempeño ambiental de la BRF mediante la ECV y los resultados mostraron que la etapa NN fue crítica para el calentamiento global, la eutrofización del agua dulce, la toxicidad humana no carcinogénica, la ecotoxicidad del agua marina y el agua dulce. Se verificó que en esta etapa se realizó la mayor contribución, aportando 49.5% a la toxicidad humana no carcinogénica, lo que probablemente se relaciona con el uso de CAF. Este último se utiliza para producir bionanobio-partículas y está asociado al tratamiento de residuos de minería y carbón fósil.

La ECV es una herramienta iterativa y es clave para la determinación de la sustentabilidad ambiental; además, permite evaluar una amplia y completa variedad de impactos ambientales mediante un conjunto de protocolos y metodologías (ISO 14040 y 14044, 2006).

Dado que la ECV es iterativa, conviene considerar la sustitución del CAF por CAV, de manera que, si se encuentra un beneficio, podrían reducirse los impactos de las etapas, procesos y clave de la BRF. Lo anterior permitiría reducir los NPEI y mejorar la sustentabilidad de la BRF. Yáñez-Vergara et al. (2024) sugirieron que sería conveniente determinar el efecto de un cambio de material, es decir, la sustitución del CAF por otro adsorbente como el CAV, sobre el perfil de impactos ambientales producidos por la contribución del material en la etapa de NN.

El coco es un material biomásico con alto contenido de carbono, bajo contenido en ceniza y sus residuos pueden emplearse como combustible. El coco es un alimento, es producido en más de 90 países y posee distintas aplicaciones en las industrias alimentaria y cosmética (Sagarpa, 2022).

México se encuentra en el octavo lugar a nivel mundial en la producción de coco. En 2020 produjo 234 976 toneladas de coco en 17 483 hectáreas, con un rendimiento de 13.4 toneladas por hectárea (Sagarpa, 2022). Los estados con mayor producción fueron Jalisco con 63 658 toneladas (27.1%), Sinaloa, 40, 072 toneladas (17.1%) y Quintana Roo, 34 608 toneladas (14.7%) (Sagarpa, 2022). Dada la abundancia de cáscara de coco en México y su bajo costo, se utilizó para producir CAV.

En este sentido Ávalos et al. (2025) remarcan la importancia de generar conciencia ambiental y posibilitar la conectividad con las problemáticas ambientales, así como de lograr un impacto positivo en la sociedad. Este estudio es relevante para la sociedad, puesto que la ECV de la gestión y procesamiento sustentable de residuos por medio de la tecnología de BRF impactará significativamente en su calidad de vida.

También es importante mencionar que la implementación de tecnologías de procesamiento de residuos se encuentra en función de la relación costo-beneficio (Mendoza et al., 2023). Es en este sentido que la BRF plantea la generación de bioenergías y productos con valor agregado, por lo cual se espera que este trabajo también tenga impacto económico y en la creación de políticas públicas en México.

El objetivo de este análisis fue evaluar la sustentabilidad ambiental derivada de la sustitución de CA de origen fósil por CA de origen vegetal en la BRF (H-M-Z-S-NN) empleando la ECV y métricas de sustentabilidad ambiental, para determinar si se registraban reducciones en los potenciales impactos ambientales.

Materiales y métodos

Se desarrolló un análisis de sensibilidad para la BRF H-M-S-Z-NN descrita en Sotelo-Navarro et al. (2022) y en Yáñez-Vergara et al. (2022), utilizando carbón activado de origen fósil y vegetal y empleando la ECV. El inventario del ciclo de vida (ICV) para el CAF se elaboró a partir de la variable proxy “Carbón activado, granular {RdM} | Producción de carbón activado | Valor de corte, U”. El ICV para el CAV fue reportado por Arena et al. (2016).

1.1. Descripción del sistema

El objetivo fue evaluar la sustentabilidad ambiental de la BRF GBAER (H-M-Z-S-NN) con uso de CA de origen fósil y vegetal para determinar los potenciales impactos ambientales (PIA). La UF y el flujo de referencia implicaron el procesamiento de 1, 000 kilogramos de FORSU, la cual tiene una humedad de 35% y está conformada en 60% por cartón y papel, en tanto el restante 40% corresponde a residuos de alimentos. El análisis comprende desde la recepción de los residuos a la entrada de la BRF hasta la disposición final de los mismos.

1.2. Biorrefinería GBAER con uso de carbón activado vegetal

Como primer paso, la FORSU es recibida en la entrada de la planta y posteriormente acondicionada con agua residual (o de efluentes internos) para incrementar su humedad, mientras que su alcalinidad-pH es estabilizada con fosfato. Las corrientes de salida son enviadas al relleno sanitario y están compuestas principalmente por sólidos del proceso de sacarificación, digestatos anaeróbicos filtrados y sólidos refermentados en la etapa Z. La activación química del carbón se realizó a 950°C durante tres horas.

La BRF H-M-Z-S-NN es autosuficiente. Genera aproximadamente 600 MJ netos, equivalentes a 167 kWh de energía de alto y bajo voltaje. La electricidad fue producida mediante cogeneración (metano) y por medio de celdas de combustible (biohidrógeno). La BRF es 100% autosuficiente en energía eléctrica y en 60% de la energía térmica requerida, de manera que el excedente de energía eléctrica puede ser usado para suplir el déficit de energía térmica (40%).

1.3. Biorrefinería GBAER con uso de carbón activado de origen fósil

La BRF con uso de CA de origen fósil y la BRF con uso de CA de origen vegetal poseen las mismas seis etapas H-M-S-Z-NN descritas en Sotelo-Navarro et al. (2022) y en Yáñez-Vergara et al. (2022). La diferencia radica en el uso de CAF en la producción de bionanobiopartículas en la etapa NN.

1.4. Inventario de ciclo de vida

El ICV de la BRF con uso de carbón activado de origen fósil y vegetal se obtuvo a partir de los datos reportados sobre balances de masa y energía de los diversos procesos e información experimental obtenida por el GBAER (Escamilla-Alvarado et al., 2013, 2014, 2015, 2017; Romero-Cedillo et al., 2018).

La BRF-CAF utilizó carbón activado de origen fósil en la etapa NN y se obtuvo a partir de la información contenida en el proxy SimaPro “Activated carbon, granular {RoW}| activated carbon production, granular from hard coal | Cut-off, U” tomado de la base de datos Ecoinvent (PRé Sustainability, 2019). El ICV de la BRF con uso de CA de origen vegetal se utilizó siguiendo lo reportado por Arena et al. (2016) (tabla 1, escenario 2).

1.5. Evaluación de impacto ambiental

La ECV se realizó de acuerdo con la metodología descrita en las normas ISO (ISO 14040, 2006; ISO 14044, 2006). Se utilizaron el software SimaPro, Analyst y el método ReCiPe 2016 Hierarchical mip-point. Las emisiones se clasificaron según los 18 PIA: radiación ionizante, formación de ozono en ecosistemas terrestres y en salud humana, escasez de recursos fósiles, calentamiento global, deterioro de la capa de ozono, toxicidad humana carcinogénica y no carcinogénica, ecotoxicidad marina, acidificación terrestre, ecotoxicidad del agua dulce, uso de suelo, eutrofización del agua dulce y el agua marina, ecotoxicidad terrestre, escasez de recursos minerales, consumo de agua y formación de partículas finas.

Se determinaron los potenciales impactos ambientales normalizados (PIAN). La normalización permite comparar las magnitudes de los 18 PIAN empleando la ECV para una determinada tecnología o proceso, como también comparar la magnitud de una categoría de impacto entre ECV realizadas por diferentes

tecnologías (esto último siempre que la UF sea equivalente en todos los casos) (PRé Sustainability, 2019a).

1.6. Métricas de sustentabilidad ambiental basadas en impactos ambientales potenciales normalizados. Índices de sustentabilidad ambiental del GBAER

Se desarrollaron los índices de SA GBAER ∂ , δ y π (ecuaciones [1-3]) con el objetivo de comparar diferentes tecnologías y determinar su sustentabilidad ambiental. Estos índices permiten analizar los resultados obtenidos empleando el software SimaPro y posicionar las tecnologías en un plano δ - π (figura 1), para facilitar su comparación (Yáñez-Vergara, 2022; Sierra-Gachuz et al., 2022). Índices de sustentabilidad ambiental de GBAER ∂ , δ y π (ecuaciones [1-3]).

La ecuación [1] muestra el PIAN_j y representa los potenciales impactos normalizados; j alude al j-ésimo impacto. Si ∂ es mayor, la sustentabilidad disminuye. La suma de los PIAN permite comparar los impactos ambientales obtenidos con diferentes tecnologías. A partir de este concepto se generaron los índices de sustentabilidad ambiental GBAER. Es obligatorio emplear un UF igual o armonizado.

$$A = \sum_{j=1}^{i=18} PIAN_j \quad [1]$$

donde

PIAN = potencial impacto ambiental normalizado

Supongamos que se busca comparar la SA de una tecnología convencional existente, (tecnología de referencia, REFT), con una tecnología en evaluación (EVT).

Es conveniente definir la variable σ como se indica a continuación.

$$\sigma = \log \left[\frac{(\alpha_{REFT})}{(\alpha_{EVT})} \right] \quad [2]$$

donde

REFT = tecnología de referencia

EVT = tecnología evaluada

$\alpha_{\text{REFT}} = \alpha$ de la REFT

$\alpha_{\text{EVT}} = \alpha$ de la EVT

La variable τ es definida a continuación

$$\tau = \log \left[\frac{(N_{\text{EVT}} + 1)}{(N_{\text{REFT}} + 1)} \right]$$

[3]

donde

NEVT: N° de NPEI en REFT mayor que EVT, o equivalentemente, número de PIAN en EVT menor que el PIAN correspondiente en REFT.

NREFT: N.º de PIAN en EVT mayor que REFT, o equivalentemente, número de PIAN en REFT menor que el NPEI correspondiente en EVT.

El plano δ - π mostrado en la figura 1 permite ubicar las variables δ y π como un punto P dentro del plano y comparar diferentes tecnologías para determinar su sustentabilidad ambiental según la posición P; (I) la tecnología evaluada es ambientalmente más sustentable; (II) la tecnología de referencia es ambientalmente más sustentable con restricciones; (III) la tecnología de referencia es ambientalmente más sustentable; y (IV) la tecnología evaluada es ambientalmente más sustentable con restricciones.

Figura 1.
Plano σ - τ



Resultados y discusión

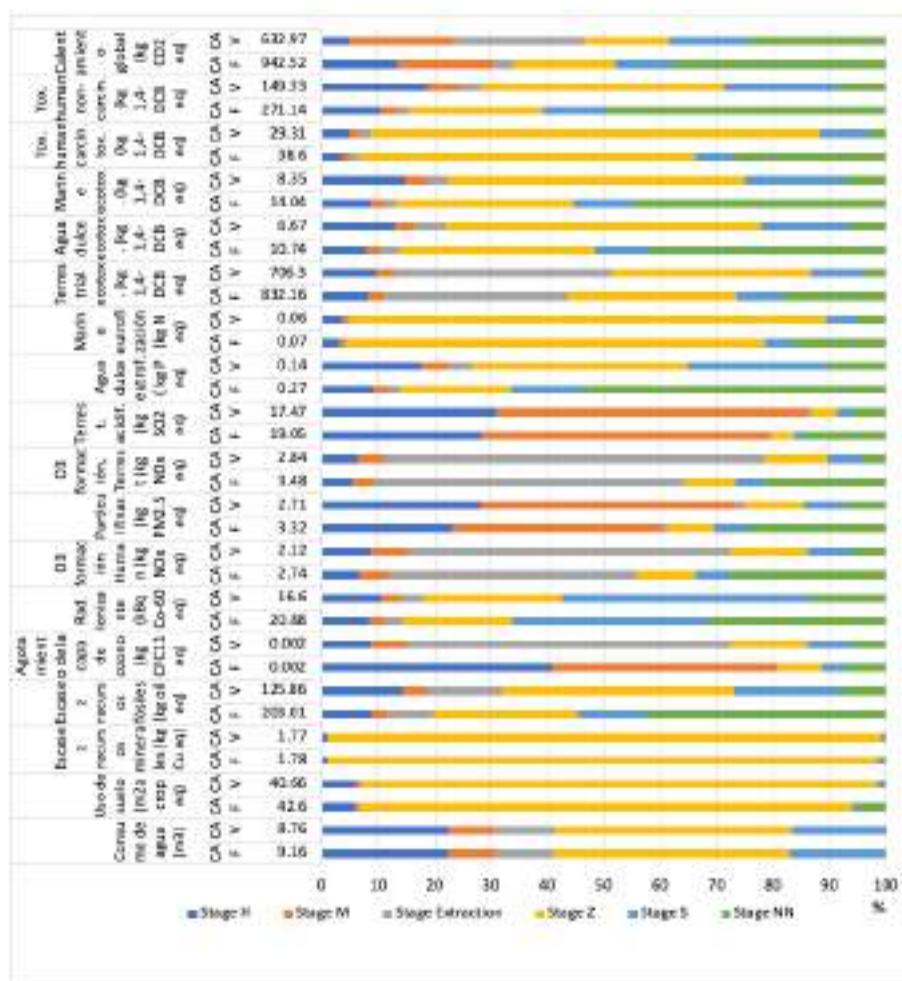
Evaluación de la sustentabilidad ambiental de impactos ambientales de la biorrefinería con uso de carbón activado de origen fósil y vegetal

En la figura 2 se muestra la caracterización de los PIA de ambas biorrefinerías, BRF-CAF y BRF-CAV. A continuación, se exponen las principales tendencias. La figura muestra que 17 PIA de la BRF-CAV fueron inferiores a los de la BRF-CAF, existiendo un empate para la categoría agotamiento de ozono. Las mayores disminuciones porcentuales se registraron para los PIA: eutrofización del agua dulce (48.31%), toxicidad humana no carcinogénica (44.93%), ecotoxicidad del agua marina (40.50%), escasez de recursos fósiles (38.00%) y ecotoxicidad del agua dulce (37.91%).

En este sentido se observa que todas las contribuciones relativas (en porcentaje) a los PIA en la etapa NN de BRF-VAC fueron menores que las de BRF-FAC.

Figura 2.

Potenciales impactos ambientales caracterizados en la BRF



En consecuencia, las contribuciones absolutas (en unidades de PIA) de la etapa NN a los impactos de BRF-CAV fueron menores que las de los impactos de BRF-CAF.

Se observa que la etapa NN realiza contribuciones más fuertes en: calentamiento global (38.0%), eutrofización del agua dulce (53.0%), ecotoxicidad del agua dulce (41.7%), ecotoxicidad del agua marina (44.6) y toxicidad humana

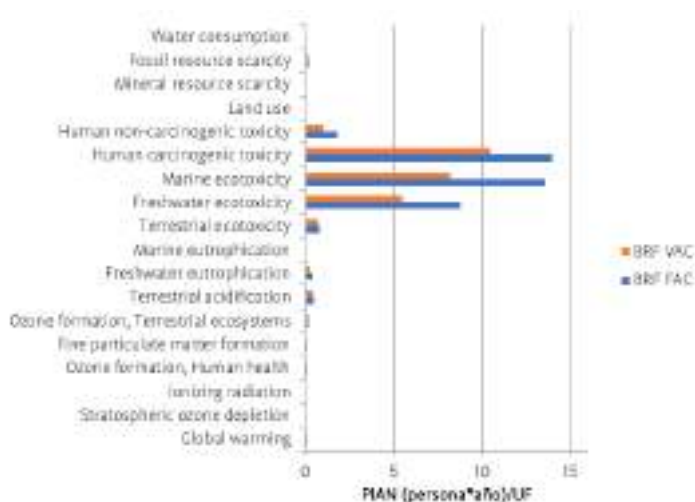
no carcinogénica (49.5%). Es importante resaltar que los PIA correspondientes al calentamiento global disminuyeron de 357.4 a 170.3 kilogramos de CO₂e.

El análisis de los PIAN de ambas BRF confirmó los hallazgos mostrados en la figura 2, mostrando los 18 PIAN de las BRF-CAF y BRF-CAV. Diecisiete impactos ambientales redujeron sus PIAN para la BRF-CAV. Las disminuciones más notables correspondieron a un PIAN de alto valor relacionado con la ecotoxicidad y las repercusiones en la salud humana.

El tratamiento relacionado con los desechos de la minería del carbón y la fabricación de CAF requiere 1.8 kWh / kg de carbón activado (PRé Sustainability, 2019b), lo que provoca la liberación de grandes cantidades de gases de efecto invernadero, principalmente CO₂ (5.3 kilogramos de CO₂ por kilogramo de carbón activado). Por lo que se puede inferir que el uso de CAF es responsable de emisiones que influyen de manera importante en el calentamiento global, la toxicidad humana no carcinogénica, la eutrofización del agua dulce y la ecotoxicidad del agua dulce y el agua marina.

Figura 3.

Potenciales impactos ambientales normalizados de la biorrefinería con carbón activado de origen fósil y vegetal



Notas: brf-fac significa biorrefinería con carbón activado de origen fósil; brf-vac significa biorrefinería con carbón activado de origen vegetal.

Comparación de la sustentabilidad ambiental entre las biorrefinerías con carbón activado de origen fósil y vegetal

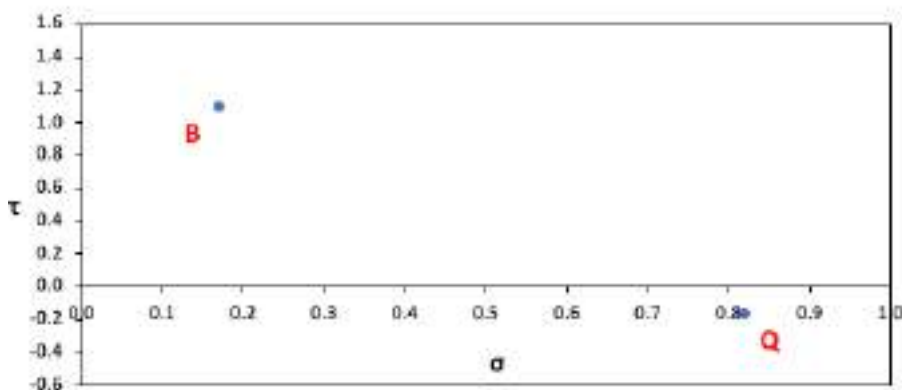
Siguiendo las ecuaciones [1-3], el indicador a para la BRF-CAV fue significativamente menor que el de la BRF-CAF, puesto que el índice a disminuyó al reemplazar carbón activado de origen fósil por el de origen vegetal en la BRF de 40.73 a 27,041 (persona*año/ UF) (-40.13%) y representó una reducción de 13.42 (persona*año/ UF). Al realizar los cálculos para los valores de los otros dos indicadores fueron $s = 0,178$ y $t = 1,091$, de tal manera que podemos ubicar el punto B y comparar la sustentabilidad ambiental de ambas BRF en el plano s - t . Para este caso, el punto B que compara la BRF con carbón activado de origen fósil con el de origen vegetal se ubica en el cuadrante 1, lo que significa que: (i) la tecnología evaluada es ambientalmente más sustentable y que el BRF que utilizó CAV fue más sostenible ambientalmente que el BRF que utilizó CAF con dominancia (figura 4).

La SA de la BRF CAV es mayor, debido a que la manufactura del carbón activado de origen fósil demanda el uso de energía de 1.8 kWh / kg de CA, lo cual implica emisiones de gases de efecto invernadero, principalmente dióxido de carbono (5.3 kilogramos de CO₂ por kilogramo de CA). Por lo que las principales contribuciones a los impactos ambientales para CAF son las emisiones atmosféricas producto de la activación, carbonización y consumo de electricidad (Vilén et al., 2022). Aunado a esto, el uso de carbón activado y el tratamiento de residuos de minería de carbón es responsable de altas emisiones en las categorías de toxicidad humana no carcinogénica, calentamiento global, ecotoxicidad del agua marina y eutrofización del agua dulce (PRé Sustainability, 2019b).

Además, el uso de CAF produce emisiones de Zn (II) y As (V) que van al agua, por lo que realiza una contribución importante a los PIA de ecotoxicidad del agua marina y el agua dulce. En este sentido las emisiones al agua por kilogramo señaladas por proxy de Ecoinvent 'treated Spoil from hard coal mining' (desechos tratados de la minería de carbón duro) fueron de 6.25E-7 kilogramos de As y 1.90E-5 kilogramos de Zn, respectivamente (PRé Sustainability, 2019).

Figura 4.

Posiciones de los puntos B y Q que representan la comparación de sustentabilidad ambiental de ambas biorrefinerías con uso de CAF y CAF en el plano s-t



Conclusión

Este trabajo propone mejoras a la SA de un tipo de BRF y muestra, por primera vez, un análisis cuantitativo de SA cuyo propósito es reducir los PIA por medio de la sustitución de CAF en la BRF. El uso de CAV en la BRF redujo de manera importante todos los PIA y los PIAN. Las mayores disminuciones porcentuales se observaron para los PIA: eutrofización del agua dulce (48.31%), toxicidad humana no carcinogénica (44.93%), ecotoxicidad del agua marina (40.50%), escasez de recursos fósiles (38.00%) y ecotoxicidad del agua dulce (37.91%).

La disminución total de los PIA Alpha al sustituir el carbón activado fue de 40.7 a 27.3 (persona*año/ UF). Los índices de sustentabilidad ambiental α , s y t mostraron que la sustitución del CA de origen fósil por vegetal en la BRF mejoró significativamente su sustentabilidad ambiental y aumentó su superioridad.

Los PIAN mostraron la mayor reducción en la toxicidad humana carcinogénica de 13.93 a 10.47 (persona*año) / UF), mientras que la ecotoxicidad marina disminuyó de 13.60 a 8.19 (persona*año) / UF). El calentamiento global tuvo una contribución de 38% con uso de CA de origen fósil y de 15% con el uso de CA de origen vegetal, equivalente a una reducción de 357 a 170 kilogramos de CO₂e.

Este análisis se limitó al uso de proxys para conformar los ICV. Es recomendable explorar otros escenarios de uso de cáscara de coco, como la incineración con recuperación de energía para el aprovechamiento térmico en el proceso de la BRF.

Referencias

- Arena, N., Lee, J. y Clift, R. (2016). Evaluación de ciclo de vida de la producción de carbono activado de conchas de coco [Life Cycle Assessment of activated carbon production from coconut shells]. *Journal of Cleaner Production*, 125, 68–77. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.03.073>
- Ávalos-Rodríguez, M. L., Díaz-Abrego, M. y Rangel-Vargas, J. M. (2025). La sostenibilidad en los posgrados. Creación de contenidos ambientales en el Doctorado en Innovación UVEG [Sustainability in postgraduate studies. Creation of environmental contents in the UVEG Innovation Doctorate]. *Revista Electrónica en Educación y Pedagogía*, 9(16), 128–144. <https://doi.org/10.15658/rev.electron.educ.pedagog25.06091606>
- Escamilla-Alvarado, C., Poggi-Varaldo, H. M. y Ponce-Noyola, M. T. (2017). Bioenergía y bioproductos de residuos orgánicos municipales como alternativa al vertedero: una evaluación comparativa de ciclo de vida con aplicación prospectiva a México [Bioenergy and bioproducts from municipal organic waste as alternative to landfilling: a comparative life cycle assessment with prospective application to Mexico]. *Environmental Science and Pollution Research*, 24(33), 25602–25617. <https://doi.org/10.1007/S11356-016-6939-Z>
- Escamilla-Alvarado, C., Poggi-Varaldo, H. M., Ponce-Noyola, T., Ríos-Leal, E., Robles-Gonzalez, I. y Rinderknecht-Seijas, N. (2015). Sacarificación de residuos fermentados como parte integral en una biorrefinería conceptual de producción de hidrógeno [Saccharification of fermented residues as integral part in a conceptual hydrogen-producing biorefinery]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 40(48), 17200–17211. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2015.06.164>
- Escamilla-Alvarado, C., Ponce-Noyola, M. T., Poggi-Varaldo, H. M., Ríos-Leal, E., García-Mena, J. y Rinderknecht-Seijas, N. (2014). Análisis energético de la producción en serie de biohidrógeno y metano de residuos orgánicos [Energy analysis of in-series biohydrogen and methane production from organic wastes]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 39(29), 16587–16594. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2014.06.077>
- Escamilla-Alvarado, C., Ponce-Noyola, T., Ríos-Leal, E. y Poggi-Varaldo, H. M. (2013). Evaluación multivariable de la producción de biohidrógeno por fer-

mentación de sustrato sólido de residuos municipales orgánicos en operación semicontinua y por tongadas [A multivariable evaluation of biohydrogen production by solid substrate fermentation of organic municipal wastes in semi-continuous and batch operation]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 38(28), 12527–12538. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2013.02.124>

ISO 14040. (2006). Gestión ambiental — Evaluación del ciclo de vida — Principios y esquema [Environmental management — Life cycle assessment — Principles and framework]. Organización Internacional de Normalización.

ISO 14044. (2006). Gestión ambiental — Evaluación del ciclo de vida — Requisitos y guías [Environmental management — Life cycle assessment — Requirements and guidelines]. Organización Internacional de Normalización.

López-Hernández, V., Limón-Hernández, R. y Morales-Moguel, O. (2025). Diagnóstico de la generación de residuos en municipios del norte de Veracruz [Diagnosis of waste generation in municipalities of northern Veracruz]. *Revista Investigium IRE: Ciencias Sociales y Humanas*, 16(1), 136–158. <https://doi.org/10.15658/INVESTIGIUMIRE.251601.06>

Mendoza Rossano, J. A., Cruz Hernández, J. y Herrera Pérez, L. (2023). Determinación de parámetros físicos y químicos de digeridos de bagazo de agave (*Agave angustifolia* Haw.) obtenidos con pacas biodigestoras [Determination of physical and chemical parameters of digested agave bagasse (*Agave angustifolia* Haw.) obtained with biodigester bales]. *Revista Chapingo Serie Agricultura Tropical*, 3(2), 1–8. <https://doi.org/10.5154/r.rchsagt.2023.03.10>

Romero-Cedillo, L., Poggi-Varaldo, H. M., Breton-Deval, L. y Robles-González, V. S. (2018). Síntesis biológica de nanopartículas de hierro [Biological synthesis of iron nanoparticles]. 6th International Symposium on Environmental Biotechnology and Engineering.

SAGARPA. (2022, 9 de marzo). Producción de coco y copra en México [Coconut and copra production in Mexico]. Gob.mx. <https://www.gob.mx/agricultura/es/articulos/produccion-de-copra-y-coco-en-mexico>

Sierra-Gachuz, H., Poggi-Varaldo, H. M., Sotelo-Navarro, P. X., Escamilla-Alvarado, C., Sojo-Benítez, A., Barrera-Cortés, J. y González-Cardoso, G. (2022). Evaluación de la sostenibilidad ambiental de las biorrefinerías de la fami-

lia H-M-Z-S [Evaluation of environmental sustainability of H-M-Z-S family biorefineries]. En P. Sotelo-Navarro, A. L. Tecorralco-Bobadilla, C. Escamilla-Alvarado, G. Hernández-Flores, I. Nava-Bravo, J. A. López-Díaz y H. Poggi-Varaldo (Eds.), *Ambiente y bioenergía. Perspectivas y avances de la sostenibilidad* (pp. 2–12). ABIAER A. C.

Sotelo-Navarro, P. X., Poggi-Varaldo, H. M., Chargoy-Amador, J. P., Sojo-Benítez, A., Pérez-Angón, M. Á. y Sánchez-Pérez, R. (2022). Impactos ambientales de una biorrefinería HMEZS [Environmental impacts of an HMEZS biorefinery]. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 38, 48–57. <https://doi.org/10.20937/RICA.54332>

PRé Sustainability. (2019). Activated carbon, granular {RoW}| activated carbon production, granular from hard coal | Cut-off, U [Carbono activado, granular {RoW}| producción de carbono activado, granular de carbón duro | Cut-off, U]. En *Ecoinvent v. 9.0.0.35*. PRé Sustainability.

PRé Sustainability. (2019a). SimaPro database manual methods library. Report (v. 9.0.0.35) [Manual de la base de datos SimaPro. Biblioteca de métodos. Informe]. PRé Sustainability.

PRé Sustainability. (2019b). Spoil from hard coal mining {GLO}| treatment of, in surface landfill | Cut-off, U [Residuos de la minería de carbón duro {GLO}| tratamiento en vertedero superficial | Cut-off, U]. En *Ecoinvent v. 9.0.0.35*. PRé Sustainability

Vilén, A., Laurell, P. y Vahala, R. (2022). Evaluación comparativa de ciclo de vida de la producción de carbono activado de diversos materiales/raw materials [Comparative life cycle assessment of activated carbon production from various raw materials]. *Journal of Environmental Management*, 324. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.116356>

Victorino Ramírez, L. y Velázquez Cigarroa, E. (2018). *Educación ambiental, cambio climático y sustentabilidad: Saberes locales y multidisciplinarios para el desarrollo* [Environmental education, climate change and sustainability: Local and multidisciplinary knowledge for development]. Universidad Autónoma Chapingo. ISBN: 978-607-12-0495-0

Yáñez-Vergara, A. G. (2022). Análisis de sustentabilidad de dos escenarios de gestión de residuos urbanos: biorrefinería que genera bioenergías, enzimas y nanobiopartículas (H-M-Z-S-NN) e incineración con recuperación de energía [Sustainability analysis of two urban waste management scenarios: biorefinery generating bioenergies, enzymes and nanobioparticles (H-M-Z-S-NN) and incineration with energy recovery]. Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional.

Yáñez-Vergara, A. G., Morales-López, C. E., Poggi-Varaldo, H. M., Sotelo-Navarro, P. X., Padilla-Viveros, A. y Matsumoto-Kuwabara, Y. (2024, 13 de noviembre). Influencia del carbón activado usado en una biorrefinería tipo GBAER que produce biocombustibles, enzimas y bionanobiopartículas [Influence of spent activated carbon in a GBAER-type biorefinery producing biofuels, enzymes and bionanobioparticles]. Simposio Ambiente y Bioenergía, Veracruz, México. Presentación oral.

Derechos de Autor© 2026 Yáñez-Vergara, Alejandra Gabriela; Poggi-Varaldo, Héctor Mario, Padilla-Viveros, América.



Este texto está protegido por una licencia Creative Commons 4.0, Attribution 4.0 International. Usted es libre para Compartir, copiar y redistribuir el material en cualquier medio o formato y adaptar el documento, remezclar, transformar y crear a partir del material— para cualquier propósito, incluso para fines comerciales, siempre que cumpla la condición de: Atribución: Usted debe dar crédito a la obra original de manera adecuada, proporcionar un enlace a la licencia, e indicar si se han realizado cambios. Puede hacerlo en cualquier forma razonable, pero no de forma tal que sugiera que tiene el apoyo del licenciante o lo recibe por el uso que hace de la obra.

GESTIÓN DE RESIDUOS EN LA CIUDAD DE MÉXICO: MODELOS MATEMÁTICOS Y LA CURVA DE KUZNETS

Waste Management in Mexico City: Mathematical Models and the Kuznets Curve

Bernardino De la Cruz-Márquez^{1*}, María Concepción Martínez-Rodríguez², Diego Domínguez-Solís³

.*Autor de correspondencia

DOI: [10.56643/rcia.v5i1.248](https://doi.org/10.56643/rcia.v5i1.248)

Como citar este artículo: De la Cruz-Márquez, B., Martínez-Rodríguez, M. C. y Domínguez-Solís, D. (2026). Gestión de residuos en la Ciudad de México: modelos matemáticos y la curva de Kuznets. Revista Científica de Ingenierías y Arquitectura. 5(1). 139-165. <https://doi.org/10.56643/rcia.v5i1.248>

Resumen

Los residuos sólidos urbanos (RSU) representan un desafío crítico para las me-gaciudades, particularmente en la Ciudad de México, donde los altos costos operativos y la logística ineficiente han dificultado su gestión. En este estudio se investigó la aplicación de modelos matemáticos para optimizar el sistema, con el objetivo principal de reducir costos y validar la relación tipo curva am-biental de Kuznets (CAK) entre el crecimiento económico y la generación de re-siduos. La metodología se sustentó en la recolección de datos de generación de residuos y del PIB de las 16 alcaldías de la CDMX en el periodo 2006-2023 de fuentes de la Sedema y el INEGI. Posteriormente se hizo la depuración de datos. Los resultados evidenciaron una reducción potencial en costos y emisiones, así como una correlación significativa entre desarrollo económico y generación de residuos, respaldando la hipótesis de Kuznets. El estudio aportó datos valiosos para lograr una planificación urbana sostenible. En conclusión, la integración de modelos matemáticos con análisis socioeconómicos y ambientales demos-tró ser eficaz para mejorar la gestión de RSU, abonando a lograr un sistema más económico, eficiente y sostenible en entornos urbanos complejos y brindando a las autoridades información para futuros desarrollos.

1 Alumno del Centro Interdisciplinario de Investigaciones y Estudios sobre Medio Ambiente y Desarrollo del Instituto Politécnico Nacional. ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-2954-2714>. Correo electrónico: ber31032000@gmail.com

2 Doctora en Política Pública. Centro Interdisciplinario de Investigaciones y Estudios sobre Medio Ambiente y Desarrollo del Instituto Politécnico Nacional. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3094-5411>. Correo electrónico: mcmartinezr@ipn.mx

3 Maestro en Ciencias en Estudios Ambientales. Centro Interdisciplinario de Investigaciones y Estudios sobre Medio Ambiente y Desarrollo del Instituto Politécnico Nacional. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8402-5157>. Correo electrónico: ddominguez1800@alumno.ipn.mx

Recibido: 18/01/2026 | Aceptado: 02/03/2026 | Publicado: 15/06/2026

Los autores declaran no tener ningún conflicto de interés. La investigación fue financiada con recursos de los autores.

Palabras clave: optimización, gestión, contaminación (Tesauros); modelos matemáticos, curva de Kuznets (palabras clave del autor).

Abstract

Municipal solid waste (MSW) represents a critical challenge for megacities, particularly in Mexico City, where high operating costs and inefficient logistics have hampered its management. This study investigated the application of mathematical models to optimize the system, with the main objective of reducing costs and validating the Kuznets Environmental Curve (KEC) relationship between economic growth and waste generation. The methodology involved collecting data on waste generation and GDP from the 16 municipalities of Mexico City for the period 2006-2023, from sources such as SEDEMA and INEGI. The data was then cleaned. The results showed a potential reduction in costs and emissions and a significant correlation between economic development and waste generation, supporting Kuznets' hypothesis. The study provided valuable data for sustainable urban planning. In conclusion, the integration of mathematical models with socioeconomic and environmental analyses proved effective in improving MSW management, achieving a more economical, efficient, and sustainable system in complex urban environments, and providing authorities with information for future developments.

Keywords: optimization, management, pollution (Thesauri); mathematical models, Kuznets curve (author's keywords).

Introducción

En el siglo XXI, se constata la existencia de una urbanización acelerada. Según las Naciones Unidas, en 2014 había 28 megaciudades que aglutinaban unos 453 millones de personas (aproximadamente 2% de la población urbana). Para 2018, ya eran 33 megaciudades (casi una de cada ocho personas en el mundo vivía en ellas). Según proyecciones de las Naciones Unidas, para 2050, aproximadamente 68% de la población mundial residirá en áreas urbanas, lo que añadirá 2, 500 millones de personas a las ciudades. Este crecimiento sin precedentes, especialmente concentrado en Asia y África, ejerce una presión masiva sobre la infraestructura y los servicios básicos, siendo la gestión de los residuos sólidos urbanos (RSU) uno de los mayores desafíos. La mayoría de los residuos mundiales proviene de zonas urbanas. Aunque no hay una cifra global conjunta, el Banco Mundial señala que en países de ingreso bajo 48% de los

residuos recolectados proviene de áreas urbanas, frente a sólo 26% procedentes de áreas rurales. Es decir, las ciudades generan muchos más residuos que el campo. El Programa de la ONU para el Medio Ambiente (PNUMA) informó que la generación total de residuos sólidos urbanos fue de unos 2, 300 millones de toneladas en 2023.

A nivel global, el Banco Mundial estima que la generación de RSU superará los 3, 800 millones de toneladas para 2050, un aumento de aproximadamente 56% con respecto a los niveles actuales. Aunque no existe un dato oficial del porcentaje exacto para 2050, es lógico inferir que el porcentaje de residuos generados en áreas urbanas seguirá al alza.

La Ciudad de México (CDMX) enfrenta retos particulares debido a su densidad poblacional (6, 163 hab/ km²). La concentración de población, la alta diferencia socioeconómica entre alcaldías y las actividades económicas realizadas en estas áreas generan altos volúmenes de desechos, cuya gestión inadecuada no sólo acarrea graves consecuencias ambientales y para la salud pública, sino también costos operativos crecientes. La gestión de residuos sólo puede utilizar entre 20% y 50% del presupuesto en ciudades de ingresos bajos y medios (ONU-Hábitat; Banco Mundial), lo que presiona las finanzas locales; además, produce consecuencias ambientales y de salud pública devastadoras, como la contaminación del suelo y el agua, la proliferación de transmisores de enfermedades y la emisión de gases de efecto invernadero.

En este contexto, resulta fundamental comprender los factores que influyen en la generación de RSU, entre los que destacan el nivel de desarrollo económico y las disparidades socioeconómicas. Para el caso de México, la gestión de RSU está enmarcada en la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos (LGPGIR), la cual establece la jerarquía para el manejo de residuos, priorizando la prevención y minimización, seguidas por la valorización (reúso, reciclaje) y, por último, la disposición final segura. La LGPGIR clasifica los residuos en urbanos, de manejo especial y peligrosos, y distribuye las responsabilidades entre los tres niveles de gobierno. Específicamente, la gestión de los residuos sólidos urbanos recae en los municipios y, en el caso de la CDMX, en las 16 alcaldías. A nivel local, la Secretaría del Medio Ambiente de la Ciudad de México (Sedema) complementa esta normativa con la Ley de Residuos Sólidos de la Ciudad de México y su Programa de Gestión Integral de Residuos (PGIR). Estas regulaciones buscan adaptar la política ambiental federal a la complejidad de la capital, promoviendo iniciativas como la separación de residuos y la

economía circular. La integración de la LGPGIR y las regulaciones de la Sedema son cruciales, ya que dictan el marco dentro del cual se puede planificar y optimizar la logística de recolección y tratamiento de residuos.

El crecimiento exponencial en la generación de RSU durante el desarrollo económico ha sido objeto de análisis. La CAK ofrece un marco teórico prometedor al proponer una relación de U invertida entre ingresos per cápita y degradación ambiental: inicialmente creciente, pero reversible tras un umbral de desarrollo. La teoría postula tres fases: una inicial de baja contaminación en economías en vías de desarrollo; una intermedia en que la industrialización y el consumo masivo impulsan un aumento drástico de la degradación; y una final en la que el desarrollo económico sostenido, acompañado de mayor conciencia ambiental, innovación tecnológica y regulaciones más estrictas, conduce a una reducción de la degradación. Sin embargo, la CAK no está exenta de críticas. Algunos estudios argumentan que la curva podría no ser aplicable a todos los contaminantes o que la reducción de la degradación en países desarrollados se debe en gran medida a la “externalización” de industrias contaminantes a naciones en desarrollo, es decir, al traslado de actividades contaminantes desde países desarrollados a países en desarrollo. Otros debates giran en torno a si el punto de inflexión de la curva es alcanzable para los países de ingresos medios y si la curva realmente refleja una mejora ambiental o simplemente un cambio en la composición de la contaminación.

Si bien estudios como el de Juan et al. (2013) han validado esta relación para RSU en Colombia, existe una brecha de investigación en su aplicación a megaciudades latinoamericanas con altas diferencias internas, como la CDMX. Particularmente, se desconoce cómo interactúan variables sociales (por ejemplo, marginación, cobertura de servicios) con la dinámica económica en la generación de residuos por alcaldía. La aplicación de este enfoque en la CDMX presenta particularidades únicas: (1) fragmentación urbana: la ciudad presenta patrones espaciales complejos, donde colonias de altos ingresos coexisten con asentamientos irregulares, generando dinámicas de producción no homogéneas. La composición de los residuos en alcaldías como Benito Juárez o Miguel Hidalgo, con un alto consumo de bienes envasados, difiere drásticamente de las de Iztapalapa o Tláhuac, en las que predominan los residuos orgánicos y de construcción; (2) economía informal: se estima que 35% de los residuos producidos en las ciudades son manejados por redes informales de recolección y reciclaje (Botello-Álvarez et al., 2018). Si bien esta red de reciclaje contribuye a la valorización de los residuos, distorsiona los datos oficiales, afecta la via-

bilidad de los programas de reciclaje formales y expone a los trabajadores a condiciones de trabajo peligrosas y sin seguridad social; (3) cambio climático: las proyecciones indican que para 2050 las temperaturas en la ciudad aumentarán 2-3°C (INECC, 2022), afectando los patrones de consumo y, por ende, la generación de residuos.

Adicionalmente, la optimización operativa mediante modelos matemáticos, como el problema del agente viajero (TSP) o el problema de la asignación de rutas de vehículos (VRP), han demostrado reducir distancias de recolección en un 9-20% en contextos como Monterrey, NL, México (Benítez-Bravo et al., 2021) y emisiones en contextos latinoamericanos. Sin embargo, estos modelos raramente incorporan variables como la CAK para priorizar zonas críticas, limitando su impacto en sistemas más complejos como la CDMX, donde 60% de las calles tienen restricciones de direccionalidad (INEGI, 2020).

Este estudio propone analizar la relación PIB per cápita y generación de RSU a nivel de alcaldía (2006-2023) para identificar patrones tipo CAK y, al mismo tiempo, utilizar este conocimiento para informar la optimización de los sistemas de recolección y tratamiento, brindando a las autoridades de la CDMX herramientas más robustas para la planificación urbana sostenible.

Marco teórico

Entendiendo la cak

Su origen data de los años noventa, de estudios pioneros como el de Grossman y Krueger sobre los efectos del Tratado de Libre Comercio de América del Norte (TLCAN) y el análisis de Shafik y Bandyopadhyay para el World Development Report 1992. Sin embargo, la idea de que el crecimiento económico es indispensable para preservar o mejorar el medio ambiente ya formaba parte del discurso sobre desarrollo sostenible en Our Common Future.

El International Bank for Reconstruction and Development (IBRD) contribuyó significativamente a la difusión de la CAK a través de su World Development Report 1992, señalando que la degradación ambiental no es una consecuencia inevitable del crecimiento, ya que el progreso tecnológico, las preferencias sociales y las inversiones en sostenibilidad pueden alterar esta relación. El informe destacaba que, al aumentar los ingresos, crece la demanda de un entorno más limpio y se incrementan los recursos económicos para lograrlo. Algunos autores, como Beckerman, llevaron esta idea más lejos, afirmando que

la riqueza es, en última instancia, el camino más efectivo —y quizá el único— para alcanzar un medio ambiente saludable.

La teoría sugiere que el crecimiento económico puede favorecer la mejora ambiental a largo plazo, ya que, en una primera fase, el nivel de ingresos aumenta y la contaminación sigue la misma tendencia, pero se alcanza un punto de inflexión en que la contaminación comienza a bajar, ya que ahora los individuos tienen suficientes ingresos para cubrir sus necesidades básicas y toman la iniciativa de realizar un mejor cuidado del medio ambiente. Según el Banco Mundial, México es una economía de ingresos medianos-altos, es decir, una economía emergente. Por tanto, es importante la investigación de estrategias para una mejor gestión de los RSU, a fin de identificar alcaldías con mayores desafíos relacionados con factores socioeconómicos (tales como marginación y cobertura de servicios).

La CAK es una aplicación de la curva de Kuznets en el campo del medio ambiente. El modelo está dado como sigue:

$$(1) A_{i,t} = \beta_0 + \beta_1 Y_{i,t} + \beta_2 Y_{i,t}^2 + \beta_3 Y_{i,t}^3 + \sum_{j=1}^k \gamma_j X_{j,i,t} + \mu_{i,t},$$

En donde A denota el deterioro ambiental en un tiempo t . Y , Y^2 y Y^3 se refieren a los ingresos per cápita elevados a cierta potencia en un tiempo t . $X_{j,i,t}$ son variables que intervienen en la degradación ambiental y μ es un término de error aleatorio. Para las β 's tenemos las siguientes condiciones:

Si $\beta_1 > 0, \beta_2 < 0; \beta_3 = 0$, entonces se tiene la CAK original.

Si $\beta_1 < 0, \beta_2 > 0; \beta_3 = 0$, entonces se tiene la forma de U.

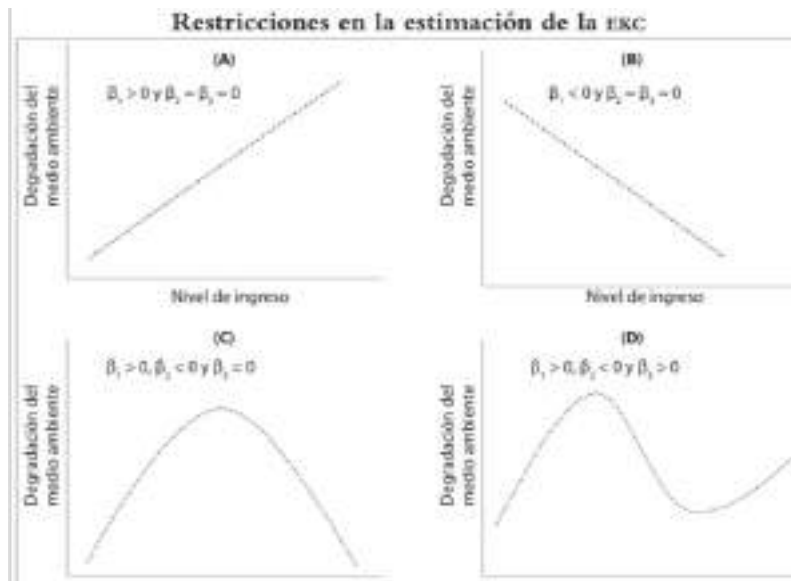
Si $\beta_1 < 0, \beta_2 = \beta_3 = 0$, entonces el daño ambiental indica una disminución lineal.

Si $\beta_1 > 0, \beta_2 = \beta_3 = 0$, entonces el daño ambiental indica un crecimiento lineal.

Si $\beta_1 < 0, \beta_2 > 0$ y $\beta_3 < 0$, entonces el daño ambiental aparecerá como una “U” invertida, mostrando que a largo plazo las emisiones disminuirán, pero también aumentarán en determinados puntos de inflexión.

Si $\beta_1 > 0, \beta_2 < 0, \beta_3 > 0$, entonces se obtiene una curva en forma de N; esto implica que un mayor nivel de ingreso per cápita no genera una reducción de la degradación del medio ambiente.

Figura 1.
CAK según las condiciones.



Nota: Retomado de Horacio Catalán (2014)

Partimos del supuesto de que, si bien las emisiones per cápita pueden diferir entre alcaldías con niveles similares de ingreso, la sensibilidad de dichas emisiones frente a variaciones en el ingreso —es decir, su elasticidad— se mantiene constante dentro de ese grupo. Usualmente, la estimación de esta relación se realiza mediante modelos con datos de panel. Sin embargo, debido a que los datos de panel combinan información a lo largo del tiempo y en sección cruzada, nos encontramos con variaciones entre unidades que no siempre pueden observarse directamente o cuyos efectos individuales no son observables. Una forma de solucionar dicho inconveniente es añadiendo un modelo del error:

$$(2) \gamma_{i,t} = w'_{it}\beta + h_i + \epsilon_{it}$$

Donde w_{it} es un vector de z variables explicativas, β es un vector de parámetros del modelo, h_i es la heterogeneidad no observable y ϵ_{it} es el término aleatorio que tiene media cero y varianza constante.

Hsiao (2003), Baltagi (2005) y Greene (2000) establecieron dos modelos fundamentales para el análisis de datos panel con heterogeneidad no observada:

$$(3) y_{i,t} = w'_{it}\beta + \alpha_i + \epsilon_{it}, \text{ Efectos fijos}$$

$$(4) y_{i,t} = w'_{it}\beta + v_i + \epsilon_{it}, \text{ Efectos aleatorios}$$

- **Efectos fijos:** se supone que las diferencias individuales (no observables) son constantes en el tiempo y se correlacionan con las variables independientes.
- **Efectos aleatorios:** tratan estas diferencias como variables aleatorias no correlacionadas con los regresores, bajo el supuesto de que son parte del error.

Sin embargo, la CAK no es universal: no se cumple para todos los contaminantes, y estudios recientes ponen en duda su validez general.

El “efecto escala” plantea que, si una economía crece sin cambios tecnológicos o estructurales, la contaminación aumentará en forma directamente proporcional a su expansión. Este fenómeno sustenta la creencia tradicional de que el progreso económico y la protección ambiental son incompatibles, aunque esta perspectiva ignora otros factores determinantes que pueden modificar esta relación, como la innovación, la regulación ambiental o los cambios en las preferencias sociales.

Interpolación por splines cúbicos

La interpolación por splines cúbicos es un método de interpolación polinómica por tramos que permite aproximar una función o un conjunto de datos mediante polinomios cúbicos en cada subintervalo, garantizando suavidad y continuidad en los puntos de unión (nodos); a diferencia de los polinomios de alto grado, evita el fenómeno de Runge, que puede generar oscilaciones erráticas y poco realistas entre los puntos de datos.

Para $n + 1$ puntos (x_i, y_i) , el spline $S(X)$ en el intervalo $[x_i, x_{i+1}]$ es:

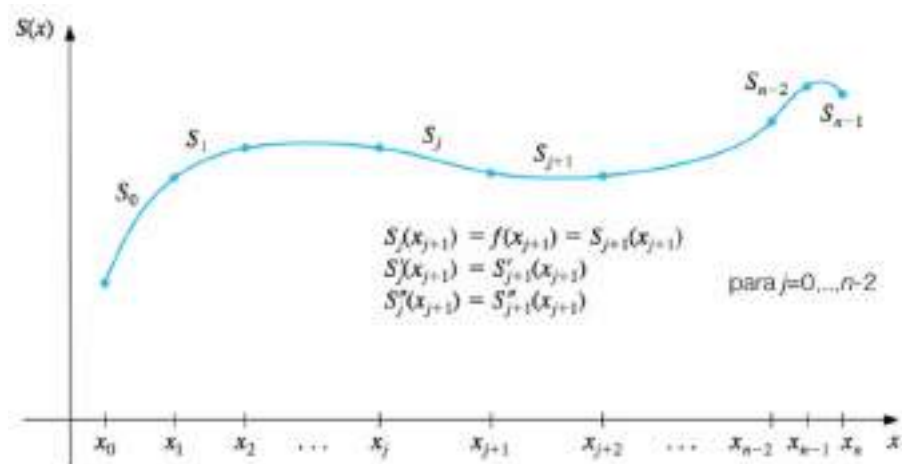
$$S_i(x) = a_i + b_i(x - x_i) + c_i(x - x_i)^2 + d_i(x - x_i)^3$$

Con las condiciones:

- Interpolación: $S_i(x_i) = y_i$.
- Continuidad: $S_i(x_{i+1}) = S_{i+1}(x_{i+1})$
- Derivadas continuas: $S'_i(x_{i+1}) = S'_{i+1}(x_{i+1})$ y $S''_i(x_{i+1}) = S''_{i+1}(x_{i+1})$.

Figura 2.

CAK según las condiciones



Notas: Ramírez Manzanares y Botello (2016), Interpolación. Splines cúbicos, CI-MAT A.C.

La interpolación por splines cúbicos se empleó para reconstruir series temporales incompletas de generación de RSU y datos poblacionales (2006-2023), esenciales para modelar la curva de Kuznets. Esta aproximación es clave para asegurar la robustez de los análisis CAK, que requieren series completas para identificar patrones confiables. Al suavizar las fluctuaciones anuales, dicha técnica permitió visualizar con mayor claridad la tendencia a largo plazo de la generación de RSU y su relación con el desarrollo económico, lo que facilitó la identificación de la relación propuesta por la curva de Kuznets. Esta aproximación no sólo ayuda a validar la hipótesis, sino que también sirve como una

herramienta de previsión para proyectar futuros escenarios de generación de residuos basados en las tendencias económicas actuales.

Indicadores socioeconómicos y su impacto en la generación de residuos

La elección del Producto Interno Bruto (PIB) per cápita como la principal variable socioeconómica de este estudio se justifica por su relevancia como indicador del nivel de desarrollo económico. Dicho indicador refleja la capacidad adquisitiva promedio de una población y nos ayuda a aproximarnos a los patrones de consumo predominantes.

El PIB per cápita es la métrica más ampliamente utilizada para medir el ingreso promedio y el bienestar económico de una población. Su uso en este contexto se basa en la premisa de que un mayor ingreso se traduce en mayor poder adquisitivo. Este poder adquisitivo está directamente relacionado con el consumo de bienes y servicios, muchos de los cuales vienen en empaques o generan residuos al ser utilizados. El aumento en el consumo de productos envasados, comidas procesadas y productos de consumo duraderos, característico de las economías en crecimiento, contribuye directamente a incrementar la cantidad y la complejidad de los residuos generados.

Aunque existen otros indicadores relevantes, como el Índice de Desarrollo Humano (IDH) o el Índice de Pobreza Multidimensional, a menudo éstos combinan múltiples factores (educación, salud, vivienda) que, si bien ofrecen una visión más holística del bienestar, pueden diluir la relación directa entre el poder económico y los hábitos de consumo que son la base de la hipótesis de la curva ambiental de Kuznets. La elección del PIB per cápita, por lo tanto, se justifica por su capacidad para aislar y medir de manera más precisa la variable económica que está en el corazón de la teoría de Kuznets.

Adicionalmente, el PIB per cápita a nivel de alcaldía es una variable que presenta una alta heterogeneidad dentro de la CDMX, lo que es crucial para este estudio. La disparidad en los ingresos entre las diferentes alcaldías —por ejemplo, el alto poder adquisitivo de la Miguel Hidalgo en comparación con la de Iztapalapa— permite un análisis más detallado de cómo esta variable económica se correlaciona con la generación de residuos a una escala subnacional, brindando una perspectiva única y contextualizada que no podría obtenerse con indicadores a nivel de ciudad o país.

Basándonos en Díaz Del Águila y Rodríguez Guirola (2019) podemos hacer una modificación para aplicarla en las instituciones de la CDMX. Es cierto que para la implementación en grandes campus (como la UNAM o el IPN), es imprescindible realizar un análisis financiero. Se deben calcular indicadores como el Valor Actual Neto (VAN), la Tasa Interna de Retorno (TIR) y la razón Beneficio/Costo (B/ C) para elegir la opción que sea económicamente factible y ambientalmente responsable.

MATERIALES Y MÉTODOS

Nos basamos en un enfoque cuantitativo y longitudinal, utilizando una serie de tiempo de 16 años (2008-2023). Los datos utilizados se obtuvieron de fuentes oficiales y públicas, lo que asegura la fiabilidad de la información:

- **Generación de Residuos Sólidos Urbanos (RSU):** los datos sobre la cantidad de residuos generados en cada una de las 16 alcaldías de la CDMX fueron recopilados de los informes anuales de la Secretaría del Medio Ambiente de la Ciudad de México (Sedema). La información se organizó en hojas de cálculo de Microsoft Excel, en las que la generación de residuos se expresó en toneladas por día.
- **Datos socioeconómicos y demográficos:** los datos de Producto Interno Bruto (PIB) per cápita y la densidad poblacional de cada alcaldía se obtuvieron de las bases de datos del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), específicamente del Censo de Población y Vivienda y la Encuesta Nacional de Ocupación y Empleo (ENOE).

Generación de rsu por alcaldía

La CDMX genera diariamente una cantidad considerable de residuos sólidos urbanos. Diversas fuentes reportan cifras ligeramente diferentes, lo que podría deberse a variaciones en los años de referencia, las metodologías de medición o las fuentes de datos. Según WtERT, la ciudad produce un total de 13 149 toneladas de residuos sólidos urbanos al día, lo que equivale a 1.4 kilogramos por habitante. Otra fuente (residuos sólidos-Congreso de la Ciudad de México) indica una cifra de 13 000 toneladas diarias, con un promedio de un kilo por ciudadano, señalando un incremento posterior a los inicios de la pandemia de Covid. Datos más recientes, de 2023 (Inventario de Residuos Sólidos de la CDMX), estiman una generación de 12 454 toneladas al día, con una tasa per

cápita de 1.071 kilogramos/habitante/día. Estas cifras sitúan a la CDMX entre las urbes con mayor producción de residuos a nivel mundial.

La generación por alcaldía varía en función de factores sociales, económicos y ambientales. Según datos de la Secretaría del Medio Ambiente (Sedema), las alcaldías que generaron más residuos en 2023 fueron la Gustavo A. Madero e Iztapalapa. Haciendo un análisis con base a los datos de la Sedema para el periodo 2008-2023 (los datos de 2006 y 2007 son inconclusos), observamos que la tendencia es la misma.

Figura 3.
Gráfica de residuos generados en el periodo 2008-2023



La CDMX destaca como una de las metrópolis más grandes y dinámicas del mundo, y desempeña un papel fundamental en la economía del país. Su intensa actividad productiva la convierte en un punto clave para el comercio y la inversión, tanto dentro del país como en el ámbito internacional. El tamaño de su área metropolitana, la más grande del continente americano y de las más pobladas a nivel global, implica un mercado y una fuerza laboral considerables. Entender la distribución de la riqueza dentro de esta ciudad, específicamente a nivel de sus 16 alcaldías, resulta crucial para la formulación de estrategias de gestión efectivas.

piB per cápita de las alcaldías de la CDMX

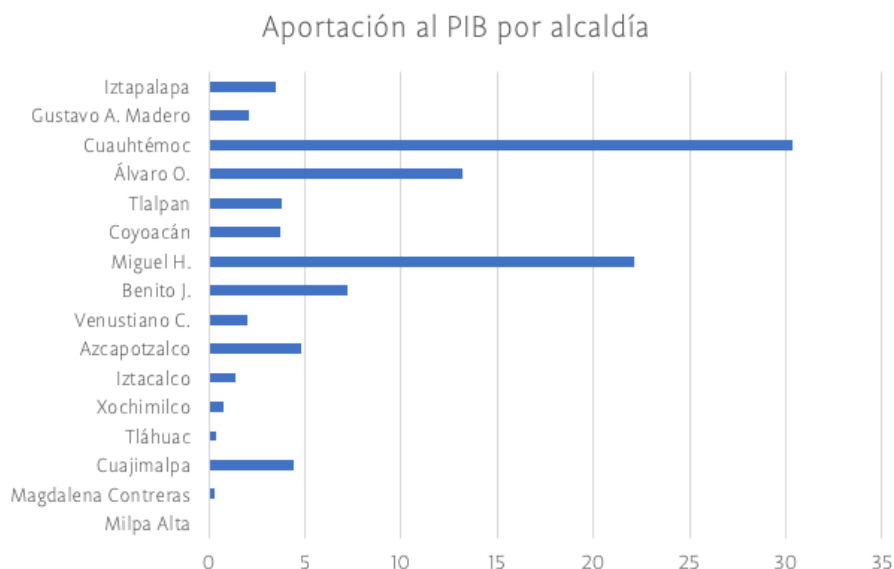
La información específica sobre el PIB per cápita a nivel de cada una de las alcaldías de la CDMX es limitada, ya que el INEGI generalmente reporta este indicador a nivel nacional o estatal. Esto dificulta el análisis detallado de la actividad económica por demarcación territorial. Sin embargo, algunas fuentes proporcionan datos sobre el PIB total generado por ciertos municipios, aunque éstos no se presentan en términos per cápita. El PIB total de una alcaldía refleja la magnitud de su actividad económica, pero no considera el tamaño de su población, un factor esencial para determinar el poder adquisitivo individual. De hecho, una alcaldía con un PIB total elevado podría tener un PIB per cápita relativamente bajo si su población es relativamente alta.

Es importante señalar las limitaciones inherentes al uso de datos generales de la CDMX o el PIB total de algunas alcaldías como medida del poder adquisitivo a nivel individual. Un PIB per cápita alto para la CDMX en su conjunto no garantiza una distribución equitativa de la riqueza en todas las alcaldías. Es probable que existan disparidades económicas significativas entre las diferentes áreas de la ciudad. A menudo, las economías urbanas se caracterizan por una distribución desigual de la riqueza. Además, el PIB total no tiene en cuenta el tamaño de la población, lo que lo convierte en una medida imperfecta del poder adquisitivo individual. Alcaldías con poblaciones grandes podrían tener un PIB total alto pero un PIB per cápita más bajo. Por ello, el poder adquisitivo individual se comprende mejor al analizar la cantidad de riqueza generada por habitante, lo que permite una evaluación más precisa de las condiciones socioeconómicas locales.

De acuerdo con datos de la Secretaría de Desarrollo Económico (Sedeco), la aportación porcentual del PIB local por alcaldía es la siguiente:

Figura 4.

Gráfica de aportación al PIB local



Densidad poblacional

La densidad poblacional de la Ciudad de México es un indicador clave para comprender la distribución territorial y los desafíos de la urbanización en la capital del país. De acuerdo con el Censo de Población y Vivienda 2020, la ciudad alcanzó una densidad promedio de 6 163.3 habitantes por kilómetro cuadrado (INEGI, 2020a). No obstante, esta cifra promedio oculta marcadas desigualdades entre las distintas demarcaciones territoriales.

En el extremo más alto se encuentran Iztacalco, Cuauhtémoc y Benito Juárez, con densidades superiores a 16 000 habitantes por kilómetro cuadrado, seguidas por Iztapalapa, que, además de ser la alcaldía más poblada, concentra casi dos millones de habitantes en poco más de 117 kilómetros cuadrados (INEGI, 2020b). Por el contrario, Milpa Alta, Tlalpan y Cuajimalpa registran densidades muy bajas, inferiores a 3 000 habitantes por kilómetro cuadrado en algunos casos, debido a la presencia de extensas áreas rurales y de conservación (INEGI, 2020b).

Tabla 1.*Densidad poblacional por alcaldía en la CDMX (Censo2020).*

Alcaldía	Población 2020	Densidad (hab/km²)
Iztacalco	404,695	17,369
Cuauhtémoc	545,884	16,848
Benito Juárez	434,153	16,303
Iztapalapa	1,835,486	15,687
Venustiano Carranza	443,704	13,284
Azcapotzalco	432,205	12,840
Gustavo A. Madero	1,173,351	12,473
Coyoacán	614,447	11,295
Miguel Hidalgo	414,470	8,820
Álvaro Obregón	759,137	7,894
Tláhuac	392,313	4,597
Xochimilco	442,178	3,624
Magdalena Contreras	247,622	3,320
Cuajimalpa	217,686	2,689
Tlalpan	699,928	2,243
Milpa Alta	152,685	668

Otros indicadores económicos relevantes

El Índice de Bienestar Social en la Ciudad de México (IBS-CDMX) clasifica a Benito Juárez, Miguel Hidalgo, Azcapotzalco y Coyoacán con los puntajes más altos, categorizándolos como de “Bienestar Social Muy Alto”. Cuauhtémoc, Venustiano Carranza, Iztacalco y Álvaro Obregón se sitúan en la categoría de “Bienestar Social Alto”. En contraste, Milpa Alta, Xochimilco y Tláhuac presentan los puntajes más bajos, con un “Bienestar Social Bajo” (Informe Económico del Distrito Federal). Los puntajes del IBS, que consideran ingresos, educación, salud y otras dimensiones de bienestar, se correlacionan fuertemente con el poder adquisitivo. El alto ranking de Benito Juárez y Miguel Hidalgo es significativo. Un mayor bienestar social generalmente implica mejores condiciones económicas y acceso a recursos.

La información recolectada se almacenó en una base de datos relacional en Excel. Para los años en los que no se disponía de información completa, se aplicó el método de interpolación por splines cúbicos para estimar los valores faltantes. Esta técnica permitió generar una curva suave y continua que se

ajusta a los puntos de datos existentes, proporcionando estimaciones realistas y coherentes para la generación de RSU y de las variables socioeconómicas en los años intermedios. Este proceso se llevó a cabo utilizando un software en Python especializado, que asegura la precisión de los cálculos.

Todos los datos, tanto los recolectados como los interpolados, se consolidaron en una única base de datos maestra en formato de hoja de cálculo. Ésta sirvió como fuente de información para todos los análisis posteriores.

Tabla 2.

Datos de residuos, PIB per cápita y densidad poblacional por alcaldía y año

Alcaldía	Año	Residuos (ton/día)	PIB PER CÁPITA (PESOS)	Densidad (hab/ha)
Milpa Alta	2008	102	16280727	471
Milpa Alta	2009	105	17707857	485
Milpa Alta	2010	110	18762157	486
Milpa Alta	2011	78	19080529	605
Milpa Alta	2012	113	19475777	493
Milpa Alta	2013	116	19435359	471
Milpa Alta	2014	117	19692905	473
Milpa Alta	2015	118	20322960	475
Milpa Alta	2016	119	20487832	462
Milpa Alta	2017	120	20809880	437
Milpa Alta	2018	121	20992854	409
Milpa Alta	2019	122	20775531	387
Milpa Alta	2020	169	18731375	380
Milpa Alta	2021	172	19002560	397
Milpa Alta	2022	175	22694437	447
Milpa Alta	2023	178	29700051	539
Magdalena	2008	231	8670791	3763
Magdalena	2009	239	9556226	3777
Magdalena	2010	245	10247359	3844
Magdalena	2011	196	10537845	3172
Magdalena	2012	249	10870595	3737
Magdalena	2013	251	10960831	3816

Alternativas para la gestión de residuos sólidos en entornos más pequeños

En la CDMX se asientan dos de las instituciones (Instituto Politécnico Nacional y Universidad Nacional Autónoma de México) con la mayor matrícula del país, incluyendo el nivel medio superior. Sus fuentes oficiales indican que ambos suman un aproximado de 626, 000 estudiantes y aproximadamente 90% se encuentra matriculado en la CDMX. Debido a eso, dichas instalaciones sirven como área de estudio de la gestión de los residuos urbanos de una población que tiene mayor acceso a la información de educación ambiental. En ciertas investigaciones se menciona que se ha identificado la “falta de cultura de la no basura” y la baja sensibilidad de la comunidad estudiantil, lo que resulta en la pérdida de materiales con potencial de reciclaje.

Surge una pregunta: ¿por qué nos cuesta tanto separar la basura?

Para que cualquier plan de recolección de RSU en la UNAM o el IPN funcione, no basta con poner botes de colores; hay que entender qué pasa por la cabeza de la comunidad estudiantil y administrativa. Pensando de esta forma, surgen elementos clave que explican por qué fallan los programas y cómo podemos atacarlos.

- Romper la ilusión mágica: vivimos desconectados; tiramos algo y creemos que “alguien más” o la tecnología lo resolverá mágicamente. En la universidad, la estrategia debe mostrar a los estudiantes a dónde va su basura, para que asuman su responsabilidad.
- Salud mata conciencia: a veces el discurso de “salvar al planeta” no basta. Aguilar (2023) sugiere que la gente reacciona mejor y participa más cuando siente que la basura es un riesgo directo para su salud (focos de infección), no sólo un problema ecológico lejano.
- Cambio de chip: todo depende de cómo lo vemos. Si es “basura”, estorba; si es “residuo”, vale dinero. Hay que educar para que los estudiantes vean una botella o una cáscara como un recurso útil, no como suciedad.

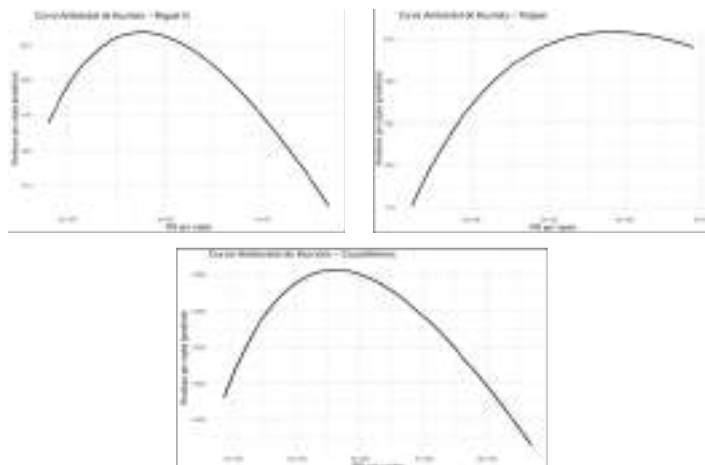
Resultados

Relación entre pib per cápita y generación de rsu por alcaldía: validación de la curva ambiental de Kuznets (cak)

Este apartado presenta los resultados del análisis estadístico y gráfico para evaluar la existencia de una relación tipo CAK entre el PIB per cápita y la generación de residuos sólidos urbanos (RSU) en las 16 alcaldías de la CDMX. Los datos se procesaron mediante Python + pandas y R, y se visualizaron con ggplot2.

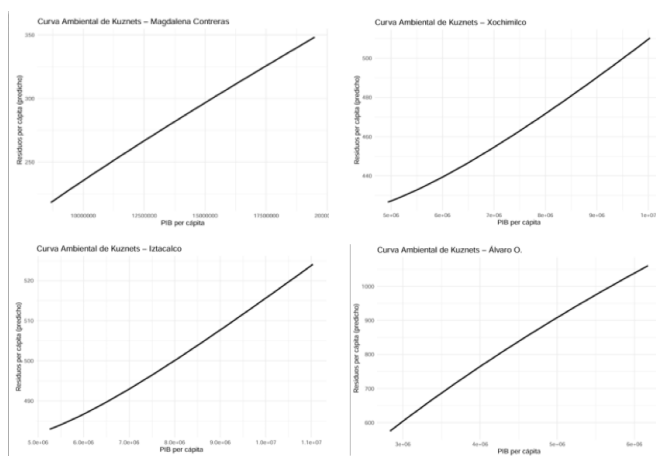
En las alcaldías Cuauhtémoc, Tlalpan y Miguel Hidalgo se observa una curva en forma de U invertida (gráfica 3), en la que la generación de RSU aumenta con el ingreso hasta un punto de inflexión (~\$5.5 millones anuales), para luego disminuir. Esto coincide con la teoría de la CAK: a mayor desarrollo económico, se implementan políticas de sostenibilidad que reducen la generación per cápita.

Figura 5.
Curva de Kuznets de ciertas alcaldías



En La Magdalena Contreras, Iztacalco, Xochimilco y Álvaro Obregón, la generación de RSU crece casi linealmente con el ingreso. Esto sugiere que no se ha alcanzado el umbral de desarrollo necesario para activar mecanismos de reducción de residuos, posiblemente debido a los altos niveles de desigualdad o a la falta de infraestructura sostenible.

Figura 6.
Curva de Kuznets de ciertas alcaldías



Las restantes alcaldías muestran una dispersión significativa de los datos, sin un patrón claro o, en otro caso, una curva en forma de U que abre hacia arriba. Factores como la baja densidad poblacional o la recolección informal podrían explicar esta variabilidad; también hay factores que no hemos integrado que podrían causar estos resultados, tales como: tipo de actividad económica, patrones de consumo, tasa de urbanización, corrupción y mala gobernanza, et-cétera.

Figura 7.
Curva de Kuznets de ciertas alcaldías

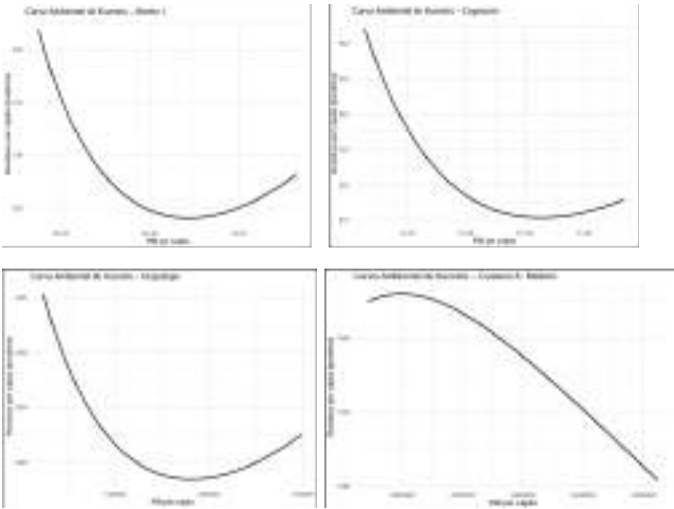


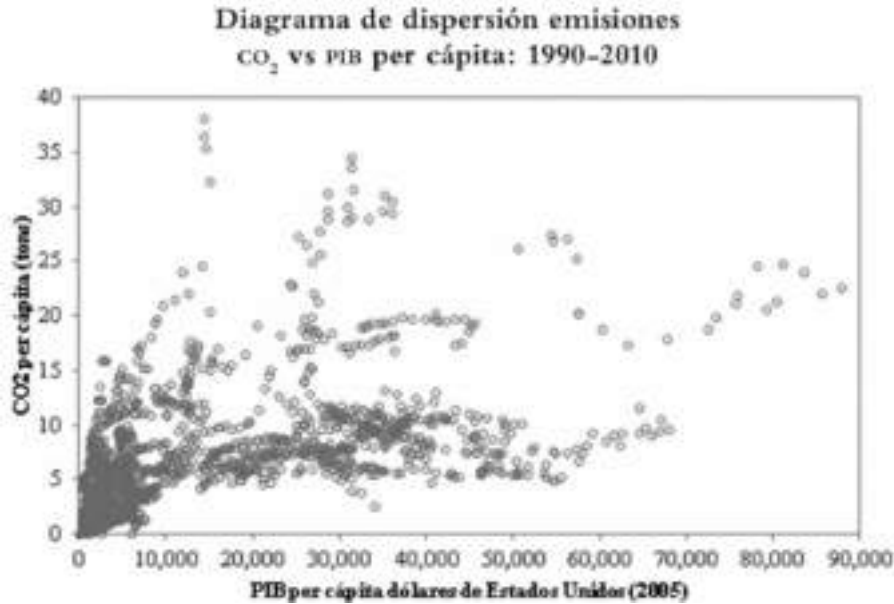
Tabla 3.
Síntesis general de resultados

Patrón CAK	Alcaldías	PIB per cápita en punto de inflexión	Implicaciones
U invertida	Cuauhtémoc, Tlalpan y Miguel Hidalgo.	~\$5.5 millones anuales	Madurez en políticas ambientales.
Semilineal positiva	La Magdalena Contreras, Izta-calco, Xochimilco y Álvaro Obregón	N/ A	Urgencia de intervención pública.

U normal	Cuajimalpa, Benito Juárez, Coyoacán e Iztapalapa	N/ A	Necesidad de estudios cualitativos.
Sin patrón claro	Alcaldías restantes	N/ A	Necesidad de estudios cualitativos.
<i>Notas: elaborado por los autores (2025).</i>			

Comparando estos resultados con los obtenidos por Catalán (2014), quien se basó en EE. UU., vemos que se verifica la existencia de la curva de Kuznets; más aún, las economías en vías de desarrollo muestran una correlación robusta entre el crecimiento y las emisiones, mientras que, en cierto punto, los países desarrollados no muestran una mitigación de emisiones per cápita, de hecho, se mantienen constantes.

Figura 8.
Diagrama de dispersión emisiones CO2 VS PIM per cápita: 1990-2010



Nota. Retomado de Horacio Catalán (2014)

Más allá de los números: las matemáticas revelan la hipocresía ambiental

Para que cualquier modelo matemático funcione —incluyendo la CAK—, necesitamos datos reales que alimenten las ecuaciones. Jiménez-Carrasco y Segura-Salazar (2024) proponen una fórmula real para medir qué tan “verde” es una persona. Los autores construyeron un Índice de Preocupación, Conciencia y Acción (IPCA) que funciona como una escala del 0 al 1, donde 1 sería el ciudadano ecológico perfecto. Se encontró algo que rompe con la lógica de “a mayor educación, menor contaminación” que a veces se asume en los modelos económicos. Resulta que los universitarios obtuvieron una puntuación muy alta en preocupación (0.90), lo que significa que saben que el mundo tiene problemas y les angustia. Sin embargo, cuando la fórmula midió sus acciones reales, el número bajó a 0.75.

Más aún, se confirmó que, tal como sugiere la teoría económica, sin el nivel de ingreso adecuado, la conciencia ambiental no logra transformarse en acciones tangibles. De hecho, en Jiménez-Carrasco y Segura-Salazar (2024) se menciona que una de las razones por las que los estudiantes no compran productos ecológicos es el poder adquisitivo, ya que suelen ser más caros.

Conclusiones

El estudio evidencia que la curva de Kuznets ofrece un marco teórico relevante para analizar la relación entre el desarrollo económico y la generación de RSU en la Ciudad de México.

Sin embargo, el hecho de que haya factores no detectables en los datos puede afectar la precisión en los estimadores, lo que plantea la necesidad de aplicar enfoques metodológicos más sólidos para garantizar una mejor consistencia y validez de los resultados.

Si bien la literatura respalda la existencia de la CKR en diversos contextos, su aplicación específica en la CDMX revela vacíos que requieren mayor investigación, particularmente en la integración de factores socioeconómicos y políticos no considerados en el modelo tradicional. A pesar de estas limitaciones, los hallazgos proporcionan información valiosa para diseñar políticas públicas más efectivas, orientadas a eliminar el vínculo entre el crecimiento económico y la generación de residuos, y a promover un manejo sostenible de los mismos.

En conclusión, este trabajo no sólo contribuye a la discusión académica sobre la CAK en entornos urbanos complejos, sino que abre camino para futuras investigaciones que incorporen variables adicionales y estrategias de optimización logística (como el TSP) para una mejor gestión de residuos en la capital mexicana.

Referencias

- Abrete, G. y Ferraris, M. (2010). La curva ambiental de Kuznets en el sector de residuos sólidos urbanos [The Environmental Kuznets Curve in the Municipal Solid Waste Sector] [Documento de trabajo, HERMES]. https://www.hermesricerche.it/elements/WP_10_1_AF.pdf
- Aguilar-Rodríguez, M. E. (2023). Aprendizajes sociales relacionados con la gestión de residuos en la población adulta [Social learnings related to waste management in the adult population]. *Eduscientia. Divulgación de la Ciencia Educativa*, 6(12), 194–207.
- Baltagi, B. H. (2005). *Econometría [Econometrics]* (3.^a ed.). Springer-Verlag.
- Benítez-Bravo, R., Gómez-González, R., Rivas-García, P., Botello-Álvarez, J. E., Huerta-Guevara, O. F., García-León, A. M. y Rueda-Avellaneda, J. F. (2021). Optimización de rutas de recolección de residuos sólidos urbanos en un contexto latinoamericano [Optimization of municipal solid waste collection routes in a Latin-American context]. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 71(11), 1415–1427. <https://doi.org/10.1080/10962247.2021.1957040>
- Botello-Álvarez, J. E., Rivas-García, P., Fausto-Castro, L., Estrada-Baltazar, A. y Gómez-González, R. (2018). Recolección informal, reciclaje y exportación de residuos valiosos como factor trascendental en la gestión de residuos sólidos urbanos: una realidad latinoamericana [Informal collection, recycling and export of valuable waste as transcendental factor in the municipal solid waste management: A Latin-American reality]. *Journal of Cleaner Production*, 182, 485–495.
- Catalán, H. (2014). Curva ambiental de Kuznets: implicaciones para un crecimiento sustentable [Environmental Kuznets curve: implications for sustainable growth]. *Revista Científica Economía Informa*, 24.
- Cavalheiro, E. A., Pierre, F., Rodriguez, A. M., Thue, P. S. y Kontz, L. B. (2023). Causalidad de Granger y curva ambiental de Kuznets: un análisis de la relación entre recolección de residuos sólidos urbanos, ingreso per cápita y PIB per cápita en Brasil [Granger Causality and Kuznets Environmental Cur-

- ve: An Analysis of the Relationship between Municipal Solid Waste Collection, Per Capita Income and GDP Per Capita in Brazil]. *International Journal of Managerial Studies and Research (IJMSR)*, 11(6), 24–35. <https://doi.org/10.20431/2349-0349.1106004>
- Díaz Del Águila, C. R. y Rodríguez Guirola, J. H. (2019). Alternativas para la gestión de residuos sólidos en la Universidad Católica de El Salvador [Alternatives for solid waste management at the Universidad Católica de El Salvador]. *Anuario de Investigación*, 8, 123–133.
- Evalúa CDMX. (2018). Índice de Bienestar Social de la Ciudad de México [Social Wellbeing Index of Mexico City] [Presentación]. <https://evalua.cdmx.gob.mx/storage/app/media/Archivos/Seminario%202018%20sistema%20bienestar%20social/1presnetacion2ibsd-r-oscar-evaluacdmx.pdf>
- Gobierno del Distrito Federal. (2010). Informe Económico del Gobierno del Distrito Federal [Economic Report of the Federal District Government]. https://servidoresx3.finanzas.cdmx.gob.mx/egresos/Proy_2010/desempEconomico2010.pdf
- Greene, W. H. (2000). *Análisis econométrico [Econometric Analysis]* (4.^a ed.). Prentice Hall.
- Gutiérrez Espinosa, I. (2018). *Uso de algoritmos heurísticos para el diseño de rutas de recolección de residuos sólidos urbanos [Use of heuristic algorithms for the design of urban solid waste collection routes]* [Tesis de maestría, Universidad Politécnica de Tulancingo]. Repositorio Institucional UPT.
- Hsiao, C. (2003). *Análisis de datos de panel [Analysis of Panel Data]* (2.^a ed.). Cambridge University Press.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2020a). Censo de Población y Vivienda 2020. Panorama sociodemográfico de la Ciudad de México [2020 Population and Housing Census. Sociodemographic panorama of Mexico City]. INEGI.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2020b). Censo de Población y Vivienda 2020. Fichas por alcaldía de la Ciudad de México [2020 Population and Housing Census. Sheets by municipality of Mexico City]. INEGI.

- Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2023). Indicadores Económicos de la Ciudad de México [Economic Indicators of Mexico City]. Secretaría de Desarrollo Económico de la CDMX/INEGI. <https://www.sedeco.cdmx.gob.mx/storage/app/media/uploaded-files/indicadores-economicos-de-la-cdmx.pdf>
- Jiménez-Carrasco, J. y Segura-Salazar, C. (2024). Educación ambiental universitaria y sustentabilidad: Brecha entre preocupación y acción [University environmental education and sustainability: Gap between concern and action]. *Revista Investigium IRE: Ciencias Sociales y Humanas*, 15(2), 55–69. <https://doi.org/10.15658/INVESTIGIUMIRE.241502.04>
- Konat, G., Dürrü, Z. y Han, A. (2024). Investigación de la hipótesis de la curva de Kuznets de residuos en países seleccionados de la UE miembros de la OECD: análisis de datos de panel [Investigation of waste Kuznets curve hypothesis in selected OECD member EU countries: Panel data analysis]. *Akademik Yaklaşımlar Dergisi*. <https://doi.org/10.54688/ayd.1473301>
- López-Ibáñez, M. y Blum, C. (2010). Beam-ACO para el problema del viajante con ventanas de tiempo [Beam-ACO for the travelling salesman problem with time windows]. *Computers & Operations Research*, 37(9), 1570–1583. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2009.11.015>
- Secretaría de Desarrollo Económico. (s. f.). La actividad económica de la Ciudad de México [The economic activity of Mexico City]. Gobierno de la Ciudad de México. <https://www.sedeco.cdmx.gob.mx/storage/app/media/uploaded-files/evolucion-de-la-actividad-economica-cdmx.pdf>
- Trujillo Lora, J. C., Carrillo Bermúdez, B., Charris Vizcaíno, C. A. e Iglesias Pinedo, W. J. (2013). La curva ambiental de Kuznets (EKC): un análisis de residuos sólidos enterrados en Colombia [The environmental Kuznets curve (EKC): An analysis of landfilled solid waste in Colombia]. *Revista Facultad de Ciencias Económicas: Investigación y Reflexión*, 21(2), 7–16.
- Yu, Z. (2021). Evaluación de las curvas de Kuznets ambientales para residuos sólidos industriales en China [Assessment of environmental Kuznets curves for industrial solid waste in China] [Tesis de maestría, Cornell University]. Cornell Theses and Dissertations.

Derechos de Autor© 2026 De la Cruz-Márquez, Bernardino; Martínez-Rodríguez, María Concepción; Domínguez-Solís, Diego.



Este texto está protegido por una licencia Creative Commons 4.0, Attribution 4.0 International. Usted es libre para Compartir, copiar y redistribuir el material en cualquier medio o formato y adaptar el documento, remezclar, transformar y crear a partir del material— para cualquier propósito, incluso para fines comerciales, siempre que cumpla la condición de: Atribución: Usted debe dar crédito a la obra original de manera adecuada, proporcionar un enlace a la licencia, e indicar si se han realizado cambios. Puede hacerlo en cualquier forma razonable, pero no de forma tal que sugiera que tiene el apoyo del licenciante o lo recibe por el uso que hace de la obra.

REVISIÓN DEL POTENCIAL DE LOS RESIDUOS ORGÁNICOS Y TEXTILES COMO SUSTRATO EN HUMEDALES ARTIFICIALES

Review of the potential of organic and textile waste as substrates in constructed wetlands

Diego Domínguez-Solís¹, María Concepción Martínez-Rodríguez^{2*}, Héctor Guadalupe Ramírez-Escamilla³

*Autor de correspondencia

DOI: [10.56643/rcia.v5i1.250](https://doi.org/10.56643/rcia.v5i1.250)

Como citar este artículo: Domínguez-Solís, D., Martínez-Rodríguez, M. C. y Ramírez-Escamilla, H. G. (2026). Revisión del potencial de los residuos orgánicos y textiles como sustrato en humedales artificiales. Revista Científica de Ingenierías y Arquitectura. 5(1). 166-189. DOI: <https://doi.org/10.56643/rcia.v5i1.250>

Resumen

El uso de residuos textiles y orgánicos como materiales alternativos a emplear como sustrato en humedales artificiales (HA) se ha convertido en una tendencia sustentable para el tratamiento descentralizado de aguas residuales. A través de una revisión sistemática de la literatura, se analizaron 49 artículos científicos publicados entre 2010 y 2024, los cuales se obtuvieron de las bases de datos Scopus y Web of Science. El análisis se enfocó en identificar los residuos utilizados, sus características y la eficiencia de remoción. Los resultados revelan un creciente interés en el uso de materiales no convencionales, especialmente cáscaras, aserrín, bagazo y olote, así como de otros desechos orgánicos, entre ellos, compost o lodos estabilizados, sin destacar el uso de textiles debido a sus diferentes implicaciones. Estos materiales mostraron una adecuada porosidad, capacidad de adsorción y compatibilidad con el crecimiento vegetal y el desarrollo de comunidades microbianas. Como resultado, encontramos que estos sustratos alcanzaron eficiencias de remoción de 80-85% de demanda biológica de oxígeno (DBO5), 70-80% de demanda química de oxígeno (DQO), 82-95% de nitrógeno y 80-85% de fósforo, comparables

1 Maestro en Ciencias en Estudios Ambientales. Centro Interdisciplinario de Investigaciones y Estudios sobre Medio Ambiente y Desarrollo del Instituto Politécnico Nacional. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8402-5157>. Correo electrónico: diegossolis32@gmail.com

2 Doctora en Política Pública. Centro Interdisciplinario de Investigaciones y Estudios sobre Medio Ambiente y Desarrollo del Instituto Politécnico Nacional. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3094-5411>. Correo electrónico: mcmartinezr@ipn.mx

3 Maestro en Ciencias en Estudios Ambientales y de la Sustentabilidad. Centro Interdisciplinario de Investigaciones y Estudios sobre Medio Ambiente y Desarrollo del Instituto Politécnico Nacional. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9440-4644>. Correo electrónico: ramzhector153@gmail.com

Recibido: 21/01/2026 | Aceptado: 03/03/2026 | Publicado: 15/06/2026

Los autores declaran no tener ningún conflicto de interés. La investigación fue financiada con recursos de los autores.

e incluso superiores a las logradas con materiales tradicionales como grava, arena o tezontle. En conclusión, su beneficio no sólo involucra la remoción de contaminantes sino también la disminución de costos en la construcción de HA y el fortalecimiento de estrategias de economía circular.

Palabras clave: desarrollo sustentable, medio ambiente, recursos naturales (Thesaurus); humedales artificiales, sustrato (palabras del autor).

Abstract

Textile and organic waste as alternative materials for substrates in constructed wetlands (CWs) have become a sustainable trend for decentralized wastewater treatment. Through a systematic literature review, 49 scientific articles published between 2010 and 2024 were analyzed, retrieved from the Scopus and Web of Science databases. The analysis focused on identifying the types of waste used, their characteristics, and pollutant removal efficiency. The results reveal a growing interest in the use of non-conventional materials, particularly shells, sawdust, bagasse, corn cobs, and other organic wastes such as compost or stabilized sludge, while the use of textiles is less frequently highlighted due to their different implications. These materials exhibited adequate porosity, adsorption capacity, and compatibility with plant growth and the development of microbial communities. As a result, these substrates achieved removal efficiencies of 80–85% for biochemical oxygen demand (BOD₅), 70–80% for chemical oxygen demand (COD), 82–95% for nitrogen, and 80–85% for phosphorus, which are comparable to or even higher than those achieved with traditional materials such as gravel, sand, or tezontle. In conclusion, their benefits involve not only pollutant removal but also reduced construction costs of CWs and the strengthening of circular economy strategies.

Keywords: Sustainable development, environment, natural resources (Thesaurus); constructed wetlands, substrate (author keywords).

Introducción

El tratamiento descentralizado de aguas residuales representa una oportunidad creciente en contextos urbanos y rurales, especialmente ante el aumento del estrés hídrico y los limitados recursos para el manejo de plantas de tratamiento de aguas residuales (Santos et al., 2024). En este contexto, los humedales artificiales (HA) han demostrado ser una solución sustentable, eficaz y

de bajo costo para la depuración de aguas domésticas e industriales, en tanto simulan procesos físicos, biológicos y químicos mediante la interacción entre el sustrato, la vegetación y los microorganismos, pudiendo emplearse más de 40 tipos de especies de plantas y 30 diferentes soportes de relleno (Lin et al., 2025).

De acuerdo con Pinho y Matheus (2021), los humedales artificiales promueven y contribuyen a la economía circular, fomentando el reciclaje del agua y el uso de posibles residuos orgánicos como sustrato. Tradicionalmente, los sustratos utilizados en HA han sido de origen inorgánico, como grava, arena o tezontle. En años recientes ha crecido la investigación sobre el uso de materiales alternativos, particularmente residuos orgánicos y textiles reciclados, como opciones viables y ambientalmente responsables (Kivaisi y Zhao, 2024; Agaton et al., 2024). Estos residuos pueden aportar propiedades beneficiosas, como alta porosidad, mayor retención de humedad que los sustratos tradicionales, mayor capacidad de adsorción y una mayor área para la actividad microbiana, sin comprometer la eficiencia de remoción de contaminantes, el buen funcionamiento y la calidad del agua tratada (Yang et al., 2022).

El aprovechamiento de residuos —cáscaras, bagazo, fibras vegetales, olote y textiles posconsumo— como medios filtrantes en HA han cobrado relevancia por su bajo costo, lo cual impulsa los modelos de economía circular (Saeed et al., 2022; Irshad et al., 2024). El presente trabajo tiene como objetivo realizar una revisión sistemática de la literatura científica publicada entre 2010 y 2025 que se centra en el uso de residuos orgánicos y textiles como sustrato en humedales artificiales, evaluando su eficiencia de remoción, la vegetación asociada y los beneficios ambientales derivados. La finalidad es generar un antecedente que promueva la utilización de estos materiales, comúnmente considerados sin un segundo uso, para contribuir a reducir su inadecuada disposición final y a disminuir los costos de construcción de estos sistemas.

Marco teórico

Definición de los humedales artificiales

Los humedales naturales son zonas inundadas con cierta frecuencia para mantener condiciones de saturación de suelo durante gran parte del año. Esto permite el crecimiento de vegetación específica y propicia condiciones para diferentes tipos de fauna (Paredes, 2007 y Reed et al., 1995). En este sentido, Vymazal (2014) menciona que los humedales artificiales son sistemas que

imitan procesos naturales que ocurren en los humedales naturales e implican el uso de plantas acuáticas, material de relleno y agua. Gómez (2021) enfatiza que su estructura es similar a la de un estanque de poca profundidad, en el que el sustrato ocupa la mayor parte de su volumen y sirve como soporte de plantas ornamentales. Por lo tanto, podemos decir que los humedales artificiales son humedales construidos por el hombre en los que existen procesos de depuración de los contaminantes presentes en aguas residuales. Por ello es importante su uso adecuado y su conservación (Junca-Gómez et al., 2024). Los humedales artificiales buscan replicar los procesos de descomposición que ocurren en los humedales naturales. Su estructura se compone principalmente de plantas acuáticas, microorganismos y material de relleno, lo que los convierte en una posible herramienta educativa como, según Fontalvo-Buelvas (2023), lo son los huertos escolares que, además, con las políticas públicas adecuadas, pueden ser implementados como un ejercicio de restauración (Escobar, 2025). El uso de esta alternativa pretende replicar procesos naturales y aprovechar los factores bióticos para la depuración de los contaminantes presentes en el agua residual. El desarrollo de esta ecotecnología abona a aumentar la disponibilidad de agua y a neutralizar el estrés hídrico y la pérdida de biodiversidad (Hu et al., 2022; Latip et al., 2022; López-Rosas et al., 2024; Sun et al., 2019).

Tipos de humedales artificiales y eficiencia en la remoción de contaminantes

Los humedales construidos son sistemas diseñados e implementados para tratar aguas residuales imitando los mecanismos de filtración, sedimentación y degradación biológica que ocurren en los humedales naturales. Se clasifican en sistemas de flujo subsuperficial horizontal (HSSF), subsuperficial vertical (VSSF), de flujo superficial libre (FWS) o sistemas híbridos que combinan dos o más tipos de configuraciones (Wang et al., 2018; Andreo-Martínez et al., 2016; De Souza et al., 2024). Estos sistemas han demostrado ser eficaces en la remoción de diferentes contaminantes (DBO, DQO), nutrientes (nitrógeno, fósforo), metales pesados y patógenos, con eficiencias que varían entre 60% y 95% dependiendo del diseño y las condiciones operativas (Khalifa et al., 2020). Además, se destacan por su bajo consumo energético, la facilidad de operación y mantenimiento, así como por la posibilidad de ser integrados a entornos urbanos (Nuamah et al., 2022).

Materiales orgánicos y reciclados como sustrato en HA

En un HA el sustrato sirve como soporte físico para la vegetación, las comu-

nidades microbianas y facilita la transferencia de oxígeno. En años recientes, diversas investigaciones han estudiado residuos orgánicos y textiles reciclados como sustitutos complementarios o totales de los materiales tradicionales, por ejemplo, tezontle, gravilla, carbón activado, etc. (Ji et al., 2021; Wang et al., 2019). Entre los materiales que han sido empleados como sustratos en los últimos años figuran: bagazo de caña, cáscaras de arroz, aserrín, turba, compost, biochar, fibras de coco y mezclas textiles (principalmente algodón y poliéster), los cuales han demostrado propiedades favorables, como alta superficie específica, capacidad de adsorción de nutrientes y metales, y buena compatibilidad con especies de vegetación acuática (Saeed et al., 2013; Nata et al., 2024).

Función del sustrato en los humedales artificiales

El sustrato constituye uno de los componentes clave en los HA, no sólo como medio físico para el soporte de las raíces de las plantas, sino también como actor en los procesos de adsorción, precipitación, filtración y actividad microbiana; su estructura, composición, área superficial específica, conductividad, porosidad y capacidad de retención hidráulica influyen directamente en la eficiencia del tratamiento (Wang et al., 2024; Patyal et al., 2024). En el diseño de HA normalmente se consideran materiales como grava, arena o tezontle, que ofrecen buena estabilidad estructural, pero cuya capacidad de adsorción de nutrientes o metales pesados suele ser limitada (Cui et al., 2008). Por otro lado, materiales orgánicos y reciclados como biochar, bagazo de caña, aserrín, fibras textiles o compost muestran una mayor interacción química con los contaminantes, debido a que coexiste un mayor número de grupos funcionales y a su alta superficie específica (Kong et al., 2022; Gross et al., 2020).

Materiales y métodos

El presente trabajo es una revisión bibliográfica sobre el potencial de los residuos orgánicos y textiles para ser usados como sustrato en humedales artificiales sin discriminar su impacto. Para la selección de los trabajos de investigación se realizó la búsqueda de las siguientes palabras clave: “constructed wetland”, “organic substrates” y “textile” en la base de datos de Scopus y Web of Science. Posteriormente se analizaron los resultados, en especial de aquellos artículos realizados en el periodo 2010-2025. La búsqueda se limitó al idioma inglés.

Se llevaron a cabo dos análisis: bibliométrico y comparativo. En el primero, a partir del análisis llevado a cabo en Vosviewer versión 1.6.17 (Van Eck y Walt-

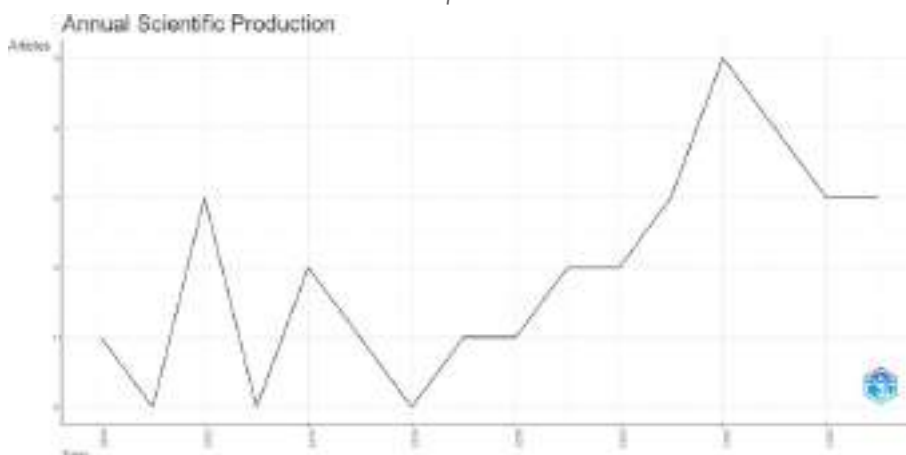
man, 2021) se obtuvo un mapa de concurrencia y uno de densidad de acuerdo con las principales palabras y su fuerza de correlación. Se eliminaron las palabras repetidas de forma plural o singular; además, con el uso de bibliometrix se obtuvo una representación gráfica que muestra la producción de trabajos sobre sustratos orgánicos en humedales artificiales a lo largo del tiempo. Para el segundo análisis se recuperó información sobre el tipo de sustrato utilizado y su eficiencia en la remoción de contaminantes en el agua tratada, con el fin de discutir los resultados encontrados resaltando aquellos que pueden generar mayor impacto. Se analizan los diferentes artículos obtenidos con el propósito de recopilar los avances en el estudio de esta área.

Resultados

De acuerdo con la metodología se seleccionaron 49 artículos producidos en el periodo 2010-2025. A partir de 2020 se observa un aumento significativo en la producción sobre este tema, como se muestra en la figura 1. Del total de artículos, más de 70% corresponde a los últimos seis años. Hasta ahora los años 2022, 2023 y 2024 han sido los años en que se ha producido mayor cantidad de artículos.

Figura 1.

Producción científica anual sobre el uso de sustratos en humedales artificiales encontrados en la base de datos de Scopus



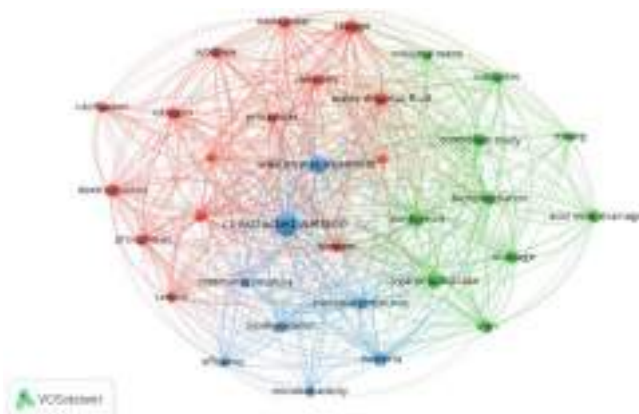
La figura 2 muestra que el clúster azul gira en torno al término “constructed wetland” y su conexión con palabras como “efficiency”, “biodegradation”, “bac-

teria”, “microbial community”. Este grupo refleja la importancia de los procesos microbiológicos en la operación de los humedales artificiales, destacando el papel central del sustrato como soporte físico y de interacción química para las comunidades microbianas. Dichas comunidades participan de manera activa en la degradación de materia orgánica y otros contaminantes, por lo que la elección del sustrato influye directamente en la eficiencia global del sistema.

- Clúster rojo: enfocado en la remoción de nutrientes, resalta el papel de los sustratos como catalizadores de procesos biogeoquímicos (nitrificación, desnitrificación), esenciales para eliminar nitrógeno y fósforo. En este contexto, los residuos orgánicos y textiles emergen como alternativas viables para sustituir o complementar medios tradicionales.
- Clúster azul: centrado en la ecología microbiana, evidencia la relación directa entre el tipo de sustrato y la actividad de comunidades microbianas responsables de la biodegradación y la eficiencia del sistema. Los materiales orgánicos y textiles ofrecen ventajas al favorecer la colonización y diversificación microbianas.
- Clúster verde: orientado a aplicaciones de biorremediación en escenarios industriales y de alta contaminación, donde los sustratos alternativos adquieren relevancia para la adsorción de metales y compuestos tóxicos. Este enfoque abre la posibilidad de reutilizar residuos como insumos estratégicos, aunque persiste la necesidad de evaluar su desempeño en condiciones extremas y a largo plazo.

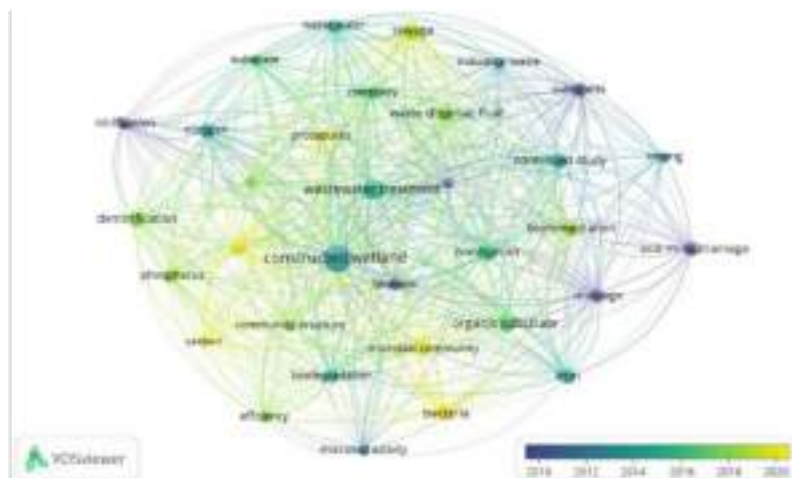
Figura 2.

Mapa de coocurrencia de las palabras clave



La figura 3 muestra la evolución temporal de los términos clave en la literatura científica sobre humedales artificiales y sustratos alternativos desde 2010 hasta la actualidad. Los términos más antiguos, representados en tonos azul oscuro, como “acid mine drainage”, “controlled study”, “nitrification”, entre otros, indican que a principios de la década pasada las investigaciones se centraban en la remediación de residuos industriales, procesos básicos de tratamiento y aplicaciones en contextos mineros. A partir de 2016 y con mayor intensidad hacia 2018-2020, se observa una transición hacia términos representados en colores verde a amarillo, como “constructed wetland”, “organic substrate”, “bacteria”, “microbial activity” y “efficiency”, lo cual indica una tendencia hacia el estudio de los sustratos que son los principales agentes en estos procesos de interacción biológica.

Figura 3.
Mapa de visualización temporal

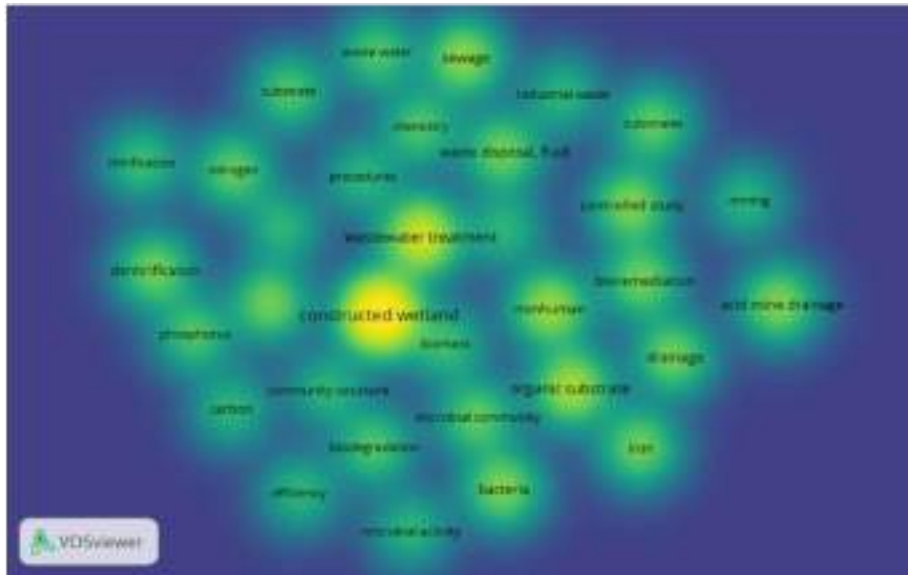


En la figura 4, el mapa revela zonas de interés creciente con densidad media-alta en términos como “bacteria”, “biodegradation”, “efficiency” y “phosphorus”, vinculados con la actividad microbiana y la eliminación de nutrientes. Por otro lado, aunque términos como “acid mine drainage” o “industrial waste” aparecen con menor densidad, su presencia sugiere nichos temáticos relevantes en contextos específicos de contaminación.

En conjunto, esta visualización que muestra las palabras clave “bacteria”, “biodegradation”, “efficiency”, “phosphorus” y “wastewater treatment” respaldan la pertinencia del presente trabajo, pues evidencian que el uso de sustratos orgánicos en humedales construidos representa un nodo activo de investigación.

Figura 4.

Mapa de densidad y temas de interés



En la figura 5 se muestran los países con mayor productividad científica en este rubro, destacando China, India, México, Estados Unidos, Australia, entre otros. Según Sharma et al. (2023) y Panghal et al. (2024) las razones que promueven estos estudios se centran en cuatro aspectos:

1. Disponibilidad de residuos agrícolas y biomasa.
2. Necesidad de soluciones económicas y sostenibles.
3. Políticas ambientales y financiamiento.
4. Colaboración internacional y redes de investigación.

Figura 5.

Países con mayor productividad científica

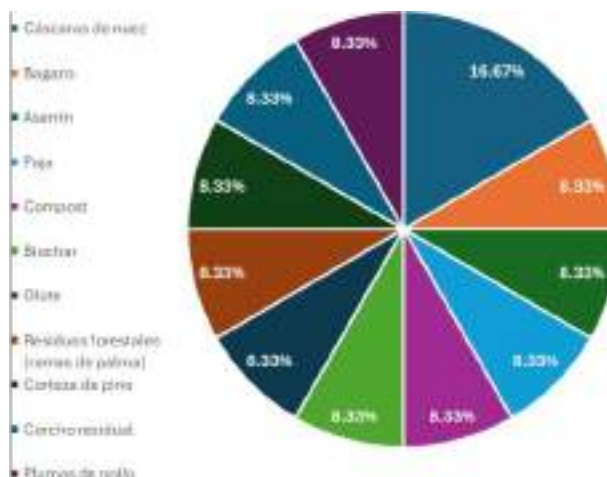


En la figura 6 podemos observar los principales sustratos orgánicos empleados en humedales artificiales. Entre los beneficios de su implementación destaca:

- Aporte de carbono: estimula la actividad de bacterias reductoras de sulfato y otros microorganismos clave para la remoción de metales y nutrientes (Chen et al., 2021; Gross et al., 2020).
- Mejora de la remoción de contaminantes: incrementa la eficiencia en la eliminación de materia orgánica, nitrógeno, fósforo y metales pesados (Sharma et al., 2024; Chen et al. 2021).
- Soporte para plantas y microorganismos: favorece el crecimiento vegetal y la formación de biopelículas funcionales (Sharma et al., 2024; Chen et al. 2021).

Figura 6.

Principales sustratos orgánicos empleados en humedales artificiales



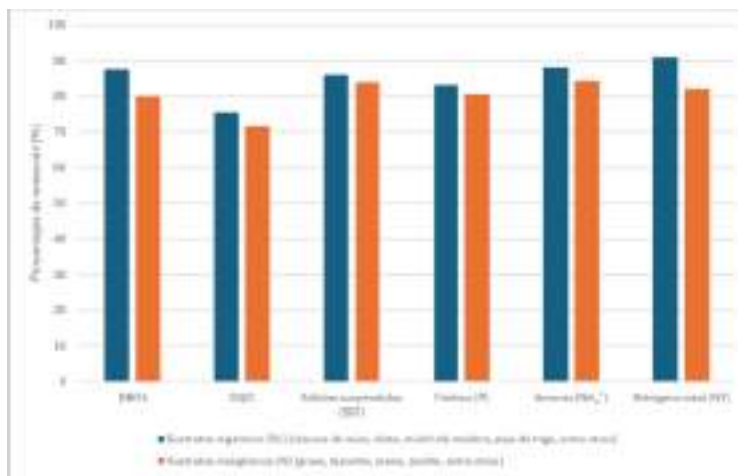
La figura 7 muestra que los sustratos orgánicos suelen ser más efectivos que los inorgánicos en humedales artificiales. Según Wang et al. (2022) y Ji et al. (2021), éstos aportan una fuente de carbono fácilmente disponible, lo que estimula la actividad microbiana y favorece procesos biológicos clave como la desnitrificación y la reducción de metales pesados. De acuerdo con Long et al. (2024), estos materiales, como cáscara de nuez, biochar o fibras vegetales, no sólo mejoran la retención y transformación de contaminantes, sino que también promueven el crecimiento de comunidades microbianas funcionales y plantas, aumentando la eficiencia global del sistema.

Los sustratos orgánicos pueden facilitar la formación de biopelículas y la adsorción de metales y nutrientes, mientras que los inorgánicos dependen más de procesos físicos y químicos como la filtración y la adsorción, que pueden saturarse rápidamente (Korboulewsky et al., 2012; Cun et al., 2024). Lopololo et al. (2025) y Singh y Chakraborty (2020) mencionan que la presencia de materia orgánica también favorece la diversidad y abundancia de bacterias especializadas en la degradación de contaminantes, lo que resulta en una mayor capacidad de remoción sostenida a largo plazo. Sin embargo, es importante considerar que los sustratos orgánicos pueden degradarse con el tiempo y requerir reposición, mientras que los inorgánicos suelen ser más estables, pero menos activos biológicamente. Los sustratos orgánicos alcanzaron eficiencias

de remoción sobresalientes, con valores promedio de 80-85% en DBO, 70-80% en DQO, 85-87% en sólidos suspendidos, 80-85% en fósforo, 85-88% en amonio y hasta 90-91% en nitrógeno total. Estos resultados confirman su capacidad para igualar o superar a los materiales inorgánicos tradicionales, como grava, arena o tezontle, evidenciando, además, su versatilidad para la eliminación integral de contaminantes. Así, demuestra que el aprovechamiento de residuos agroindustriales y forestales como sustratos permite transformar materiales subutilizados y contaminantes en recursos valiosos para la producción de bioproductos, enzimas, biocombustibles, bioplásticos y materiales de construcción. Ello reduce la presión sobre recursos vírgenes y minimiza la acumulación de residuos sólidos, alineándose con los principios de la economía circular (Yaashikaa et al., 2021; Bibi et al., 2023).

Figura 7

Porcentaje de remoción en sustratos orgánicos e inorgánicos



Por otro lado, la literatura revisada menciona que el uso de residuos textiles como sustratos en humedales artificiales es una propuesta innovadora, pero aún poco explorada en la literatura científica. Si bien estos sistemas han incorporado materiales alternativos como fibras naturales (por ejemplo, coco) y residuos lignocelulósicos para mejorar la retención de nutrientes y la actividad microbiana, la aplicación específica de textiles sintéticos o mezclados no ha sido ampliamente documentada (Wang et al., 2019; Ji et al., 2021). Por su alta superficie específica y estructura porosa, dichos materiales podrían favorecer la adsorción de contaminantes y el desarrollo de biopelículas, además de ofrecer una vía para valorizar desechos y reducir el impacto ambiental de

la industria textil (Yang et al., 2018). Sin embargo, Chen et al. (2021) señalan la existencia de desafíos potenciales, como la liberación de microplásticos o compuestos tóxicos, la estabilidad a largo plazo y la posible colmatación del sistema. De acuerdo con la literatura revisada, se destaca la necesidad de investigar a fondo la viabilidad, eficiencia y riesgos ambientales asociados al uso de residuos textiles como sustrato en humedales artificiales, especialmente en comparación con otros materiales reciclados y naturales que han sido estudiados más a fondo, como los residuos orgánicos y el material inorgánico (tezontle, grava, zeolita, entre otros).

Conclusiones

Se analizaron 49 estudios científicos publicados entre 2010 y 2025, en los cuales se identificaron materiales como bagazo, cáscaras de nuez, aserrín, paja, compost, biochar y olote. Éstos mostraron eficiencias de remoción comparables o incluso superiores a las de los materiales inorgánicos tradicionales.

Los sustratos orgánicos lograron eficiencias de remoción promedio de 80-85% en DBO, 70-80% en DQO, 82-95% en nitrógeno y 80-85% en fósforo, superando en algunos casos a materiales como grava, arena o tezontle.

Desde la perspectiva de la economía circular, el uso de residuos agroindustriales y forestales como sustratos representa una solución doble: mejora la eficiencia del tratamiento y reduce la disposición inadecuada de residuos sólidos. También disminuye los costos de implementación y mantenimiento de los humedales artificiales, facilitando su adopción en áreas rurales o con recursos limitados.

El uso de fibras textiles recicladas aún está en sus primeras etapas y se considera una línea de investigación emergente que necesita más estudios para evaluar su viabilidad técnica, su impacto ambiental a largo plazo, como la posible liberación de microplásticos y su efectividad en este contexto.

En conjunto, los resultados respaldan que los sustratos orgánicos no sólo son una alternativa viable para la remoción eficiente de contaminantes, sino que también constituyen una estrategia clave para avanzar hacia sistemas de tratamiento de agua más sostenibles, resilientes y alineados con los principios de la economía circular y el aprovechamiento integral de recursos.

Referencias

- Agaton, C. B. (2024). Análisis de opciones reales de humedales construidos como soluciones basadas en la naturaleza para el tratamiento de aguas residuales bajo múltiples incertidumbres: un estudio de caso en Filipinas [Real Options Analysis of Constructed Wetlands as Nature-Based Solutions to Wastewater Treatment Under Multiple Uncertainties: A Case Study in the Philippines]. *Sustainability*, 16(22), 9797. <https://doi.org/10.3390/su16229797>
- Andreo-Martínez, P., García-Martínez, N. y Almela, L. (2016). Depuración de aguas residuales domésticas usando un humedal construido de flujo subsuperficial horizontal y optimización teórica de superficie: un estudio de caso bajo clima mediterráneo seco [Domestic Wastewater Depuration Using a Horizontal Subsurface Flow Constructed Wetland and Theoretical Surface Optimization: A Case Study under Dry Mediterranean Climate]. *Water*, 8(10), 434. <https://doi.org/10.3390/w8100434>
- Chen, J., Deng, S., Jia, W., Li, X. y Chang, J. (2021). Remoción de múltiples metales pesados de agua impactada por minería con humedales construidos llenos de biochar: rutas de adsorción y remoción biótica [Removal of multiple heavy metals from mining-impacted water by biochar-filled constructed wetlands: Adsorption and biotic removal routes]. *Bioresource Technology*, 331, 125061. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.125061>
- Chen, Y., Li, T., Hu, H., Ao, H., Xiong, X., Shi, H. y Wu, C. (2021). Transporte y destino de microplásticos en humedales construidos: un estudio de microcosmos [Transport and fate of microplastics in constructed wetlands: A microcosm study]. *Journal of Hazardous Materials*, 415, 125615. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.125615>
- Chen, J., Li, X., Jia, W., Shen, S., Deng, S., Ji, B. y Chang, J. (2020). Promoción del desempeño de biorremediación en microcosmos de humedal construido para tratamiento de drenaje ácido de mina usando sustratos orgánicos y

- suplementando aguas residuales domésticas y caldo de litter de planta [Promotion of bioremediation performance in constructed wetland microcosms for acid mine drainage treatment by using organic substrates and supplementing domestic wastewater and plant litter broth]. *Journal of Hazardous Materials*, 404 Pt A, 124125. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.124125>
- Cui, L., Zhu, X., M., Ouyang, Y., Dong, M., Zhu, W. y Luo, S. (2008). Capacidades de sorción de fósforo y propiedades fisicoquímicas de nueve materiales de sustrato para humedal construido [Phosphorus Sorption Capacities and Physicochemical Properties of Nine Substrate Materials for Constructed Wetland]. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, 55, 210–217. <https://doi.org/10.1007/s00244-007-9109-y>
- Cun, D., Wang, H., Jiang, M., Lin, R., Deng, S., Chang, J., Zhao, Y. y Duan, C. (2024). Remediación efectiva de drenaje agrícola en tres intensidades de influente con humedales construidos bioaumentados llenos con mezcla de carbono de hierro y sustratos orgánicos sólidos: desempeño y mecanismos [Effective remediation of agricultural drainage at three influent strengths by bioaugmented constructed wetlands filled with mixture of iron carbon and organic solid substrates: Performance and mechanisms]. *The Science of the Total Environment*, 947, 174615. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.174615>
- De Souza, T. O., De Assis, L. D. S., Da Silva Marques, D., De Freitas Coelho, A. L., Cecon, P. R. y Borges, A. C. (2024). Humedales construidos de flujo tidal de alta carga acoplados con celdas de combustible microbianas: efectos de la vegetación y tamaño del material de llenado [High-loaded tidal flow constructed wetlands coupled with microbial fuel cells: effects of the vegetation and filling material size]. *Environmental Science and Pollution Research*. <https://doi.org/10.1007/s11356-024-35622-7>
- Escobar, L. a. G. (2025). Descripción de un nuevo humedal cauce aislado de río en Colombia [Description of a new isolated river channel wetland in Colombia]. *Revista Chapingo Serie Agricultura Tropical*, 5. <https://doi.org/10.5154/r.rchsat.2024.05.08>
- Fontalvo-Buelvas, J. C. (Coord.). (2023). Huertos en instituciones de educación superior: Relatos y experiencias desde México [Orchards in higher education institutions: Stories and experiences from Mexico]. *Comunicación Científica*. <https://doi.org/10.52501/cc.191>

- Gross, M., Formica, S., Gandy, L. y Hestir, J. (2020). Una comparación de materiales locales de residuos para sustrato de humedales reductores de sulfato [A Comparison of Local Waste Materials for Sulfate-Reducing Wetlands Substrate]. pp. 179–185. <https://doi.org/10.1201/9781003069997-21>
- Herrera-Melián, J. A., Torres-Padrón, M. E., Betancor-Abreu, A., Sosa-Ferrera, Z., Santana-Rodríguez, J. J., Martín-González, M. A., Araña, J. y Guedes-Alonso, R. (2014). Reducción de bloqueo y remoción de residuos hormonales con filtro orgánico de flujo vertical a escala de laboratorio y humedal híbrido [Clogging reduction and removal of hormone residues with laboratory-scale vertical flow organic-based filter and hybrid wetland]. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 12(3), 1039–1052. <https://doi.org/10.1007/s13762-013-0495-6>
- Hu, S., He, R., Zeng, J., Zhao, D., Wang, S., He, F., Yu, Z. y Wu, Q. L. (2022). Menor variación composicional y mayor complejidad de la comunidad bacteriana de la rizosfera en humedal construido comparado con humedal natural [Lower Compositional Variation and Higher Network Complexity of Rhizosphere Bacterial Community in Constructed Wetland Compared to Natural Wetland]. *Microbial Ecology*, 85(3), 965–979. <https://doi.org/10.1007/s00248-022-02040-6>
- Irshad, S., Xie, Z., Qing, M., Ali, H., Ali, I., Ahmad, N., Khan, M. y Nawaz, A. (2024). Aplicación de filtro de carbono activado de concha de coco en humedal construido de flujo subsuperficial vertical para biorremediación multi-metal potenciada y respuesta antioxidante de *Salvinia cucullata* [Application of coconut shell activated carbon filter in vertical subsurface flow constructed wetland for enhanced multi-metal bioremediation and antioxidant response of *Salvinia cucullata*]. *Environmental Pollution*, 123597. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2024.123597>
- Ji, Z., Tang, W. y Pei, Y. (2021). Sustratos de humedal construido: una revisión sobre desarrollo, mecanismos de función y aplicación en remoción de contaminantes [Constructed wetland substrates: A review on development, function mechanisms, and application in contaminants removal]. *Chemosphere*, 286 Pt 1, 131564. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.131564>
- Junca-Gómez, D. A., Hernández-Alarcón, M. E. y Marín-Muñoz, J. L. (2024). Charlas educativas no formales en parques de Xalapa, Veracruz: Una visión hacia

el conocimiento y conservación de humedales naturales urbanos [Non-formal educational talks in parks of Xalapa, Veracruz: A view towards knowledge and conservation of urban natural wetlands]. *Revista Eduscientia. Divulgación de la Ciencia Educativa*, 1(especial), 61–72. <http://www.eduscientia.com/index.php/journal/article/view/425>

Khalifa, M., El-Reash, Y., Ahmed, M. y Rizk, F. (2020). Efecto de la variación de medio en la eficiencia de remoción de contaminantes de aguas residuales domésticas en sistemas de humedal construido [Effect of media variation on the removal efficiency of pollutants from domestic wastewater in constructed wetland systems]. *Ecological Engineering*, 143, 105668.

Kivaisi, A. R. y Zhao, Q. (2024). Mejora de mini-batch multiple augmentation para reconocimiento de palabras habladas con recursos limitados [Improved mini-batch multiple augmentation for low-resource spoken word recognition]. *Expert Systems with Applications*, 252, 124157. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2024.124157>

Kong, F., Wang, J., Hou, W., Cui, Y., Yu, L., Zhang, Y. y Wang, S. (2022). Influencia de biochar modificado apoyado en sulfidación de nano-iron cero valente (S-nZVI/BC) en remoción de nitrato y emisión de gases de efecto invernadero en humedal construido [Influence of modified biochar supported sulfidation of nano-zero-valent-iron (S-nZVI/BC) on nitrate removal and greenhouse gas emission in constructed wetland]. *Journal of Environmental Sciences*, 125, 568–581. <https://doi.org/10.1016/j.jes.2022.02.040>

Korboilewsky, N., Wang, R. y Baldy, V. (2012). Procesos de purificación involucrados en tratamiento de lodos por sistema de humedal de flujo vertical: Enfoque en el rol del sustrato y plantas en remoción de N y P [Purification processes involved in sludge treatment by a vertical flow wetland system: Focus on the role of the substrate and plants on N and P removal]. *Biore-source Technology*, 105, 9–14. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2011.11.037>

Latip, S. N. H. M., Damanhuri, S. N. A., Ibrahim, N. D., Chin, K. B. y Nasruddin, M. F. (2022). Utilización de humedales construidos de agua hyacinth para tratamiento de aguas residuales en piscinas de oxidación [Utilising Constructed Wetlands From Water Hyacinth for Wastewater Treatment in Oxidation Ponds]. *International Journal of Integrated Engineering*, 14(5). <https://doi.org/10.30880/ijie.2022.14.05.016>

- Lin, Z., Li, M., Yan, P., Zhang, J., Xie, H. y Wu, H. (2025). Humedales construidos para tratamiento y reuso de aguas residuales: Dos décadas de experiencia de China [Constructed Wetlands for Wastewater Treatment and Reuse: Two Decades of Experience from China]. *Environmental Research*, 121781. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2025.121781>
- Long, Y., Yu, G., Wang, J. y Zheng, D. (2024). Remoción de cadmio por humedales construidos con diferentes sustratos: desempeño, microorganismos y mecanismos [Cadmium removal by constructed wetlands containing different substrates: performance, microorganisms and mechanisms]. *Bioresource Technology*, 131561. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2024.131561>
- López-Rosas, H., Moreno-Casasola, P. y Peralta-Peláez, L. A. (2024). Herramientas para lograr cambios positivos en la actitud hacia el agua y los humedales [Tools to achieve positive changes in attitude towards water and wetlands]. *Revista Eduscientia. Divulgación de la Ciencia Educativa*, 1(especial), 127–137. <http://www.eduscientia.com/index.php/journal/article/view/429>
- Lopopolo, L., Herrera-Melián, J. A., Arocha-Espiau, D., Naghoum, I., Ranieri, E., Guedes-Alonso, R. y Sosa-Ferrera, Z. (2025). Mejora de un humedal construido de flujo superficial horizontal con residuos forestales y aireación [Upgrading a horizontal surface flow constructed wetland with forest waste and aeration]. *Journal of Environmental Management*, 376, 124468. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2025.124468>
- Nata, I., Irawan, C., Putra, M., Hudha, M., Syarkani, M. y Naufal, A. (2024). Adsorción simultánea de iones Cr(III) y contaminantes en biocompuesto magnético de amina basado en fibra de bagazo de caña de azúcar/cascarilla de arroz [Simultaneous adsorption of Cr(III) ions and contaminants on Sugarcane bagasse/rice husk fiber-based amine magnetic biocomposite]. *Journal of Hazardous Materials Advances*. <https://doi.org/10.1016/j.hazadv.2024.100412>
- Nuamah, L., Li, Y., Pu, Y., Nwankwegu, A., Zhang, H., Norgbey, E., Banahene, P. y Bofah-Buoh, R. (2020). Humedales construidos: estado, progreso y desafíos. La necesidad de reevaluación operativa crítica para un ecosistema productivo más limpio [Constructed wetlands, status, progress, and challenges. The need for critical operational reassessment for a cleaner productive ecosystem]. *Journal of Cleaner Production*, 269, 122340. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122340>

- Panghal, V., Singh, A., Hooda, V., Arora, D., Bhateria, R. y Kumar, S. (2024). Progreso reciente, desafíos y perspectivas futuras en humedales construidos que emplean biochar como sustrato: una revisión comprehensiva [Recent progress, challenges, and future prospects in constructed wetlands employing biochar as a substrate: a comprehensive review]. *Environmental Science and Pollution Research International*. <https://doi.org/10.1007/s11356-024-35846-7>
- Paredes, D. (2007). En Memorias de la conferencia internacional de Humedales [In Proceedings of the International Wetlands Conference]. Universidad Tecnológica de Pereira, Facultad de Ciencias Ambientales, Pereira, Risaralda, Colombia.
- Patyal, V., Jaspal, D. y Khare, K. (2024). Evaluación de matriz compuesta en humedal construido para remoción de fósforo [Evaluation of composite matrix in constructed wetland for phosphorus removal]. *Bioresource Technology Reports*. <https://doi.org/10.1016/j.biteb.2024.101870>
- Pinho, H. J. y Mateus, D. M. (2021b). Valorización de residuos sólidos en humedales construidos de flujo subsuperficial basados en estructuras modulares renovables: una contribución a la economía circular [Valorization of solid waste in subsurface flow constructed wetlands based on renewable modular structures: A contribution to a circular economy]. En *Circular economy and sustainability* (pp. 215–233). <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-821664-4.00019-4>
- Reed, C., Crites, R. W. y Middlebrooks, E. J. (1995). *Sistemas naturales para tratamiento y gestión de residuos* [Natural systems for waste management and treatment]. McGraw Hill Co.
- Saeed, T. y Sun, G. (2013). Un estudio a escala de laboratorio de humedales construidos con bagazo de caña de azúcar y medios de arena para tratamiento de aguas residuales textiles [A lab-scale study of constructed wetlands with sugarcane bagasse and sand media for the treatment of textile wastewater]. *Bioresource Technology*, 128, 438–447. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2012.10.052>
- Saeed, T., Miah, M. y Yadav, A. (2022). Desarrollo de humedales construidos híbridos integrados con electrodos usando materiales orgánicos, de cons-

- trucción y rechazados como medios de filtro: tratamiento de lixiviado de vertedero [Development of electrodes integrated hybrid constructed wetlands using organic, construction, and rejected materials as filter media: Landfill leachate treatment]. *Chemosphere*, 135273. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.135273>
- Santos, J., Rodrigues, S., Magalhães, M., Rodrigues, K., Pereira, L. y Marinho, G. (2024). Una revisión de vanguardia (2019–2023) sobre humedales construidos para tratamiento y reuso de agua gris [A state-of-the-art review (2019–2023) on constructed wetlands for greywater treatment and reuse]. *Environmental Challenges*, 16, 100973. <https://doi.org/10.1016/j.envc.2024.100973>
- Sharma, M., Sharma, N. y Kanwar, R. (2023). Evaluación de sustratos derivados de agri-residuos para cultivar plantas ornamentales para humedal construido [Assessment of agriwaste derived substrates to grow ornamental plants for constructed wetland]. *Environmental Science and Pollution Research*, 30, 84645–84662. <https://doi.org/10.1007/s11356-023-28364-5>
- Sharma, M., Sharma, N. y Kanwar, R. (2024). Análisis de desempeño de meso-cosmo-humedal construido con sustratos derivados de residuos agrícolas para tratamiento de aguas residuales [Performance analysis of meso-cosm-constructed wetland containing agricultural waste-derived substrates for treatment of wastewater]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 196(12), 1220. <https://doi.org/10.1007/s10661-024-13411-6>
- Singh, S. y Chakraborty, S. (2020). Perfeccionamiento de humedal construido con sustrato orgánico tratando drenaje ácido de mina (AMD) del Nordeste de India [Performance of organic substrate amended constructed wetland treating acid mine drainage (AMD) of North-Eastern India]. *Journal of Hazardous Materials*, 397, 122719. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.122719>
- Sun, Q., Wang, X. y Wang, L. (2019). Impacto ecológico del control de contaminación de aguas de watershed en escenarios turísticos costeros [Ecological impact of watershed water pollution control on coastal tourist scenic spots]. *The International Journal of Low Carbon Technologies*, 15(1), 84–88. <https://doi.org/10.1093/ijlct/ctz060>
- Vymazal, J. (2014). Humedales construidos para tratamiento de aguas residuales industriales: una revisión [Constructed wetlands for treatment of indus-

trial wastewaters: a review]. *Ecological Engineering*, 73, 724–751. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2014.09.034>

Wang, Y., Cai, Z., Sheng, S., Pan, F., Chen, F. y Fu, J. (2019). Evaluación comprehensiva de materiales de sustrato para remoción de contaminantes en humedales construidos [Comprehensive evaluation of substrate materials for contaminants removal in constructed wetlands]. *The Science of the Total Environment*, 701, 134736. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.134736>

Wang, T., Liu, R., O'Meara, K., Mullan, E. y Zhao, Y. (2018). Evaluación de un humedal construido de flujo tidal en campo para tratamiento de aguas residuales de ganado porcino: enfoque de ciclo de vida [Assessment of a Field Tidal Flow Constructed Wetland in Treatment of Swine Wastewater: Life Cycle Approach]. *Water*, 10(5), 573. <https://doi.org/10.3390/w10050573>

Wang, Y., Zhou, P., Song, X. y Xu, Z. (2022). Nitrificación y desnitrificación simultánea en humedal construido apoyado en PCL con aireación limitada [Simultaneous nitrification and denitrification in a pcl-supported constructed wetland with limited aeration]. *Environmental Science and Pollution Research*, 30, 22606–22616. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-23748-5>

Wdowczyk, A., Szymańska-Pulikowska, A. y Gałka, B. (2022). Remoción de contaminantes seleccionados de lixiviado de vertedero en humedales construidos con diferentes llenados [Removal of selected pollutants from landfill leachate in constructed wetlands with different filling]. *Bioresource Technology*, 353, 127136. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2022.127136>

Yakar, A., Türe, C., Türker, O. C., Vymazal, J. y Saz, Ç. (2018). Impactos de diversos medios de filtración en tratamiento de aguas residuales y producción de bioelectricidad en humedal construido de flujo ascendente combinado con celda de combustible microbiana (UCW-MFC) [Impacts of various filtration media on wastewater treatment and bioelectric production in up-flow constructed wetland combined with microbial fuel cell (UCW-MFC)]. *Ecological Engineering*, 117, 120–132. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2018.03.016>

Yang, Y., Zhao, Y., Liu, R. y Morgan, D. (2018). Desarrollo global de diversos sustratos emergentes utilizados en humedales construidos [Global development of various emerged substrates utilized in constructed wetlands]. *Bioresource Technology*, 261, 441–452. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2018.03.085>

- Yang, C., Zhang, X., Tang, Y., Jiang, Y., Xie, S., Zhang, Y. y Qin, Y. (2022). Selección y optimización del sustrato en humedal construido: una revisión [Selection and optimization of the substrate in constructed wetland: A review]. *Journal of Water Process Engineering*, 49, 103140. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2022.103140>
- Yaashikaa, P., Kumar, S. y Varjani, S. (2021). Valorización de residuos agroindustriales para proceso de biorrefinería y bioeconomía circular: una revisión crítica [Valorization of agro-industrial wastes for biorefinery process and circular bioeconomy: A critical review]. *Bioresource Technology*, 126126. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.126126>

Derechos de Autor© 2026 Domínguez-Solís, Diego; Martínez-Rodríguez, María Concepción; Ramírez-Escamilla, Héctor Guadalupe.



Este texto está protegido por una licencia Creative Commons 4.0, Attribution 4.0 International. Usted es libre para Compartir, copiar y redistribuir el material en cualquier medio o formato y adaptar el documento, remezclar, transformar y crear a partir del material— para cualquier propósito, incluso para fines comerciales, siempre que cumpla la condición de: Atribución: Usted debe dar crédito a la obra original de manera adecuada, proporcionar un enlace a la licencia, e indicar si se han realizado cambios. Puede hacerlo en cualquier forma razonable, pero no de forma tal que sugiera que tiene el apoyo del licenciante o lo recibe por el uso que hace de la obra.

INNOVACIÓN TECNOLÓGICA PARA EL APROVECHAMIENTO SUSTENTABLE DE RESIDUOS SÓLIDOS ORGÁNICOS EN EL VALLE DE TEOTIHUACÁN

Technological innovation for the sustainable use of organic solid waste in the teotihuacan valley

Hortencia Guarneros Manóatl^{1*}, Aníbal Quispe Limaylla², Enriqueta Tello García³

*Autor de correspondencia

DOI: [10.56643/rcia.v5i1.251](https://doi.org/10.56643/rcia.v5i1.251)

Como citar este artículo: Guarneros Manóatl, H., Quispe Limaylla, A. y Tello García, E. (2026). Innovación tecnológica para el aprovechamiento sustentable de residuos sólidos orgánicos en el Valle de Teotihuacán. Revista Científica de Ingenierías y Arquitectura. 5(1). 190-205. <https://doi.org/10.56643/rcia.v5i1.251>

Resumen

El manejo de residuos sólidos orgánicos mediante procesos de compostaje constituye una alternativa para generar abonos de alta calidad, a la vez que permite la recuperación de suelos y la optimización de recursos económicos en el caso de los agricultores(as). El objetivo de este estudio es presentar el prototipo de un sistema de compostaje a gran escala implementado en el Valle de Teotihuacán. La metodología utilizada emplea la Investigación Acción Participativa (IAP) e incluyó grupos focales y talleres participativos a los que asistieron miembros de la cooperativa Ecotlalokan (n=25). El estudio se realizó en tres fases, a saber: diagnóstico, vinculación comunitaria y monitoreo. La información recabada permitió diseñar los componentes operativos y realizar análisis fisicoquímicos de los productos de compostaje siguiendo las normas NOM-NMX-FF-109-SC-FI-2008 y NOM-021-Semarnat 2000. Los resultados obtenidos muestran que dicha infraestructura puede facilitar el tratamiento de aproximadamente nueve toneladas de residuos orgánicos en cuatro meses. Además, la calidad nutricional de la composta y el lixiviado se adecua a las normas descritas. Se concluye que el componente participativo puede favorecer alternativas para optimizar la agricultura, la recuperación de suelos y fomentar el establecimiento de centros de recolección y gestión de residuos sólidos orgánicos en el Valle de Teotihuacán.

¹ Maestra en Ciencias de la Sostenibilidad. Investigadora Asociada, Posgrado en Estudios del Desarrollo Rural, Colegio de postgraduados, Campus Montecillo. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7395-3916>. Correo electrónico: guarneros.hortencia@colpos.mx

² Doctor en Educación y Extensión Agrícola. Profesor-investigador titular, Posgrado en Estudios del Desarrollo Rural, Colegio de postgraduados, Campus Montecillo. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0175-8318>. Correo electrónico: anibalq@colpos.mx

³ Doctora en Ciencias en Recursos Naturales y Gestión Sostenible. Profesora-investigadora titular, Posgrado en Estudios del Desarrollo Rural, Colegio de postgraduados, Campus Montecillo. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0048-3551>. Correo electrónico: tello.enriqueta@colpos.mx.

Recibido: 27/01/2026 | Aceptado: 03/03/2026 | Publicado: 15/06/2026

Los autores declaran no tener ningún conflicto de interés. La investigación fue financiada con recursos de los autores.

Palabras clave: Agricultura, fertilidad de suelos, ecotecnias, composta, lixiviado.

Abstract

The management of organic solid waste through composting processes is an alternative for generating high-quality fertilizers, while allowing for soil recovery and optimizing economic resources for farmers. The objective of this study is to present the prototype of a large-scale composting system implemented in the Teotihuacán Valley. The methodology focuses on Participatory Action Research (PAR) through focus groups and participatory workshops with members of the Ecotlalokan cooperative (n=25). The study was conducted in three phases: diagnosis, community engagement, and monitoring. The information gathered allowed for the design of operational components and physicochemical analysis of compost products using NOM-NMX-FF-109-SCFI-2008 and NOM-021-Semarnat 2000 standards. The results show that the infrastructure can facilitate the treatment of approximately 9 tons of organic waste in 4 months. In addition, the nutritional quality of the compost and leachate meets the standards described above. It is concluded that the participatory component can favor alternatives to optimize agriculture, soil recovery and promote collection and management centers for organic solid waste in the Teotihuacan Valley.

Keywords: Agriculture, soil fertility, ecotechnologies, compost, leachate.

Introducción

En México, el reciclaje de residuos orgánicos mediante compostaje se presenta como una estrategia ambiental fundamental para promover la sostenibilidad agrícola. La aplicación de composta mejora significativamente las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo, lo que se traduce en mayor capacidad de retención de humedad, así como en fertilidad y reducción de la erosión, además de representar un ahorro para los agricultores (Vega-Armenta et al., 2025). El aprovechamiento de este tipo de residuos hace posible que más de 50% de los desechos puedan ser utilizados, lo que reduce las problemáticas ambientales y de salud que éstos implican, como son la producción de lixiviados que se infiltran en acuíferos y las enfermedades causadas por la descomposición de residuos en los vertederos. Este proceso se expresa en acciones asociadas a los objetivos del desarrollo sostenible, entre ellos, la acción por el clima, la producción y el consumo responsable (López-Hernández et al., 2025). Además, ofrece opciones que fortalecen tanto los procesos organizativos inherentes a

la gestión de residuos como la agricultura de subsistencia en comunidades del Valle de Teotihuacán.

La producción de compostas a partir de RSO subraya el potencial innovador de la transformación de desechos, los cuales pueden ser utilizados en insumos agrícolas de alto valor. Desde una perspectiva de gestión de residuos y cambio climático, el compostaje constituye una alternativa eficiente y viable para disminuir los impactos ambientales derivados del manejo convencional de basura (Castro et al., 2022). En el Estado de México se producen 16, 639 toneladas diarias de residuos sólidos urbanos, pero sólo 286 toneladas/ día son separadas conforme las categorías FIRSU (Fracción Inorgánica del Residuo Sólido Urbano) y FORSU (Fracción Orgánica del Residuo Sólido Urbano). Además, sólo 0.7% recibe algún tratamiento, 1.3% es acopiado y el resto se desaprovecha en los rellenos sanitarios. El Plan municipal del Valle de Teotihuacán menciona que se producen 42 toneladas/ día de residuos sólidos, es decir, se estima que entre 12.6 y 21 toneladas diarias de residuos orgánicos podrían ser utilizadas para la elaboración de compostas (Secretaría de Desarrollo Urbano y Obra del Estado de México, 2023). Las cifras mencionadas dan cuenta de las oportunidades que esto representa en términos de abonos orgánicos producidos diariamente. En este sentido, resaltamos la necesidad de implementar prácticas innovadoras para su tratamiento, como también de desarrollar prototipos de infraestructura que permitan optimizar su descomposición y lograr rentabilidad económica a gran escala. De esta forma se pueden controlar variables críticas como temperatura, oxígeno, humedad y emisiones, lo que disminuye los riesgos sanitarios y ambientales (Lim et al., 2017). Las propuestas de compostaje más conocidas incluyen el diseño de los sistemas tipo windrow (compostaje en hileras) y tipo in-vessel composting (pilas estáticas aireadas o instalaciones cerradas) (Gómez, 2024). Ambos sistemas describen la parte operativa y técnica en función de las condiciones del contexto, ya que los primeros son aptos para espacios abiertos y los segundos para espacios con poca ventilación. Sin embargo, en estos diseños no se mencionan los componentes organizativos necesarios para llevar a cabo el proceso, lo que ha restringido la gestión al sector privado. Aunado a esto, es importante visualizar que la creciente acumulación de residuos y la degradación ambiental ponen en evidencia las limitaciones derivadas del modelo económico capitalista. La economía circular muestra que, además del tratamiento de los residuos, es importante generar estrategias para mantener los materiales en uso durante el mayor tiempo posible, así como extraer su máximo valor antes de recuperarlos y regenerarlos al final de su vida útil (Enríquez-Montero, 2025).

La economía circular se sustenta en tres pilares fundamentales: el diseño sin residuos, la prolongación del uso de materiales y la regeneración de sistemas naturales (Ellen MacArthur Foundation, 2019). Este modelo promueve prácticas sostenibles como la reutilización de residuos orgánicos mediante el compostaje, lo que fomenta la autosuficiencia de los suelos y disminuye su dependencia de insumos químicos (Kirchherr et al., 2018). El compostaje comunitario e industrial reduce el impacto ambiental, además de generar beneficios sociales y educativos. Asimismo, contribuye a disminuir la huella de carbono de las ciudades, pues aminora el transporte de residuos y la dependencia de fertilizantes sintéticos (Al-Rumaihi et al., 2020).

La implementación del compostaje en un contexto de economía circular requiere el respaldo de políticas públicas. En países de América Latina como México, Colombia y Costa Rica ya se han desarrollado normativas que promueven la valorización de los residuos orgánicos mediante el compostaje y otras formas de reciclaje biológico (Domenech y Borrion 2022). En el marco de los objetivos de desarrollo sostenible y la economía circular este proceso reduce significativamente las emisiones de metano, un gas de efecto invernadero con alto potencial de calentamiento global, al tiempo que limita la producción de RSO (Fontalvo Buelvas et al., 2025). El objetivo de la presente investigación es presentar el prototipo de un sistema de compostaje a gran escala implementado en el Valle de Teotihuacán, al tiempo que se destacan los componentes operativos y organizacionales necesarios para su funcionamiento.

Materiales y métodos

Sitio de estudio

El sitio de estudio se localiza en el Valle de Teotihuacán, región ubicada en el Estado de México, en el municipio de Teotihuacán y en parte del municipio San Martín de las Pirámides. Está delimitado por cadenas montañosas, como la sierra de Patlachique al sur y la sierra de Tepozán al norte. El proyecto se desarrolló en el municipio de San Martín de las Pirámides, en las instalaciones del Parque Ecoturístico Tonancatepetl (Paraíso de Tlálóc), en la localidad de Santa María Palapa (coordenadas: longitud 98°50'59.457 W, latitud 19°44'09.806 N, altitud 2,410 ms.n.m.). El sitio cuenta con una población de 2, 457 habitantes y su principal actividad económica es el turismo; sin embargo, la agricultura sigue siendo una actividad relevante en el valle, especialmente en las zonas menos urbanizadas (Navarro-Moya y Leyte Calixto, 2020).

Enfoque metodológico

La investigación se realizó empleando un enfoque mixto, de acuerdo con el marco de la investigación acción participativa (IAP) e incluyó tres etapas: 1) diagnóstico, 2) vinculación comunitaria y 3) monitoreo. En la primera fase se realizó la recopilación de datos para el diseño del prototipo del sistema de compostaje. En la segunda etapa se abordaron los componentes participativos y organizativos que regularon el proceso. En esta fase se llevaron a cabo tres talleres participativos y grupos focales a los que asistió un total de 25 personas por sesión. Entre los actores clave figuran los miembros de la cooperativa Eckotlalocan y pobladores de Santa María Palapa. El rango de edad de los participantes fue de 25 a 55 años, con una distribución por sexo de 60% de mujeres y 40% de hombres. Los talleres y la instalación de la infraestructura se realizaron en el Parque Ecoturístico Tonancatepetl, ubicado en la localidad descrita. Las temáticas de las actividades se centraron en: principios básicos de compostaje, características del diseño de la infraestructura para el tratamiento de RSO y cualidades y usos de la composta. En la tercera etapa se realizó el monitoreo de los productos resultantes del compostaje (composta y lixiviado) considerando parámetros fisicoquímicos, los cuales fueron evaluados conforme las normas NOM-NMX-FF-109-SCFI-2008 y NOM-021-Semarnat 2000. En este caso, el enfoque mixto permitió englobar un proceso participativo de la comunidad y la valoración del método de compostaje y los productos finales (Vizcaíno Zúñiga et al., 2023).

Resultados y discusión

Diagnóstico: la información fue recopilada en grupos focales en los que participaron integrantes de la cooperativa Ecotlalocan, así como pobladores(as) de Santa María Palapa. Las principales problemáticas detectadas en la producción agrícola de la zona fueron: características del suelo debido a la textura (franca arenosa), escasa materia orgánica y compactación. Las condiciones mencionadas limitan las potencialidades agronómicas para la producción de cultivos. A su vez, se detectó que existe desconocimiento respecto a la producción de compostas a partir de residuos orgánicos, aunque en el sitio existan grandes volúmenes de desperdicios de cultivos de nopal, tanto en las parcelas como en el mercado municipal de San Martín de las Pirámides. Aunado a ello, la región carece de una gestión que permita la clasificación de basura orgánica e inorgánica y tampoco se cuenta con conocimientos técnicos que contribuyan a mejorar los suelos. Si bien en los campos agrícolas se aplican abonos de animales y

residuos vegetales, éstos no son sometidos a tratamientos previos que mejoren la biodisponibilidad de nutrientes. Delgado-Arroyo et al. (2019) mencionan que la gestión integral de residuos sólidos urbanos no sólo reduciría la carga sobre los rellenos sanitarios y la dependencia de energías fósiles, sino que también podría ahorrar costos municipales y fomentaría una mayor conciencia ciudadana en el sentido de realizar prácticas más sostenibles. Cabe resaltar que un modelo de compostaje comunitario puede ser una estrategia adecuada para mitigar el cambio climático, enriquecer los suelos de la región y transitar hacia una economía con menores impactos ambientales (EPA, 2021). En la tabla 1 se describen los componentes organizacionales que deben fortalecerse dentro de esta iniciativa.

Tabla 1.

Componentes organizacionales desarrollados en el centro de tratamiento de RSO

Componente	Importancia
Conocimiento técnico	Fue necesaria la formación en capacidades relativas a los principios básicos de compostaje y las fases que implica, como también en la clasificación de los residuos y los usos potenciales de la composta a nivel de agricultura familiar.
Vinculación comunitaria	Participación de actores clave, como la cooperativa Ecotlalokan, pobladores de la comunidad de Santa María Palapa, Asociación Civil Caritas Teotihuacán, autoridades municipales e investigadores del Colegio de Postgraduados. En esta etapa se distinguieron metas comunes, aunque la naturaleza operativa de las organizaciones sea distinta.
Canales de difusión de información	Canales de información acordes al contexto, que faciliten la comunicación y la promoción de actividades realizadas dentro de la comunidad.

Estrategias de sostén económico	Se plantearon estrategias para que los aportes económicos necesarios fueran compartidos por las instituciones involucradas. Esto permite optimizar las actividades de sostén económico a largo plazo con el apoyo de distintos fondos gubernamentales, no gubernamentales y provenientes de la población civil participante. Dichas estrategias incorporan bienes materiales, no materiales y recursos humanos.
Agenda de actividades	Planificación de actividades acordes a las agendas e intereses de los participantes, además de acompañamiento técnico, monitoreo de las actividades y establecimiento de rutas de acopio.

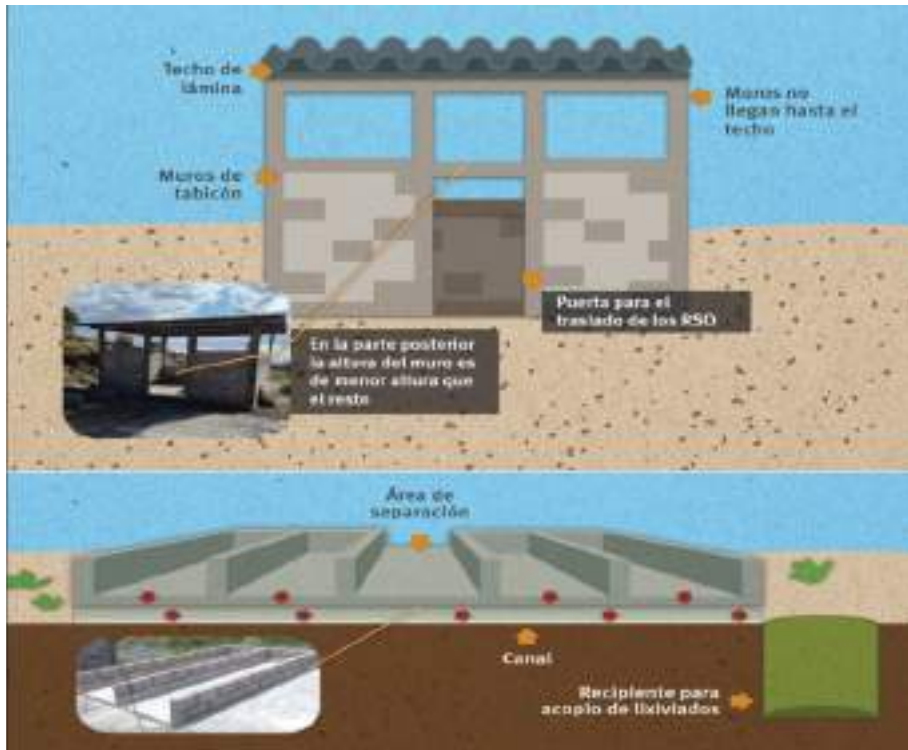
Vinculación comunitaria. En esta fase se plantearon el diseño y la planificación de las áreas del sistema de compostaje: a) área de acopio y precompostaje de los RSO, b) composteras horizontales, c) canales de acopio de lixiviado, d) depósito de lixiviados y e) área de separación de lombrices y harneado (tabla 2 y figura 1). El diseño final de la estructura de compostaje fue de ocho camas, cada una con capacidad para una tonelada de RSO. Los residuos provenían de campos agrícolas cercanos, cultivos de nopal, residuos vegetales de habitantes que residen cerca de las instalaciones del parque ecoturístico, así como residuos provenientes del mercado municipal de San Martín de las Pirámides. Domenech y Borrión (2022) establecen que el conjunto de políticas asociadas al aprovechamiento de residuos y procesos de reciclaje es apto no sólo para fomentar la conciencia sobre los impactos de estos residuos en el medio ambiente, sino también para diseñar estrategias a nivel de política pública que mejoren los alcances en términos de gestión. Este punto es importante, pues, como vemos en este ejemplo, los niveles de residuos generados a nivel municipal deben responder a iniciativas que ligen a los actores locales con planes gubernamentales que faciliten las rutas de acopio, almacenamiento, tratamiento y venta. Aunque la operatividad del prototipo presentado es idónea en el ámbito técnico, es relevante señalar que aún falta estructurar un esquema de gestión comunitario que optimice su alcance.

Tabla 2.*Infraestructura de un centro comunitario de compostaje*

Tipo de área	Características y función
Área de acopio y precompostaje de RSO	Es el lugar donde se reciben los RSO para ser compostados. Se trata de un área cerrada, construida con muros de tabicones, piso de cemento y techo de lámina. En la parte posterior, la altura del muro es menor que en el resto del área, para facilitar el vaciado de los residuos. En la parte frontal hay una puerta que permite el traslado de los RSO hacia las composteras. En esta zona los residuos son colocados en tambos de plástico, lo que hace posible una primera descomposición de los residuos, que posteriormente serán colocados en las composteras.
Composteras horizontales	Los contenedores horizontales pueden ser construidos con cemento. Las medidas de los muros no deben superar los 40 centímetros de altura; el ancho puede ser de un metro. La longitud sugerida en este caso es de cuatro metros. Para facilitar los trabajos de compostaje, se sugiere construir dos composteras seguidas, dejando un espacio de 1.20 metros para continuar con otras dos y así sucesivamente hasta llegar al número de composteras deseado.
Canales de acopio y lixiviado	El piso de las composteras deberá tener una ligera inclinación, como también canaletas que permitan que el drenaje del lixiviado sea dirigido hacia un área de acopio, la cual debe encontrarse en un extremo de las hileras.
Depósito de lixiviados	El área de acopio de lixiviados debe ser un depósito subterráneo construido con cemento para evitar filtraciones. Las dimensiones dependerán de la frecuencia con que podamos retirar el lixiviado resultante. Se sugiere que este compartimento pueda tener una tapa para que no se filtre el agua de lluvia.
Área de separación de lombrices y harneado	Se puede dedicar un área específica a este sitio o simplemente destinar un espacio donde se pueda harnear la composta resultante.

Figura 1.

Canaletas para compostaje y centro de acopio



Monitoreo: las variables que condicionaron el tiempo de putrefacción fueron la humedad y la textura de los desechos (menor humedad y textura fibrosa = mayor tiempo de descomposición). Sayara et al. (2020) mencionan que los principales parámetros involucrados en el compostaje son temperatura, aireación, humedad, porosidad y relación carbono/ nitrógeno (C/ N), por lo que el control de estas variables resulta crucial para lograr la degradación de RSO de manera efectiva. La recopilación de RSO en el área de acopio se realizó en tambores de plástico, lo que redujo los olores y favoreció el proceso de precompostaje. Los RSO fueron colocados en las camas 1 a 8. Este proceso permitió que cada cama de compostaje desarrollara fases distintas de la descomposición y que los residuos orgánicos que llegaban al centro de acopio fueran distribuidos de manera uniforme. Así, se estableció un ciclo rotativo entre los residuos que llegaban y los residuos que ya habían finalizado el proceso. El volumen final de composta obtenida fue de casi 50% del total de residuos orgánicos colocados, lo que equivale a un total aproximado de nueve toneladas cada cuatro meses.

El aspecto del material resultante era parecido al de la tierra de jardín, además de carecer de olor y presentar textura uniforme. El lixiviado mostraba un color pardo oscuro. En cuanto a la calidad de los productos, fue posible visualizar que tanto la composta como el lixiviado mostraron las especificaciones de las normas NOM-NMX-FF-109-SCFI-2008 y NOM-021-SEMARNAT-2000. Se analizaron por triplicado cuatro muestras de composta y dos de lixiviado (tabla 3). Kranz et al. (2020) hacen hincapié en los beneficios de la composta en los suelos, mencionando que su aplicación favorece la densidad aparente del suelo, la tasa de infiltración, la conductividad hidráulica y el contenido de agua, así como la estructura del suelo, la estabilidad de los agregados y la porosidad. El proceso de compostaje permite incrementar la actividad microbiana y retener nutrientes de manera de transformarlos en moléculas orgánicas disponibles para las plantas, lo que posibilita el desarrollo idóneo de los cultivos (Cahyo-no et al., 2020). En el caso del lixiviado, Granada y Prada (2015) señalan que para este tipo de compuestos aún falta estandarizar los límites relativos a la calidad de sus nutrientes, pero esto no restringe su capacidad para que sean utilizados como fertilizantes foliares. Los resultados obtenidos muestran de manera satisfactoria que el prototipo presentado es idóneo para el contexto del Valle de Teotihuacán, al tiempo que representa una alternativa económica para la producción de abonos de alta calidad y menor impacto ambiental. Estos factores contribuyen directamente a la agricultura familiar y a la restauración de suelos en la zona.

Tabla 3.
Características físicoquímicas de la composta

Parámetro	Resultado	Niveles	Parámetro	Resultado	Niveles
pH	8.42	5.5 - 8.5	Potasio	38.56 cmol+/ kg	Alto >0.6
Conduc- tividad eléctrica	7.71 dS/m	<4.0	Calcio	26.4 cmol+/kg	Alto > 10
Cenizas	60.82%	N/ A	Magnesio	24.15 cmol+/kg	Alto > 3
Materia orgánica	39.18%	20 - 50	Capacidad de inter- cambio catiónico	106 cmol+/ kg	Muy alta > 40

Carbono	22.73%	N/ A	Hierro	32.1 mg/kg	Adecuado > 4.5
Nitrógeno	1.96 %	1 - 4	Zinc	128.7 mg/ kg	Adecuado > 1
Relación carbono nitrógeno	11.60	10 - 30	Cobre	3.63 mg/kg	Adecuado > 0.2
Fósforo	1,321.2 mg/ kg	Alto > 11	Mangane- so	31.1 mg/kg	Adecuado > 1
Sodio	17.27 cmol+/kg	N/A	Boro	8.70	Adecuado > 2.1
Nota. Elaborada con base en las NMX-FF-109-SCFI-2008 y NOM-021-Semarnat-2000, así como en los parámetros reportados por Quispe et al. (2024).					

Conclusiones

El aprovechamiento de residuos sólidos orgánicos (RSO) mediante compostaje tiene una estrecha relación con la economía circular y el desarrollo sostenible, debido a que optimiza el uso de recursos naturales y minimiza las pérdidas dentro del proceso. El prototipo de infraestructura presentado responde a las características del contexto del Valle de Teotihuacán que facilitan las condiciones para su desarrollo operativo. Respecto a los componentes organizativos es necesario articular un modelo de gestión municipal que posibilite una ruta de acopio y la clasificación de residuos, ya que la organización comunitaria implicada en la gestión aún no carece de una estructura de base que facilite este proceso. Su implementación favorecería la disminución de residuos en la zona y fortalecería los planes de manejo de RSO en el sitio.

Referencias

- Al-Rumaihi, A., McKay, G., Mackey, H. R. y Al-Ansari, T. (2020). Evaluación del impacto ambiental de la gestión de residuos alimentarios usando dos técnicas de compostaje [Environmental Impact Assessment of Food Waste Management Using Two Composting Techniques]. *Sustainability*, 12(4), 1595. <https://doi.org/10.3390/su12041595>
- Cahyono, P., Loekito, S., Wiharso, D., Afandi, Rahmat, A., Nishimura, N. y Senge, M. (2020). Efectos del compost en las propiedades del suelo y el rendimiento de la piña (*Ananas comosus* L. Merr.) en suelo ácido rojo, Lampung, Indonesia [Effects of compost on soil properties and yield of pineapple (*Ananas comosus* L. Merr.) on red acid soil, Lampung, Indonesia]. *International Journal of Geomate*, 19(76), 33–39. <https://doi.org/10.21660/2020.76.87174>
- Castro, O., Rivera Martínez, J. M. y Fontalvo Buelvas, J. C. (2022). Intervenciones y estudios socioambientales: Experiencias interdisciplinarias para la sustentabilidad [Socio-environmental interventions and studies: Interdisciplinary experiences for sustainability]. Universidad Autónoma Chapingo.
- Delgado Arroyo, M. d. M., Mendoza López, K. L., González, M. I., Tadeo Lluch, J. L. y Martín Sánchez, J. V. (2019). Evaluación del proceso de compostaje de residuos avícolas empleando diferentes mezclas de sustratos [Assessment of the composting process of poultry wastes using different substrate mixtures]. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 35(4), 965–977. <https://doi.org/10.20937/rica.2019.35.04.15>
- Domenech, T. y Borrion, A. (2022). Incorporación de principios de economía circular en la regeneración urbana y la gestión de residuos: Marco y métricas [Embedding Circular Economy Principles into Urban Regeneration and Waste Management: Framework and Metrics]. *Sustainability*, 14(3), 1293. <https://doi.org/10.3390/su14031293>
- Ellen MacArthur Foundation. (2019). Completando el panorama: Cómo la economía circular enfrenta el cambio climático [Completing the Picture: How the Circular Economy Tackles Climate Change]. <https://ellenmacarthurfoundation.org>

- Enríquez Montero, D. E. (2025). El aporte de la tecnología a la conformación de un circuito económico solidario en Nariño [The contribution of technology to the formation of a solid economic circuit in Nariño]. *Revista Investigium IRE Ciencias Sociales y Humanas*, 16(01), 111–135. <https://doi.org/10.15658/INVESTIGIUMIRE.251601.05>
- Environmental Protection Agency (EPA). (2021). Beneficios de usar compost [Benefits of using compost]. United States Environmental Protection Agency. <https://www.epa.gov/sustainable-management-food/benefits-using-compost>
- Fontalvo Buelvas, J. C., De la Cruz-Elizondo, Y. y Trujillo-Valdivieso, H. (2025). Fundamentos agroecológicos y pedagógicos para la implementación de huertos familiares y educativos [Agroecological and pedagogical foundations for the implementation of family and educational gardens]. *Revista Electrónica en Educación y Pedagogía*, 9(16), 80–103. <https://doi.org/10.15658/rev.electron.educ.pedagog25.06091604>
- Gómez, K. I. (2024). Análisis comparativo de la influencia de la elaboración de compostaje utilizando la técnica en hileras y pila estática en los parámetros químicos, en la provincia de Huamanga-Ayacucho, 2022 [Comparative analysis of the influence of composting using the row and static pile technique on chemical parameters, in Huamanga-Ayacucho province, 2022] [Tesis de licenciatura, Universidad Privada del Norte]. Repositorio de la Universidad Privada del Norte. <https://hdl.handle.net/11537/39572>
- Granada Torres, C. A. y Prada Millán, Y. (2015). Caracterización del lixiviado agroecológico a partir de residuos orgánicos de cultivos [Characterization of agro-ecological leachate from organic crop residues]. *Revista de Investigación Agraria y Ambiental*, 6(2), 169–182. <https://doi.org/10.22490/21456453.1414>
- Kirchherr, J., Reike, D. y Hekkert, M. (2018). Conceptualización de la economía circular: un análisis de 114 definiciones [Conceptualizing the circular economy: An analysis of 114 definitions]. *Resources, Conservation and Recycling*, 127, 221–232. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.09.005>
- Kranz, C. M., McLaughlin, R. A., Johnson, A., Miller, G. y Heitman, J. L. (2020). Los efectos de la incorporación de compost en las propiedades físicas del suelo en suelos urbanos: una revisión concisa [The effects of compost incorpora-

tion on soil physical properties in urban soils – A concise review]. *Journal of Environmental Management*, 261, 110209. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.110209>

Lim, L., Bong, C., Lee, C., Klemes, J., Sarmidi, M. y Lim, J. (2017). Revisión de las prácticas actuales de compostaje y el potencial de mejora mediante compostaje de dos etapas [Review on the Current Composting Practices and the Potential of Improvement using Two-Stage Composting]. *Chemical Engineering Transactions*, 61, 1051–1056. <https://doi.org/10.3303/CET1761173>

López Hernández, V., Limón Hernández, R. A. y Morales Moguel, O. E. (2025). Diagnóstico de la generación de residuos en municipios del norte de Veracruz [Diagnosis of waste generation in municipalities of northern Veracruz]. *Revista Investigium IRE Ciencias Sociales y Humanas*, 16(01), 136–158. <https://doi.org/10.15658/INVESTIGIUMIRE.251601.06>

Navarro Moya, M. A. y Leyte Calixto, H. (2020). Motivaciones turísticas del Corredor del Valle de Teotihuacán; estudio de caso en Zona Arqueológica de Teotihuacán, Estado de México [Touristic motivations of the Teotihuacán Valley Corridor; case study in Teotihuacán Archaeological Zone, State of Mexico]. *Boletín Científico Investigium de la Escuela Superior de Tizayuca*, 5(10), 45–49. <https://doi.org/10.29057/est.v5i10.4981>

Quispe Limaylla, A., Tello Garcia, E. y Guarneros Manoatl, H. (2023). Producción de composta de calidad para la agricultura familiar. Una guía didáctica para el aprovechamiento sustentable de residuos sólidos orgánicos [Production of quality compost for family agriculture. A didactic guide for sustainable use of organic solid waste] [Guía didáctica]. Colegio de Postgraduados. https://www.researchgate.net/publication/387700082_Produccion_de_composta_de_calidad_para_la_agricultura_familiar_Guia_practica_para_el_aprovechamiento_sustentable_de_residuos_solidos_organicos

Quispe Limaylla, A., Tello García, E. y Guarneros Manoatl, H. (2024). Uso apropiado de los productos de compostaje para la producción de cultivos (una guía didáctica) [Appropriate use of composting products for crop production (a didactic guide)] [Guía didáctica]. Colegio de Postgraduados. https://www.researchgate.net/publication/394069804_Uso_apropiado_de_los_productos_de_compostaje_para_la_produccion_de_cultivos_una_guia_didactica

- Sayara, T., Basheer-Salimia, R., Hawambe, F. y Sánchez, A. (2020). Reciclaje de residuos orgánicos mediante compostaje: desempeño del proceso y aplicación del compost en agricultura [Recycling of organic wastes through composting: Process performance and compost application in agriculture]. *Agronomy (MDPI)*, 10(11), 1838. <https://doi.org/10.3390/agronomy10111838>
- Secretaría de Desarrollo Urbano y Obra del Estado de México. (2023). Plan Municipal de Desarrollo Urbano de Teotihuacán [Municipal Urban Development Plan of Teotihuacán]. Gobierno del Estado de México. https://sedui.edomex.gob.mx/sites/sedui.edomex.gob.mx/files/files/planes_municipales/Teotihuacan/PMDU_Teotihuac%C3%A1n_JUNIO%2023.pdf
- Secretaría de Economía. (2008). NMX-FF-109-SCFI-2008. Productos alimenticios no industrializados para consumo humano — Abono orgánico natural — Especificaciones y métodos de prueba [Non-industrialized food products for human consumption — Natural organic fertilizer — Specifications and test methods].
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (2000). NOM-021-Semarnat-2000. Que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos, estudio, muestreo y análisis [That establishes the specifications of fertility, salinity and soil classification, study, sampling and analysis]. *Diario Oficial de la Federación*.
- Vega Armenta, R. M., Ruelas Ayala, R. D., Sañudo Torres, R. R. y Félix Herrán, J. A. (2025). Compostaje de residuos sólidos orgánicos y su efecto en especies forestales de importancia económica en el norte de Sinaloa [Composting of organic solid waste and its effect on forest species of economic importance in northern Sinaloa]. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 41, 65–75. <https://doi.org/10.20937/RICA.55125>
- Vizcaíno Zúñiga, P. I., Cedeño Cedeño, R. J. y Maldonado Palacios, I. A. (2023). Metodología de la investigación científica: guía práctica [Scientific research methodology: practical guide]. *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar*, 7(4), 9723–9762. https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v7i4.7658

Derechos de Autor© 2026 Guarneros Manoatl, Hortencia; Quispe Limaylla, Aníbal; Tello García, Enriqueta.



Este texto está protegido por una licencia Creative Commons 4.0, Attribution 4.0 International. Usted es libre para Compartir, copiar y redistribuir el material en cualquier medio o formato y adaptar el documento, remezclar, transformar y crear a partir del material— para cualquier propósito, incluso para fines comerciales, siempre que cumpla la condición de: Atribución: Usted debe dar crédito a la obra original de manera adecuada, proporcionar un enlace a la licencia, e indicar si se han realizado cambios. Puede hacerlo en cualquier forma razonable, pero no de forma tal que sugiera que tiene el apoyo del licenciante o lo recibe por el uso que hace de la obra.