



Ingeniantes®

Año 12, No.2, Vol. 2

Revista de Investigación . Instituto Tecnológico Superior de Misantla

1ER COLOQUIO INTERNACIONAL
MULTIDISCIPLINARIO DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN

8 AL 10
DICIEMBRE 2025

MODALIDAD HÍBRIDA ///////////////

"Innovación, ciencia y sostenibilidad desde el posgrado del ITSM"

EXCELENCIA + TRASCENDENCIA
MUNDIAL



Edición Especial

www.misantla.tecnm.mx

Ingeniantes

Año 12 / No. 2 / Vol. 2

Información Legal

Ingeniantes, Año 12, No. 2, Vol 2. - diciembre 2025- julio 2026, es una publicación semestral editada y publicada por el Instituto Tecnológico Superior de Misantla, Km. 1.8 carretera a Loma del Cojolite, Misantla, Veracruz. México, C.P. 93850, teléfono 01 (235) 323 60 18, página web citt.itsm.edu.mx. Editor responsable: Lic. Jorge Obdulio Gerón Borjas, Reserva de Derechos al Uso Exclusivo No. 04-2015-062512501200-203, ISSN 2395-9452, ambos otorgados por el Instituto Nacional del Derecho de Autor. Responsable de la última actualización de este número, Centro de Innovación & Transferencia de Tecnología del ITSM, Lic. Jorge Obdulio Gerón Borjas, Km. 1.8 carretera a Loma del Cojolite, Misantla, Veracruz. México, C.P. 93850, fecha de última modificación, 26 de diciembre de 2025.

Actualmente indexada en la base de datos del Sistema Regional de Información en Línea para Revistas Científicas de América Latina, el Caribe, España y Portugal LATINDEX, con número de registro 22843.

Se autoriza cualquier reproducción parcial de los contenidos o imágenes de la publicación siempre y cuando sea sin fines de lucro y para usos estrictamente académicos, citando invariablemente la fuente dando los créditos a los autores del artículo.

El contenido de los artículos publicados es responsabilidad de los autores y no representa el punto de vista del editor de la Revista Ingeniantes.

Cuerpo Editorial

Editor General
Instituto Tecnológico Superior de Misantla
Editor
Lic. Jorge Obdulio Gerón Borjas
Coeditor
Lic. Erik Balderas González

Administración

MII. Mayra Lizeth Méndez Oloarte

Propiedad Intelectual

Centro de Innovación & Transferencia de Tecnología
Lic. Jorge Obdulio Gerón Borjas

Sistemas

Administrador de Sistemas
Mtro. José Juan Reyes Torres
Webmaster
L.I. Ana Marcela Gutiérrez Romero

Distribución

Publicación electrónica disponible en
citt.itsm.edu.mx/ingeniantes
Correo electrónico:
revista.ingeniantes@itsm.edu.mx
<https://www.latindex.org/latindex/ficha/22843>

Directorio

Mtra. María Teresa Meza Caiceros

Director General, ITSM, Veracruz, México

Mtro. Saúl Reyes Barajas

Director Académico, ITSM, Veracruz, México

Lic. Juan Antonio Hernández Morales

Director de Planeación y Vinculación, ITSM, Veracruz, México

Mtra. Aracely Romano García

Subdirectora Académica, ITSM, Veracruz, México

Dr. Edgar Soto Meneses

Subdirector de Planeación, ITSM, Veracruz, México

Dr. José Luis Marín Muñiz

Subdirector de Posgrado e Investigación, ITSM, Veracruz, México

Dr. Federico Perera Zapata

Subdirector de Vinculación, ITSM, Veracruz, México

Lic. Reyna Villalva Velasco

Subdirectora de Servicios Administrativos, ITSM, Veracruz, México

Comité de Revisión

| | | |
|---|------|--|
| Dr. Luis Alberto Morales Rosales, UMSNH | SNII | Dra. María Victoria Carreras Cruz, UP |
| Dr. David Lara Alabazares, ITSM | SNII | Dr. Ramón Álvarez López, UDG |
| Dr. Gregorio Fernández Lambert, ITSM | SNII | Dr. Gustavo Martínez Castellanos, ITSM |
| Dr. Javier Esquer Peralta, UNISON | SNII | Dr. Arturo Cabrera Hernández, ITSM |
| Dr. Francisco Reyes Zepeda, IEA-UAT | SNII | Dr. Saúl Santiago Cruz, ITSM |
| Dr. Eduardo Mael Sánchez Coronado, ITCV | SNII | Dr. Joel Pozos Osorio, HUB2i |
| Dr. Jesús Antonio Álvarez Cedillo, IPN | SNII | Dra. Ana Lilia Sosa y Durán, ITSM |
| Dr. Roberto Ángel Meléndez Armenta, ITSM | SNII | Dr. Guillermo Alfredo Arriola Carrera, UX |
| Dr. Adolfo Preciado Quiroz, ITSDZ | SNII | Dr. Modesto Raygosa Bello, ITO |
| Dr. José Luis Marín Muñiz, CV | SNII | Dr. Luis Alberto Nava Ordoñez, UPAEP |
| Dr. Julio César Chacón Hernández, UAT | SNII | Dr. Irahán Otoniel José Guzmán, ITSM |
| Dr. Eddy Sánchez de la Cruz, ITSM | SNII | Dr. Humberto Raymundo González Moreno, ITSM |
| Dra. María Cristina López Méndez, ITSM | SNII | Dra. María Guadalupe Montes de Oca, ITSM |
| Dr. Luis Carlos Sandoval Herazo, ITSM | SNII | M.C. Clovis Nchikou, ITNL |
| Dr. José de Jesús Ibarra Montalvo, ITSDZ | SNII | M.I. Fernando Jurado Pérez, ITESI |
| Dr. Andrés Blanco Ortega, CENIDET | SNII | M.I.I. Aarón Montiel Rosales, ITSPR |
| Dr. Juan Carlos González Hernández, ITM | SNII | M.I.I. Nayeli Montalvo Romero, ITSPR |
| Dr. Heriberto Esteban Benito, ITSNA | SNII | M.I.I. Gema del Carmen Jiménez Gómez, ITSAV |
| Dra. Paula Rosalinda Antonio Vidaña, UTCV | SNII | M.I.I. Mario Pérez Acosta, ITSM |
| Dr. Sergio Aurelio Zamora Castro, UV | SNII | M.I.I. Leonardo Martínez Lara, ITSAV |
| Dra. Blanca Dina Valenzuela Robles, CENIDET | SNII | M.S.C. Arnulfo Gamaliel Hernández González, ITSM |
| Dr. Daniel Martínez Navarrete, ITSAV | SNII | M.I.M. Jorge Roa Díaz, ITSM |
| Dra. Laura Celina Ruelas Monjardín, UV | SNII | M.C. Vladimir Zagoya Juárez, ITSM |
| Dra. Paula Rosalinda Antonio Vidaña, UTCV | SNII | M.G.C. Eduardo Gutierrez Almaraz, ITSM |
| Dr. Sergio Fabian Ruiz Paz, UNPA | SNII | M.I.I. Giovanni Luna Chontal, ITSM |
| Dr. Arturo Pacheco Espejel, IPN | SNII | M.A. Luz del Carmen Muñoz Palacios, UTCV |
| Dr. Cuauhtémoc Guerrero Dávalos, UMSNH | SNII | M.C. Joel Maurilio Morales García, ITSM |
| Dr. Francisco Reyes Zepeda, IEA-UAT | SNII | M.S.C. Cecilia Irene Loeza Mejía |
| Dr. José Pastor Rodríguez Jarquín, ITO | SNII | M.S.C. Galdino Martínez Flores |
| Dr. Luis Enrique García Santamaría, ITSM | SNII | |
| Dr. Alan Rico Barragán, ITSM | SNII | |
| Dra. Alicia Martínez Rebollar, CENIDET | SNII | |
| Dr. Luis Mejía Macario, ITSM | SNII | |
| Dr. Alfredo Alberto Morales Tapia, UV | SNII | |

Comité de Revisión del COLOQUIO INTERNACIONAL DE INGENIERÍAS ITSM

Dra. María Salomé Alejandre Apolinar
Dr. Hugo Amores Pérez
Dra. Margarita del Carmen Torres Morales
Dra. Gabriela del Pilar Mora Pineda
Dra. Criseida Gabriela Zamora Chimal,
Dra. Alejandra Contreras Rodríguez
Dr. Jose Luis Marín Muñiz
Dr. Barbara Beatriz Moguel Rodríguez
Dra. Guadalupe Esmeralda Rivera García
Dr. Alejandro Quirino Villarreal
Dra. Yodaira Borroto Penton
Dr. Pablo Julián López González
Dra. Graciela Elizabeth Nani González
Dr. David Reyes González
Dr. Simón Pedro Arguijo Hernández
Dr. Miguel Ángel López Ramírez
Dra. Susana Isabel Castillo Martínez
Dra. Silvia Sosol Sánchez
Dra. María Leonor Méndez Hernández
Dr. Miguel Anguiano Sánchez
Dra. Victoria Pacheco Almaraz
Dr. Barsimeo González Panzo
Dr. Juan Carlos Rodríguez Campos
Dra. Lilia Elva Trejo Romo
Dr. Mario Luis Chew Hernández
Dra. Susana Astrid López García
Dr. Francisco Javier Mejía Ochoa
Dra. María Teresa Torres Mancera
Dra. Julia Patricia Melo Morín
Dra. María del Refugio Castañeda
Dra. Yasmin Soto Leyva
Dr. Marcos Jesús Villaseñor Aguilar
Dra. Liduvina Valencia Márquez
Dra. Violeta Jiménez Zárata
Dr. Luis Ernesto Irigoyen Arroyo
Dra. María Elena Hernández Hernández

Dra. Alicia del Pilar Silva Zamora
Dra. Karla Lissette Silva Martínez
Dra. Lidilia Cruz Rivero
Dra. María de la Luz Sánchez Mundo
M.I.I. Gabriel Grosskelwing Nuñez
M.C. Elizabeth Salazar Hernández
M.I.I. Pablo Colorado Posadas
M.I.I. Marieli Lavoignet Ruiz
M.E. Alejandro del Rey Torres Rodríguez
M.G.H. David Arroyo Acosta
M.C. José Antonio Hiram Vázquez López
M.C. Guadalupe Rodríguez Martínez
M.I. Joaquín Sangabriel Lomelí
M.I.I. Ana Roselyn Pérez Méndez
M.I.I. Carlos Ángel Vicente Rodríguez
M.C.C. Rosa de Guadalupe Cano Anguiano
M.I. Heber Bernabé Pérez Márquez
M.A. Jorge Varela Pérez
M.C.C. Nelly Beatriz Santoyo Rivera
M.C. Francisco Quiroz Aguilar
M.I.A. Montserrat Ruiz Díaz
M.A. Dulce Marisol Arteaga Godoy
M.L.C.S. María del Carmen Chacón Olivares
M.I.A. Dulce María Flores Báez
M.I.S. Carmen Jeannette Sampayo Rodríguez
M.A. José Miguel Carrillo Zurita
M.T. Esther Mariela Arzate Escamilla
M.C. Daniela Lizbeth Hernández Sánchez
M.C. Arturo Santos Gómez
M.I.A. Edgar Jesús Cruz Solís
M.C.I.A. Sandra Guadalupe García Aburto
M.G.C. Karla Alejandra Jiménez Martínez
M.I.A. Julio César Martínez Hernández
M.T.I. Ali Pérez Gómez
M.I.I. María Isabel Marín Hernández

1^{ER} COLOQUIO INTERNACIONAL

MULTIDISCIPLINARIO DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN

8 AL 10
DICIEMBRE 2025

MODALIDAD HÍBRIDA ////////////////

“Innovación ciencia y sostenibilidad desde el posgrado del ITSM”

El Congreso Internacional Multidisciplinario de Posgrado e Investigación se consolida como un espacio clave para impulsar el desarrollo académico y científico, al promover la formación integral de estudiantes de licenciatura y posgrado. A través de la difusión de trabajos de investigación, este encuentro fomenta una cultura basada en el conocimiento, donde la ciencia se posiciona como un pilar fundamental para comprender y transformar la realidad.

La innovación juega un papel central en este Coloquio, al incentivar la presentación de propuestas creativas y metodologías novedosas que respondan a los retos actuales. Mediante la exposición de pósteres científicos y ponencias, los participantes no solo comunican resultados, sino que también generan nuevas ideas que fortalecen el avance tecnológico y académico, contribuyendo al progreso de la sociedad.

Asimismo, la sostenibilidad se integra como un eje transversal que orienta los esfuerzos de investigación hacia soluciones responsables y de largo plazo. La generación de conocimiento con enfoque sostenible permite abordar problemáticas sociales, ambientales y económicas, impulsando un desarrollo equilibrado que beneficie tanto a las generaciones presentes como futuras.

En conjunto, este Coloquio se convierte en un motor de desarrollo al articular la ciencia, la innovación y la sostenibilidad como elementos estratégicos. Al fomentar el intercambio de ideas y el pensamiento crítico, se fortalece una comunidad académica comprometida con la creación de soluciones que impacten positivamente en el entorno local y global.

Ingeniantes



03



11



16



22



30

Contenido

Aplicación de un modelo de economía circular en un sistema multitrófico urbano con **Oreochromis niloticus**, *Lymnaea stagnalis* y *Lemna minor* _____ 03

Denisse Arleth López Díaz; Gustavo Martínez Castellanos, Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico Superior de Misantla; Isidro Rodríguez Montoro, Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico Superior de Martínez de la Torre; Alan Antonio Rico Barragán; Dana Yamileth Cano Vicencio, Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico Superior de Misantla

Estrés térmico como riesgo laboral en MiPyMEs: estudio de caso en panaderías de Misantla, Veracruz _____ 11

Yensy Fernández Pentón; Isis Itzel Lara Reyes, Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico Superior Misantla; Rodrigo Vivar Ocampo, Universidad Autónoma de Baja California; David Reyes González, Mario Pérez Acosta, Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico Superior Misantla

Fortalecimiento del papel de la mujer a través del análisis de la cadena de valor en la Sociedad Cooperativa "La Perla del Golfo" S.C.L. _____ 16

Sharit Naomi Lara Hernández; Luis Manuel Siliceo Verónica; María Guadalupe Montes de Oca Sánchez; Alejandro Del Rey Torres Rodríguez, Puala Guadalupe Degado López, Tecnológico Nacional de México / ITS de Misantla

RoboComposta: prototipo de compostera semi-automatizada para educación ambiental 22

Diego Rafael Hernández Ruiz; Mariam Andrade San Martín; Noreni Casagnon Rodríguez; Alan Antonio Rico Barragán; Humberto Raymundo González Moreno, Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico Superior de Misantla

Sistema automatizado de tamiz perforado basculante para el pretratamiento de aguas residuales cárnicas basado en diseño conceptual y caracterización hidráulica _____ 30

Diego Armando Bravo Foglia; Obed Oropeza Morales; Víctor Eliasib Pérez Méndez; Humberto Raymundo González Moreno; Jesús Castellanos Rivera, Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico Superior de Misantla

Ingeniantes



40



48



56



64



70

Diseño y validación de un prototipo de bajo costo para la adquisición de datos del campo magnético terrestre RADM: aplicación en levantamientos magnéticos superficiales _____ 40

Silvia Patricia Morales Juárez, Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico Superior de Misantla; Ulises Santos López, Instituto Tecnológico Superior de Poza Rica; Elizabeth Salazar Hernández; José Francisco Santiago Rojas, Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico Superior de Misantla

Optimización de las condiciones de extracción del maguey morado (*Rhoeo spathacea*) con potencial de uso tópico _____ 48

Irma Castillo Carmona; Arturo Cabrera Hernández; Joaquín Sangabriel Lomelí; Naomi Barrera Villalobos; Brenda Suemy Trujillo García, Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico Superior de Misantla

Evaluación cualitativa de la cáscara de naranja como material bioabsorbente para la remoción de hidrocarburos ligeros _____ 56

Jesús Iván Ruiz Simón; Karla Ivette Rodríguez Tlapa; Abel Eduardo Meza Martínez; David Reyes González, María Cristina López Méndez, Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico Superior de Misantla.

Caracterización de la topografía superficial de polímeros con potencial triboeléctrico mediante Microscopía de Fuerza Atómica _____ 64

Antia Ivett Álvarez Bernabé, Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico de Misantla; Agustín Leobardo Herrera May, Centro de investigación en micro y nanotecnología; María Cristina López Méndez, Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico de Misantla, Juan Vicente Méndez Méndez; Israel Arzate Vázquez, Centro de Nanociencias y Micro y nanotecnologías

Monitoreo regional del estrés hídrico en cultivos de cítricos mediante imágenes hiperespectrales Prisma e Inteligencia Artificial en el centro-norte de Veracruz _____ 70

Luis Enrique Gómez Guerrero; Irahan Otoniel José Guzmán; Ojilve Ramón Medrano Pérez; Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico Superior de Misantla; Isaías Avendaño Cortes, Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico Superior de Huatusco



Multidisciplinario
e
ingenierías

Ingeniantes

Aplicación de un modelo de economía circular en un sistema multitrófico urbano con *Oreochromis niloticus*, *Lymnaea stagnalis* y *Lemna minor*

RESUMEN: La acuicultura urbana a pequeña escala enfrenta limitaciones técnicas y económicas, principalmente asociadas al alto costo del alimento comercial y al manejo ineficiente de nutrientes en sistemas con infraestructura limitada. El objetivo de este estudio fue evaluar la viabilidad técnica y económica de un modelo de economía circular aplicado a un sistema multitrófico urbano integrado por *Oreochromis niloticus*, *Lymnaea stagnalis* y *Lemna minor*, orientado a la sustitución parcial del alimento balanceado mediante biomasa interna.

La investigación se desarrolló bajo un diseño cuasi-experimental comparativo con dos sistemas IMTA operados bajo recirculación acuícola. Se monitorearon semanalmente parámetros fisicoquímicos del agua (amoníaco, nitritos, nitratos, pH, sólidos disueltos totales, conductividad y temperatura) y se registraron peso y talla cada dos semanas. El análisis se realizó mediante estadística descriptiva, calculando medias, desviaciones estándar y variaciones porcentuales entre tratamientos.

Ambos sistemas mantuvieron estabilidad fisicoquímica y crecimiento sostenido de los organismos. El sistema con sustitución parcial del alimento comercial redujo en 38 % el costo de alimentación respecto al sistema convencional, sin afectar el desempeño productivo.

Los resultados evidencian que la integración multitrófica bajo principios de economía circular es técnicamente viable y económicamente favorable en sistemas acuícolas urbanos de pequeña escala con infraestructura limitada.

PALABRAS CLAVE: Economía circular, acuicultura urbana, sistemas multitróficos, sostenibilidad, reciclaje de nutrientes.



Colaboración

Denisse Arleth López Díaz; Gustavo Martínez Castellanos, Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico Superior de Misantla; Isidro Rodríguez Montoro, Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico Superior de Martínez de la Torre; Alan Antonio Rico Barragán; Dana Yamileth Cano Vicencio, Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico Superior de Misantla

Fecha de recepción: 12 de diciembre de 2025

Fecha de aceptación: 18 de diciembre de 2025

ABSTRACT: Small-scale urban aquaculture faces technical and economic constraints, mainly associated with the high cost of commercial feed and inefficient nutrient management in systems with limited infrastructure. The objective of this study was to evaluate the technical and economic viability of a circular economy model applied to an urban multitrophic system composed of *Oreochromis niloticus*, *Lymnaea stagnalis*, and *Lemna minor*, aimed at partially replacing balanced feed with internal biomass.

The research was conducted under a comparative quasi-experimental design with two IMTA systems operated under aquaculture recirculation. Physical-chemical parameters of the water (ammonia, nitrites, nitrates, pH, total dissolved solids, conductivity, and temperature) were monitored weekly, and weight and size were recorded every two weeks. The analysis was performed using descriptive statistics, calculating means, standard deviations, and percentage variations between treatments.

Both systems maintained physicochemical stability and sustained growth of the organisms. The system with partial replacement of commercial feed reduced feed costs by 38 % compared to the conventional system, without affecting productive performance.

The results show that multitrophic integration under circular economy principles is technically feasible and economically favorable in small-scale urban aquaculture systems with limited infrastructure.

KEYWORDS: Circular economy, urban aquaculture, multitrophic systems, sustainability, nutrient recycling.

INTRODUCCIÓN

El crecimiento de la urbanización y el uso intensivo de recursos naturales han evidenciado las limitaciones del modelo productivo lineal, particularmente en los sistemas agroalimentarios urbanos, donde la disponibilidad de agua, espacio e insumos representa un reto constante para la sostenibilidad [1], [2]. En este contexto, la economía circular surge como un enfoque alternativo que promueve la reducción de residuos, el reciclaje de materiales y el cierre de ciclos de materia y energía dentro de los sistemas productivos [3], [4].

En el ámbito acuícola, los sistemas multitróficos integrados (IMTA) permiten aplicar estos principios mediante la interacción de organismos de distintos niveles tróficos, donde los desechos metabólicos de una especie son aprovechados por otras, incrementando la eficiencia ecológica y reduciendo la dependencia de insumos externos como piensos y fertilizantes [5], [10]. En sistemas con recirculación de agua, esta integración puede fortalecer el reciclaje interno de nutrientes y mejorar la estabilidad ambiental del cultivo [6], [11].

Diversos estudios han demostrado que los sistemas acuapónicos e integrados pueden contribuir a la sostenibilidad ambiental y a la optimización del uso del agua [7], [8]. Asimismo, análisis recientes de la evolución global de la acuicultura resaltan la necesidad de modelos productivos más eficientes y adaptables a distintos contextos territoriales [9].

No obstante, la mayor parte de la literatura se ha concentrado en sistemas semi-intensivos o intensivos con infraestructura especializada y mayores niveles de automatización. Aunque estos modelos muestran eficiencia productiva, su implementación resulta limitada en entornos urbanos de pequeña escala con infraestructura simplificada y recursos restringidos. Además, son escasos los estudios experimentales que integren simultáneamente el desempeño productivo, la estabilidad fisicoquímica del agua y el análisis económico en sistemas IMTA urbanos de baja escala [10], [12].

Esta brecha científica limita la transferencia tecnológica hacia sistemas urbanos con capacidades técnicas reducidas, donde la viabilidad económica depende en gran medida de la reducción de costos operativos, particularmente del alimento balanceado, que constituye uno de los principales gastos en la producción acuícola [12].

En este contexto, el presente estudio evalúa experimentalmente un modelo de economía circular aplicado a un sistema multitrófico urbano a pequeña escala, integrado por *Oreochromis niloticus*, *Lymnaea stagnalis* y *Lemna minor*, bajo recirculación acuícola. El enfoque se centra en la sustitución parcial del alimento comercial mediante biomasa interna, el aprovechamiento de nutrientes y la evaluación técnica y económica del sistema.

El objetivo de esta investigación es proponer y evaluar un modelo de economía circular en un sistema multitrófico urbano, orientado a mejorar el reciclaje de nutrientes y fortalecer la sostenibilidad ambiental y económica en contextos urbanos con infraestructura limitada.

MATERIAL Y MÉTODOS

Lugar de ejecución del estudio

La investigación se desarrolló en las instalaciones del Instituto Tecnológico Superior de Misantla (ITSM), Veracruz, México, bajo condiciones ambientales abiertas en un entorno urbano. El estudio se realizó en un sistema experimental de acuicultura multitrófica a baja escala, para evaluar la aplicación de principios de economía circular en contextos urbanos.

Diseño experimental

El estudio se desarrolló bajo un diseño cuasi-experimental comparativo, de tipo aplicado y experimental. Se evaluaron dos sistemas acuícolas multitróficos con recirculación de agua (IMTA), operados de manera paralela y bajo condiciones controladas similares, diferenciados únicamente por el esquema de alimentación aplicado.

Unidad experimental

La unidad experimental correspondió a cada sistema acuícola multitrófico completo, integrado por el tanque de cultivo, tanque sedimentador y cama de biofiltración. Cada sistema operó como una unidad independiente para la comparación técnica y económica de los tratamientos.

Población y muestra

La población de estudio estuvo conformada por organismos acuáticos de diferentes niveles tróficos en dos sistemas idénticos. La muestra experimental incluyó 30 ejemplares de *Oreochromis niloticus*, con un peso inicial promedio de 10 ± 2 g. Asimismo, se integraron 60 caracoles adultos (*Lymnaea stagnalis*) y 100 g de biomasa húmeda de *Lemna minor* en los reservorios como organismos recicladores de nutrientes y productores de biomasa.

Tratamientos experimentales

El factor de estudio fue el tipo de alimentación, con dos tratamientos:

- IMTA-1 (referencia): alimentación comercial convencional (GrowFish).
- IMTA-2 (economía circular): sustitución parcial del alimento comercial mediante biomasa interna (*Lemna minor* y *Lymnaea stagnalis*).

En el IMTA-2, la sustitución se realizó dos días por semana, manteniendo equivalencia en peso respecto a la ración diaria correspondiente.

Procedencia de materiales y organismos

Los ejemplares de *Oreochromis niloticus* fueron adquiridos de un proveedor acuícola regional. *Lymnaea stagnalis* y *Lemna minor* se obtuvieron de cultivos propios

de la unidad productiva BioAquaFlex del ITSM. La Lemna fue incorporada a la cama de biofiltración y *Lymnaea stagnalis* fue agregado al tanque sedimentador donde posteriormente se adhirió a las paredes del mismo. Se construyeron dos sistemas idénticos a partir de contenedores tipo IBC de 1,100 L, tanques plásticos auxiliares de 200 L y tubería de PVC de 1½ pulgadas. La recirculación se realizó mediante una bomba sumergible de 18 W con un caudal nominal de 1,200 L/h para cada sistema.

Descripción del sistema y condiciones de operación

Cada sistema multitrófico estuvo conformado por un estanque de cultivo principal, tanque sedimentador y cama de biofiltración como se muestra en la Figura 1. El oxígeno disuelto se mantuvo en niveles de 6.0 +/- 1 mg/L mediante aireación continua con una bomba AQC-007. No se realizaron recambios totales de agua durante el periodo experimental; únicamente se repusieron pérdidas por evaporación y mantenimiento del tanque mecánico, equivalentes a aproximadamente el 9 % mensual del volumen total. Todas las mediciones se realizaron utilizando unidades del Sistema Internacional (SI).

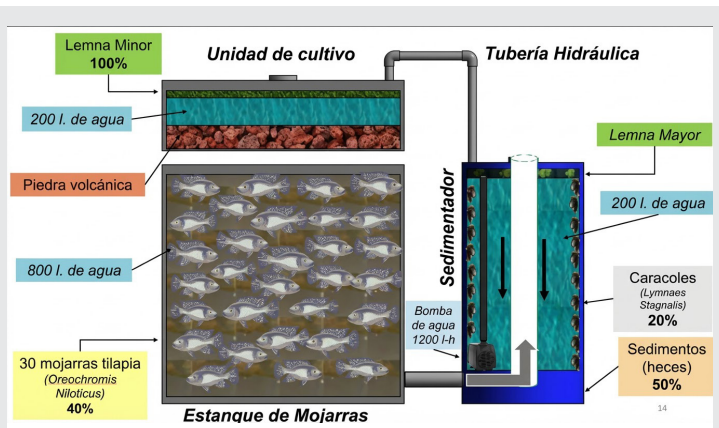


Figura 1. Funcionamiento del sistema multitrófico urbano.

Fuente: Elaboración propia.

Factores, niveles y tratamientos

El factor principal de estudio fue el tipo de alimentación, en dos condiciones; alimentación comercial convencional de la marca Growfish (IMTA-1) y alimentación con sustitución parcial mediante biomasa interna de *Lemna minor* y *Lymnaea stagnalis* (IMTA-2).

El tratamiento experimental que se desarrolló en el IMTA-2 consistió en la sustitución del alimento comercial dos días por semana (2 y 5): un día con biomasa fresca de *Lemna minor* y un día con *Lymnaea stagnalis* triturado. El sistema con alimentación convencional (IMTA 1) se consideró como tratamiento de referencia para la comparación operativa.

La sustitución del alimento convencional se realizó en función de la ración diaria correspondiente, manteniendo la equivalencia en peso. En el caso de Lemna minor, la biomasa se recolecta directamente de la cama de biofiltración, se escurre para eliminar el exceso de agua,

posteriormente se pone en papel absorbente por 30 minutos y se procede a pesarla en una báscula OHAUS Compass™ (CX Báscula - 220 gramos x 0.1 g) antes de ser suministrada a los peces. De manera similar, para la sustitución con *Lymnaea stagnalis*, los caracoles se extraen del tanque sedimentador para escurrirlos con un colador, se procede a ponerlos en papel absorbente durante 30 minutos y pesarlos. Posteriormente, la biomasa se tritura manualmente con un mortero hasta obtener una mezcla homogénea, la cual se suministró como alimento alternativo a los peces.

Métodos, técnicas y equipos de medición

El peso y la talla de los organismos en experimentación se registraron manualmente cada dos semanas. De acuerdo con la tabla de recomendaciones del plan de nutrición de GrowFish, durante los primeros cuatro periodos la alimentación se suministró cuatro veces al día, con una ración total equivalente al 8 % del peso corporal, la cual fue ajustada conforme al peso registrado. Posteriormente, la ración se modificó al 5 % del peso corporal de acuerdo con las indicaciones del proveedor comercial. Por lo que se realizó un cambio en la etapa del alimento, pasando de Desarrollo Bioferling 1.5 a Crecimiento Grow-Tilapia 2. Para los tres periodos restantes, la alimentación se redujo a tres dosis diarias, con una ración total equivalente al 4 % del peso corporal.

Los parámetros fisicoquímicos del agua: se monitorearon semanalmente. El oxígeno disuelto y la temperatura se midieron con un medidor digital portátil (AZ86021); el pH, la microconductividad eléctrica y los sólidos disueltos totales (TDS) se determinaron con un equipo multiparamétrico (Hanna HI98129); los compuestos nitrogenados (amoníaco, nitritos y nitratos) se analizaron mediante kits colorimétricos comerciales, siguiendo las especificaciones del fabricante (Api Freshwater Master Test Kit).

Enfoque de análisis de datos

El análisis de datos se realizó mediante estadística descriptiva, calculando medias y desviaciones estándar para cada variable. Las diferencias entre tratamientos se analizaron mediante la comparación de tendencias temporales y la variación porcentual de los indicadores productivos, fisicoquímicos y económicos.

RESULTADOS

Los sistemas multitróficos urbanos operaron durante todo el periodo experimental sin fallas estructurales ni hidráulicas. Ambos sistemas mantuvieron recirculación continua bajo las mismas condiciones operativas.

Crecimiento productivo

La Figura 2 muestra la evolución del peso promedio (\pm desviación estándar) de *Oreochromis niloticus* en los sistemas IMTA-1 e IMTA-2. En ambos tratamientos se registró un incremento progresivo del peso corporal durante el periodo experimental. Las curvas de crecimiento presentaron tendencias similares entre sistemas.

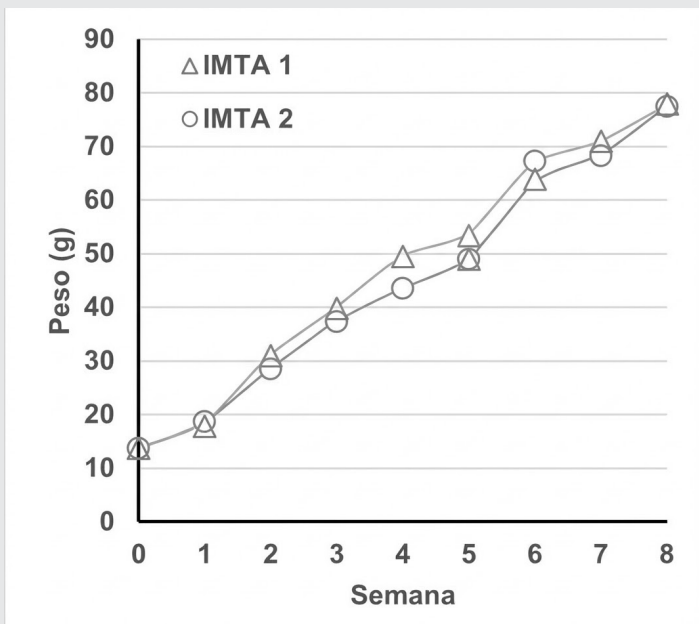


Figura 2. Comparación del peso promedio y desviación estándar de *Oreochromis niloticus* en el sistema IMTA 1 e IMTA 2. Fuente: Elaboración propia.

La sustitución parcial del alimento comercial mediante biomasa interna no evidenció efectos negativos sobre el aumento de peso, manteniéndose una tendencia de crecimiento acorde con sistemas de recirculación acuícola de baja densidad.

En relación con la talla, la Figura 3 presenta el crecimiento promedio en longitud (\pm desviación estándar). En ambos sistemas se observó un aumento sostenido del tamaño corporal a lo largo del periodo de evaluación, sin variaciones abruptas en las mediciones registradas.

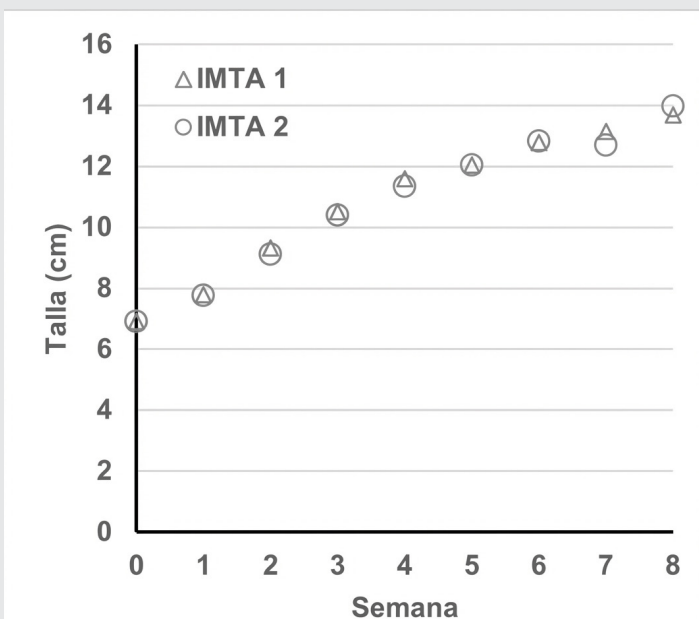


Figura 3. Comparación del tamaño promedio y desviación estándar de *Oreochromis niloticus* en el sistema IMTA 1 e IMTA 2. Fuente: Elaboración propia.

De manera conjunta, los resultados de peso y tamaño confirman que el esquema multitrófico implementado permitió un crecimiento normal de los peces, aún con la aplicación de una estrategia de economía circular basada en la sustitución parcial de insumos externos. Las gráficas de peso y talla evidencian la compatibilidad del modelo propuesto con el desempeño productivo esperado en sistemas acuícolas urbanos a baja escala.

Parámetros fisicoquímicos

Las concentraciones de amoníaco ($\text{NH}_3/\text{NH}_4^+$), presentadas en la Figura 4, se mantuvieron en niveles bajos en ambos sistemas durante todo el periodo experimental.

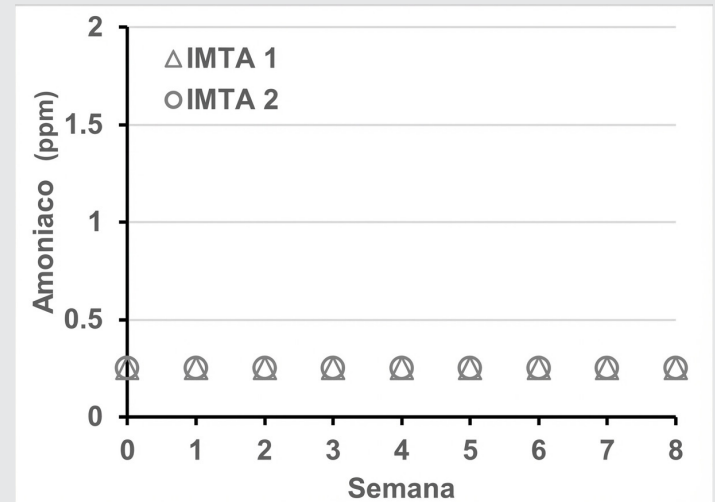


Figura 4. Comparación de las concentraciones de amoníaco (NH_3) en los sistemas IMTA 1 e IMTA 2. Fuente: Elaboración propia.

Los valores de nitritos (NO_2^-), mostrados en la Figura 5, registraron concentraciones similares entre IMTA-1 e IMTA-2.

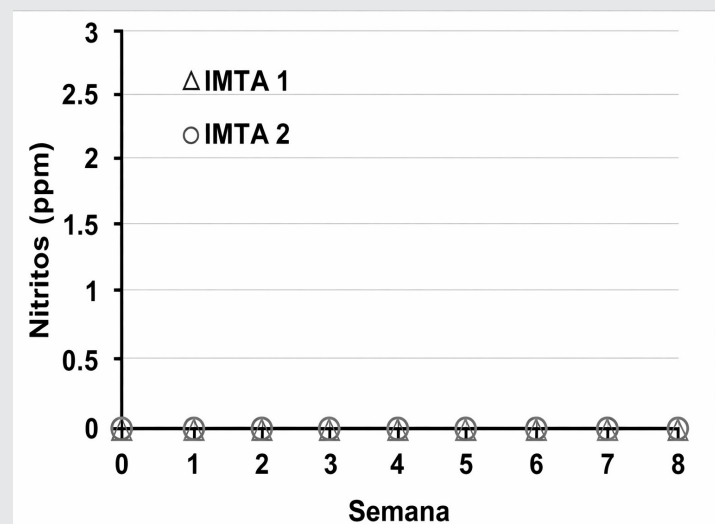


Figura 5. Comparación de las concentraciones de nitritos (NO_2) en los sistemas IMTA 1 e IMTA 2. Fuente: Elaboración propia.

Las concentraciones de nitratos (NO_3^-), ilustradas en la Figura 6, permanecieron estables a lo largo del monitoreo.

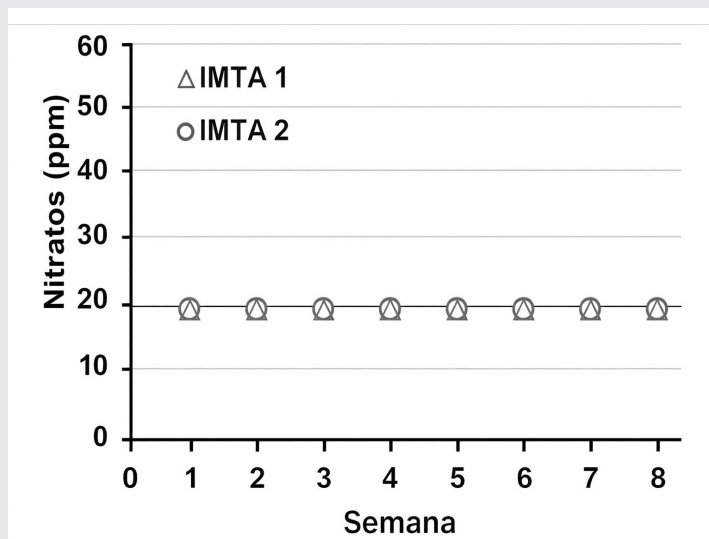


Figura 6. Comparación de las concentraciones de nitratos (NO_3^-) en los sistemas IMTA 1 e IMTA 2. Fuente: Elaboración propia.

El pH (Figura 7) se mantuvo cercano a la neutralidad en ambos sistemas. Los sólidos disueltos totales (Figura 8) y la conductividad eléctrica (Figura 9) presentaron comportamientos similares y sin variaciones significativas entre tratamientos.

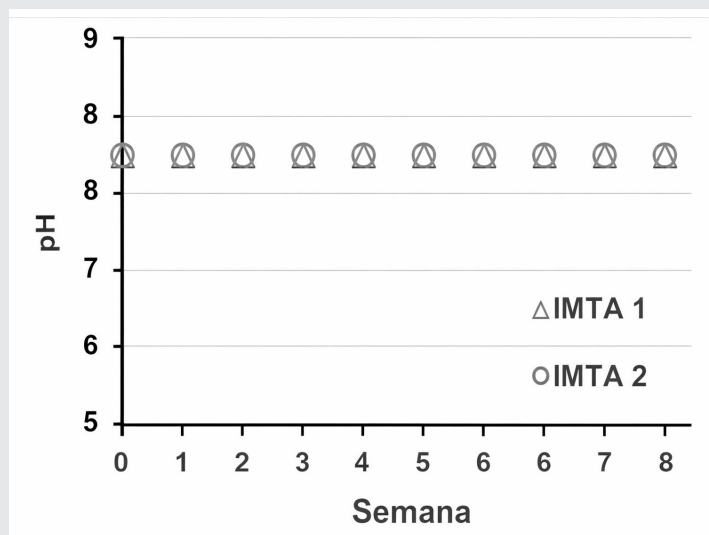


Figura 7. Comparación pH en los sistemas IMTA 1 e IMTA 2. Fuente: Elaboración propia.

Uso de agua

El sistema operó sin recambios totales de agua. Las reposiciones por evaporación y mantenimiento representaron aproximadamente el 9 % mensual del volumen total. El consumo hídrico estimado fue superior al 80 % menor en comparación con sistemas de recambio continuo.

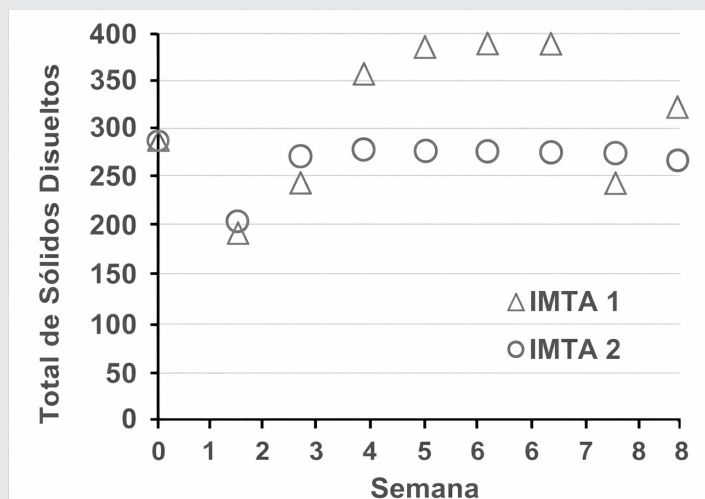


Figura 8. Comparación TDS (ppm) en los sistemas IMTA 1 e IMTA 2.

Fuente: Elaboración propia.

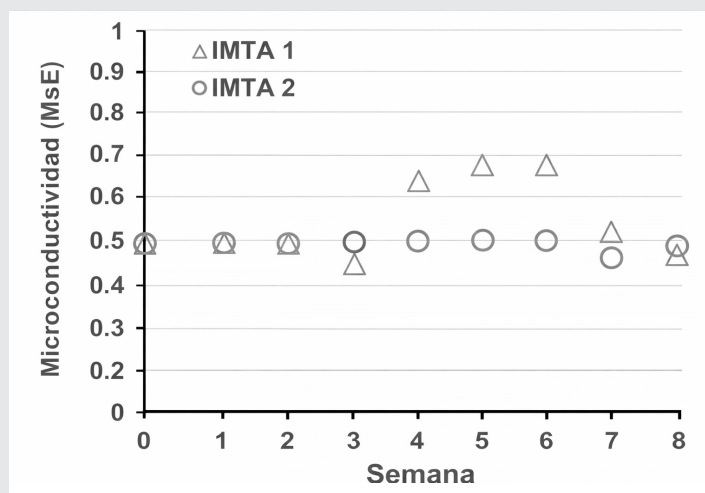


Figura 9. Comparación conductividad eléctrica ($\mu\text{s}/\text{cm}$) en los sistemas IMTA 1 e IMTA 2.

Fuente: Elaboración propia.

Costos de alimentación

El sistema IMTA-2 presentó una reducción del 38 % en el costo de alimentación respecto al IMTA-1. El IMTA-1 registró un costo 61 % mayor en alimentación en comparación con el sistema con sustitución parcial.

Discusión

Los resultados obtenidos muestran que la integración de *Oreochromis niloticus*, *Lymnaea stagnalis* y *Lemna minor* en un sistema multitrófico urbano permitió mantener estabilidad en los parámetros físico-químicos del agua, así como un crecimiento sostenido de los organismos cultivados. La similitud en las curvas de peso y talla entre IMTA-1 e IMTA-2 indica que la sustitución parcial del alimento comercial no comprometió el desempeño productivo del sistema bajo las condiciones evaluadas.

Desde la perspectiva del ciclo del nitrógeno, el comportamiento estable de amoníaco, nitritos y nitratos sugiere que la integración trófica favoreció el reciclaje interno de nutrientes, reduciendo acumulaciones que pudieran afectar la calidad del agua. Este comportamiento coincide con estudios previos sobre sistemas IMTA, donde la incorporación de organismos contribuye a amortiguar las cargas metabólicas y mejorar la eficiencia ecológica del sistema.

En términos económicos, la reducción del 38 % en el costo de alimentación observada en IMTA-2 representa un impacto directo en la estructura de costos del cultivo. Dado que el alimento balanceado constituye uno de los principales gastos en la producción acuícola, la disminución de la dependencia externa mediante biomasa generada internamente representa una mejora significativa en la estructura de costos, especialmente en contextos urbanos con acceso limitado a insumos a precios competitivos.

A diferencia de investigaciones enfocadas en sistemas semi-intensivos o de mayor escala, el presente estudio aporta evidencia experimental en un modelo urbano con escasa infraestructura. Este enfoque amplía la aplicabilidad práctica de los principios de economía circular en sistemas acuícolas pequeños, demostrando que la integración multitrófica puede implementarse sin comprometer estabilidad técnica ni productividad.

No obstante, el estudio se desarrolló bajo condiciones controladas y a una escala experimental limitada, por lo que futuras investigaciones podrían evaluar periodos productivos más prolongados, diferentes densidades de cultivo y análisis estadísticos comparativos más robustos para consolidar la generalización de los resultados.

CONCLUSIONES

El modelo de economía circular evaluado demostró viabilidad técnica y económica en un sistema multitrófico urbano de pequeña escala, manteniendo estabilidad fisicoquímica y crecimiento productivo comparable entre tratamientos.

La integración de *Oreochromis niloticus*, *Lymnaea stagnalis* y *Lemna minor* permitió reducir en un 38 % el costo de alimentación mediante la sustitución parcial del alimento comercial, sin afectar el desempeño productivo del cultivo. Este resultado evidencia que el aprovechamiento interno de biomasa puede disminuir la dependencia de insumos externos en sistemas urbanos con recursos limitados.

El principal aporte del estudio consiste en proporcionar evidencia experimental técnica y económica

sobre la aplicación de principios de economía circular en un sistema IMTA urbano de pequeña escala y baja infraestructura, ampliando su aplicabilidad práctica en contextos locales.

Como limitaciones, el estudio se desarrolló a escala experimental y en un periodo productivo acotado, sin incluir análisis estadísticos inferenciales ni evaluaciones a mayor densidad de cultivo. Por ello, se recomienda realizar estudios de mayor duración y escala para validar la reproducibilidad y el potencial de escalamiento del modelo.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece al TecNM por el proyecto aprobado en la Convocatoria 2025: Evaluación del efecto de *Saccharomyces cerevisiae* y *Bacillus amyloliquefaciens* sobre un sistema multitrófico de tilapia (*Oreochromis niloticus*), al equipo asesor y colaboradores por su acompañamiento en el desarrollo experimental y metodológico del proyecto.

BIBLIOGRAFÍA

[1] FAO, *The State of World Fisheries and Aquaculture 2020: Sustainability in Action*, Rome, Italy: FAO, 2020.

[2] T. Vera-Acevedo and E. Raullet, "Circular economy: A framework for sustainable development," *Journal of Cleaner Production*, vol. 330, pp. 129–138, 2022.

[3] Ellen MacArthur Foundation, *Towards the Circular Economy: Economic and Business Rationale for an Accelerated Transition*, Cowes, UK, 2013.

[4] M. Geissdoerfer, P. Savaget, N. M. P. Bocken, and E. J. Hultink, "The Circular Economy – A new sustainability paradigm?," *Journal of Cleaner Production*, vol. 143, pp. 757–768, 2017.

[5] T. Chopin et al., "Integrating seaweeds into marine aquaculture systems: A key toward sustainability," *Journal of Phycology*, vol. 37, no. 6, pp. 975–986, 2001.

[6] J. E. Rakocy, M. P. Masser, and T. M. Losordo, *Recirculating Aquaculture Systems: A Guide to Developing and Maintaining an Aquaponic System*, Stoneville, MS, USA: Southern Regional Aquaculture Center, 2006.

[7] S. Goddek and O. Körner, "A fully integrated model of multi-loop aquaponics for efficient system design," *Ecological Engineering*, vol. 138, pp. 8–20, 2019.

[8] F. Maucieri et al., "Aquaponics and sustainability: The comparison of conventional and integrated systems," *Aquaculture International*, vol. 26, pp. 213–227, 2018.



[9] R. L. Naylor et al., "A 20-year retrospective review of global aquaculture," *Nature*, vol. 591, pp. 551–563, 2021.

[10] M. Troell, A. Joyce, T. Chopin, A. Neori, A. H. Buschmann and J. G. Fang, "Ecological engineering in aquaculture – Potential for integrated multi-trophic aquaculture (IMTA) in land-based systems," *Aquaculture*, vol. 575, 739860, 2023.

[11] S. Goddek, O. Körner and B. Delaide, "Circularity and nutrient management in aquaponics and land-based RAS: A systems perspective," *Journal of Cleaner Production*, vol. 365, 132674, 2022.

[12] A. A. Badiola, D. Mendiola and J. Bostock, "Economic performance of recirculating aquaculture systems (RAS): A review of recent advances and small-scale applications," *Aquacultural Engineering*, vol. 96, 102214, 2022.





Multidisciplinario
e
ingenierías

Ingeniantes

Estrés térmico como riesgo laboral en MiPyMEs: estudio de caso en panaderías de Misantla, Veracruz



Colaboración

Yensy Fernández Pentón; Isis Itzel Lara Reyes, Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico Superior Misantla; Rodrigo Vivar Ocampo, Universidad Autónoma de Baja California; David Reyes González, Mario Pérez Acosta, Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico Superior Misantla

Fecha de recepción: 12 de diciembre de 2025
Fecha de aceptación: 18 de diciembre de 2025

RESUMEN: El estrés térmico es un riesgo emergente que afecta la salud, seguridad y productividad de los trabajadores. Este se genera cuando el cuerpo no es capaz de liberar el calor que recibe del exterior o el que genera el metabolismo, aumenta la temperatura corporal y surgen daños inmediatos a la salud como mareos, fatiga, dolor de cabeza, deshidratación, enfermedades crónicas (renales, cardiovasculares y metabólicas). El presente estudio tiene como objetivo evaluar el riesgo por estrés térmico en entornos laborales cerrados expuestos a alta temperatura en micro, pequeñas y medianas empresas (MiPyMEs), tomando como caso de estudio panaderías locales de la zona de Misantla, mediante un estudio de caso, considerando variables ambientales y referencias normativas nacionales e internacionales. La investigación se desarrolló en panaderías bajo condiciones reales de trabajo. Se identificaron condiciones críticas de exposición a altas temperaturas relacionados al uso de hornos y una deficiente ventilación.

PALABRAS CLAVE: estrés térmico, WBGT, panaderías artesanales, MiPyMEs y salud.

ABSTRACT: Heat stress is an emerging risk that affects workers' health, safety, and productivity. It occurs when the body is unable to release the heat it receives from the outside or that generated by metabolism, causing an increase in body temperature and immediate health problems such as dizziness, fatigue, headache, dehydration, and chronic diseases (renal, cardiovascular, and metabolic). The objective of this study is to evaluate the risk of heat stress in closed work environments exposed to high temperatures in micro, small, and medium-sized enterprises (MSMEs), using local bakeries in the Misantla area as a case study, considering environmental variables and national and international regulatory references. The research was conducted in bakeries under real working conditions. Critical conditions of exposure to high temperatures related to the use of ovens and poor ventilation were identified.

KEYWORDS: heat stress, artisanal bakeries, MiPyMEs and health.

INTRODUCCIÓN

El cambio climático ha exacerbado las cargas para la salud ocupacional en muchos sectores laborales, especialmente para aquellos caracterizados por la exposición continua a condiciones térmicas extremas [1, 2, 3, 4]. No solo este cambio ambiental influye en la temperatura media global, sino que también contribuye al aumento en la frecuencia,

intensidad y duración de las olas de calor que tienen implicaciones directas en el rendimiento y el bienestar de los trabajadores [5]. En este sentido, el estrés térmico ocupacional ha sido identificado como uno de los desafíos más graves [6, 7], especialmente en países con climas cálidos como México, donde gran parte de las actividades económicas se realizan en lugares de trabajo sin aire acondicionado y con infraestructura termo-reguladora limitada.

A pesar de la relevancia del tema, en la que la mayoría de las investigaciones se han enfocado al estudio del estrés térmico en espacios abiertos [8] por exposición durante tiempos prolongados, así como espacios cerrados de empresas de capacidades altas de producción, la evidencia científica sobre estrés térmico en micro, pequeñas y medianas empresas sigue siendo limitada, particularmente en contextos productivos artesanales [9]. Además, la implementación de evaluaciones del riesgo térmico en estos establecimientos se ve restringida por la falta de recursos y capacidad técnica. Según el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) [10], el 95.5 % de las unidades económicas en México son microempresas y más del 99 % de la estructura empresarial mexicana. Lo que evidencia la magnitud del sector y su vulnerabilidad frente a riesgos laborales.

En Misantla, Veracruz, las panaderías de micro, pequeñas y medianas empresas están expuestas a condiciones térmicas de calor constante (hornos), ventilación deficiente y falta de monitoreo ambiental. Estas condiciones aumentan el riesgo de estrés térmico laboral y posibles efectos en la salud de los trabajadores. Sin embargo, existe escasa evidencia local que documente esta problemática bajo condiciones reales de trabajo.

METODOLOGÍA

Con el propósito de evaluar de manera objetiva el riesgo por exposición a condiciones térmicas elevadas en establecimientos de producción artesanal, se diseñó una estrategia metodológica basada en mediciones ambientales (temperatura de globo y temperatura de bulbo húmedo) y fisiológicas (frecuencia cardíaca) en campo, alineada con los criterios establecidos en la NOM-015-STPS-2001 y considerando antecedentes de evaluación térmica en entornos de producción panadera [11]. La investigación se llevó a cabo en panaderías ubicadas en el municipio de Misantla, Veracruz, las cuales fueron seleccionadas bajo criterios técnicos y operativos que aseguren la representatividad de las condiciones reales de trabajo. La metodología combinó el control simultáneo de variables térmicas a distintos niveles corporales y el registro de indicadores fisiológicos durante la jornada laboral para evaluar integralmente el estrés térmico y compararlo con los límites máximos permisibles de exposición definidos en la normativa.

A partir de un levantamiento preliminar en el municipio de Misantla, Veracruz se identificaron 48 panaderías clasificadas como micro, pequeñas y medianas empresas (MiPyMEs). De este universo se seleccionaron 10 panaderías para la realización de las mediciones, considerando la disposición de los propietarios y la presencia de fuentes de calor durante la jornada laboral.

La evaluación del riesgo por estrés térmico se realizó considerando variables ambientales y fisiológicas mediante el Sistema de Medición de Estrés Térmico (SMET) el cual permitió realizar las mediciones en las tres posiciones que establece la NOM-015-STPS-2001 (región de tobillos, región abdominal y la región superior de la cabeza) de manera simultánea evitando imprecisiones en los resultados.

De manera complementaria se utilizó un brazalete biométrico para el registro de variables fisiológicas, específicamente frecuencia cardíaca y temperatura corporal, durante el desarrollo de las actividades laborales. La información ambiental y fisiológica obtenida se integró en una base de datos estructurada, lo que permitió un registro organizado, sistemático y comparable de las mediciones realizadas para su posterior análisis. Los resultados obtenidos fueron comparados con los límites permisibles establecidos en la NOM-015-STPS-2001, teniendo en cuenta la clasificación del trabajo como moderado y pesado, para la determinación del nivel de riesgo por estrés térmico.

Tabla 1. Límites máximos permisibles de exposición a condiciones térmicas elevadas.

| Temperatura máxima en °C de Itgbh Régimen de trabajo | | | Porcentaje del tiempo de exposición y no exposición |
|---|----------|--------|---|
| Ligero | Moderado | Pesado | |
| 30.0 | 26.7 | 25.0 | 100% de exposición |
| 30.6 | 27.8 | 29.9 | 75% de exposición 25% de exposición |
| 31.7 | 29.4 | 27.8 | 50% de exposición 50% de recuperación en cada hora |
| 32.8 | 31.1 | 30.0 | 25% de exposición 75% de recuperación en cada hora |

Fuente: Elaboración propia con base en la NOM-015-STPS-2001, Condiciones térmicas elevadas-Prevención y control en los centros de trabajo.

RESULTADOS

Se realizó un prediagnóstico en 10 panaderías, de las cuales el 70 % no cumplieron con los límites permisibles de Temperatura de Globo y Bulbo Húmedo (WBGT) establecidos en la NOM-015-STPS-2001 para trabajos clasificados como moderados (26.7 °C) y pesados (25.0 °C).

Durante el trabajo de campo se documentaron las áreas de amasado, así como el proceso de medición ambiental y fisiológica, mediante el uso del medidor de estrés térmico y el brazalete biométrico, como se muestra en la Figura 1.



Figura 1. documentación de las áreas de amasado, medición ambiental y fisiológica; mediante el uso del medidor de estrés térmico y el brazalete biométrico.

Fuente: Elaboración propia.

Los valores más elevados de WBGT se registraron en actividades clasificadas como pesadas, alcanzando hasta 27.8°C, lo que indica condiciones térmicas superiores a los límites normativos. La Tabla 2 presenta la evaluación del cumplimiento de los límites de WBGT or panadería y tipo de actividad.

Tabla 2. Evaluación del cumplimiento de los límites de WBGT para trabajo moderado pesado en las panaderías.

| Panadería (Pi) | Régimen de trabajo | WBGT medido (°C) | Límite NOM-015 (°C) | Cumple |
|----------------|--------------------|------------------|---------------------|--------|
| P1 | Moderado | 29.4 | 26.7 | No |
| P2 | Moderado | 30.1 | 26.7 | No |
| P3 | Moderado | 28.7 | 26.7 | No |
| P4 | Pesado | 27.8 | 25.0 | No |
| P5 | Pesado | 26.9 | 25.0 | No |
| P6 | Pesado | 27.3 | 25.0 | No |
| P7 | Moderado | 28.9 | 26.7 | No |
| P8 | Moderado | 26.2 | 26.7 | Sí |
| P9 | Pesado | 24.6 | 25.0 | Sí |
| P10 | Moderado | 26.4 | 26.7 | Sí |

Fuente: Elaboración propia.

CONCLUSIONES

El presente estudio permitió evaluar el riesgo por estrés térmico en panaderías pertenecientes a MiPyMEs

bajo condiciones reales de trabajo, mediante la medición del índice WBGT y su comparación con los límites establecidos en la NOM-015-STPS-2001.

Los resultados evidenciaron que el 70 % de las panaderías evaluadas no cumplen con los límites permisibles de exposición térmica, particularmente en actividades clasificadas como moderadas y pesadas, donde se registraron valores de hasta 27.8°C, superiores a los niveles normativos establecidos. Esto indica la presencia de condiciones térmicas riesgosas para la salud de los trabajadores.

La evaluación realizada confirma la necesidad de fortalecer la vigilancia y el control del riesgo térmico en MiPyMEs del sector panadero, especialmente en entornos con una ventilación limitada y exposición continua a una fuente de calor.

En respuesta a estos desafíos, este estudio se enfoca a un estudio preliminar para el desarrollo de un protocolo de apoyo a la toma de decisiones para el control del estrés térmico en entornos cerrados de trabajo en MiPyMEs dirigido a validar mejoras a normativas vigentes de evaluación de condiciones de trabajo en espacios con exposición a fuentes de calor y los efectos fisiológicos en los trabajadores, que impacte en sectores vulnerables para la protección de la salud humana, aumentando las condiciones de seguridad en el lugar de trabajo, mejorando la sostenibilidad de las operaciones en entornos de calor extremo.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a SECIHTI por su apoyo, al equipo de Ecobaldosas por sus facilidades para la realización de las mediciones, a los cuerpos académicos “Aprovechamiento Racional de Recursos Naturales y Procesos” y Análisis, Diseño y Control Automático de Sistemas Electromecánicos” por su acompañamiento y a COVEICYDET por el apoyo para la realización del MET.

BIBLIOGRAFÍA

[[1] Moreno Martín, G., & Inglés Torruella, J. (2023). Impacto en la salud laboral de la exposición al calor extremo: una revisión sistemática. *Revista Habanera de Ciencias Médicas*. <https://revhabanera.sld.cu/index.php/rhab/article/view/5328>.

[2] Moreno Martín, G., & Inglés Torruella, J. (2024). Cambio climático y estrés por calor en el entorno laboral: una llamada a la acción. *Revista Enfermería Investiga*, 9(2). <https://orcid.org/0000-0002-3335-787X>.

[3] Gámez Orea, M. (2023). El Real Decreto-Ley 4/2023 o la visibilidad normativa del estrés térmico laboral. *Revista de Derecho de la Seguridad Social, Laborum*, 36, 235-252. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=9133570>.

[4] Revueltas Agüero, M., Molina Esquivel, E., & Hernández Sánchez, M. (2023). Arch Med Camagüey, 27, e9073. <http://scielo.sld.cu/pdf/amc/v27/1025-0255-amc-27-e9073.pdf>.

[5] Chan, A. P., & Yi, W. (2016). Heat stress and its impacts on occupational health and performance. *Indoor and Built Environment*, 25(1), 3–5. <https://doi.org/10.1177/1420326X1562272>.

[6] Wang, J., Jiang, C., Yang, G., Bai, G., & Yu, S. (2023). Study on thermal health and its safety management mode for the working environment. *Frontiers in Public Health*, 11, 1227630. <https://doi.org/10.3389/fpubh.2023.1227630>.

[7] National Institute for Occupational Safety and Health (NIOSH). (2016). Criteria for a recommended standard: Occupational exposure to heat and hot environments. U.S. Department of Health and Human Services, Centers for Disease Control and Prevention <https://www.cdc.gov/niosh/docs/2016-106/pdfs/2016-106.pdf?id=10.26616/NIOSH-PUB2016106>.

[8] El Khayat, M., Halwani, D. A., Hneiny, L., Alameddine, I., Haidar, M. A., & Habib, R. R. (2022). Impacts of climate change and heat stress on farmworkers' health: A scoping review. *Frontiers in Public Health*, 10, 782811. <https://doi.org/10.3389/fpubh.2022.782811>.

[9] Legg, S. J., Olsen, K. B., Laird, I. S., & Hasle, P. (2015). Managing safety in small and medium enterprises. *Safety Science*, 71(Part C), 189–196. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2014.11.007>.

[10] Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2025). Estadísticas a propósito del Día de las MiPyMEs (27 de junio) (Comunicado de prensa núm. 71/25). INEGI. https://www.inegi.org.mx/contenidos/saladeprensa/aproposito/2025/EAP_MI-PYMES_25.pdf.

[11] Cújar, A., & Julio, G. (2019). Evaluación de las condiciones térmicas ambientales del área de producción en una panadería en Cereté (Córdoba). Argentina. Obtenido de <https://www.redalyc.org/journal/2654/265447025020/html/>.





Multidisciplinario
e
ingenierías

Ingeniantes

Fortalecimiento del papel de la mujer a través del análisis de la cadena de valor en la Sociedad Cooperativa “La Perla del Golfo” S.C.L.



Colaboración

Sharit Naomi Lara Hernández; Luis Manuel Siliceo Verónica; María Guadalupe Montes de Oca Sánchez; Alejandro Del Rey Torres Rodríguez, Puala Guadalupe Degado López, Tecnológico Nacional de México / ITS de Misantla

Fecha de recepción: 12 de diciembre de 2025

Fecha de aceptación: 18 de diciembre de 2025

RESUMEN: El objetivo de la presente investigación es determinar el rol de la mujer en la Sociedad Cooperativa “La Perla del Golfo” S.C.L. mediante el análisis de su cadena de valor. El estudio se sustenta en la necesidad de promover la equidad de género como motor de desarrollo económico en el estado de Veracruz. Utilizando la metodología de Ingeniería de Desarrollo, se evaluó la estructura interna y se contrastó con casos de éxito estatales para identificar puntos clave donde la participación femenina genera mayor impacto. Como resultado, se diseñó una propuesta de reingeniería enfocada en la “Gestión Paritaria” y el “Marketing Digital”, proyectando una reducción de mermas del 15 % y un incremento del 15 % al 20 % en ventas directas. Se concluye que integrar la perspectiva de género en la cadena de valor es una herramienta estratégica indispensable para elevar la competitividad de la organización.

PALABRAS CLAVE: Cooperativismo, Cadena de valor, Empoderamiento de la mujer, Equidad de género, Gestión Empresarial.

ABSTRACT: The objective of this research is to determine the role of women in the Sociedad Cooperativa “La Perla del Golfo” S.C.L. through Value chain analysis. The study is based on the need to promote gender equity as a driver of economic development in the state of Veracruz. Using the Development Engineering methodology, the internal structure was evaluated and contrasted with state success stories to identify key points where female participation generates the greatest impact. As a result, a reengineering proposal focused on “Parity Management” and “Digital Marketing” was designed, projecting a 15 % reduction in waste and a 15 % to 20 % increase in direct sales. It is concluded that integrating the gender perspective into the value chain is an indispensable strategic tool to increase the organization’s competitiveness.

KEYWORDS: Cooperativism, Value chain, Women’s empowerment, Gender equity, Business Management.

INTRODUCCIÓN

Las sociedades cooperativas desempeñan un papel fundamental en la economía local y el desarrollo sostenible de México. En el estado de Veracruz, el cooperativismo ha emergido como una herramienta vital para combatir la desigualdad económica. Sin embargo, a pesar de los avances legislativos, la participa-

ción sustantiva de las mujeres a menudo se ve limitada a roles operativos, enfrentando barreras estructurales para acceder a la toma de decisiones [1].

En el contexto veracruzano, existen precedentes que demuestran el potencial de la mujer cooperativista. Casos como la Cooperativa “Mujeres Experimentando” en el Puerto de Veracruz, o la Cooperativa de Mujeres Productoras de Café en Cosautlán, evidencian que el empoderamiento económico es viable cuando se combina con gestión estratégica [2]. No obstante, en la Sociedad Cooperativa “La Perla del Golfo” S.C.L., se detectó una problemática persistente: La pertinencia de abordar esta problemática desde un enfoque de género resulta evidente y justificable al observar la estructura de gobernanza de la Sociedad Cooperativa “La Perla del Golfo”, cuyo Consejo de Administración está conformado en su totalidad por varones. Esta exclusión en los órganos de toma de decisiones no solo limita la visión estratégica, sino que frena el potencial de diversificación productiva. Al marginar o invisibilizar la participación de las mujeres en el trabajo operativo, la cooperativa desaprovecha oportunidades clave para optimizar su cadena de valor; entre ellas, la identificación, diseño y comercialización de subproductos. Por ello, resulta indispensable analizar el proceso productivo para proponer la integración formal y estratégica de las mujeres en todos los niveles, capitalizando su capacidad para transformar materias primas secundarias en nuevas líneas de ingresos que fortalezcan la competitividad general de la organización.

Esta investigación plantea que dicha subutilización del capital humano femenino es una falla estratégica. El objetivo general es desarrollar una propuesta de mejora mediante el rediseño de la cadena de valor con perspectiva de género, bajo la hipótesis de que la inclusión estratégica incrementará la eficiencia organizacional [3].

Marco teórico y contextual

La Cadena de Valor Inclusiva Porter permite identificar fuentes de ventaja competitiva, pero tradicionalmente es “ciego al género”. Organismos como la FAO proponen el análisis de Cadenas de Valor Inclusivas, donde se analiza no solo el valor agregado, sino quién lo genera y quién se beneficia de él [4].

El Contexto Cooperativo en Veracruz El modelo de economía social en Veracruz ha permitido el surgimiento de redes de comercio justo. Estudios recientes indican que cuando las mujeres en zonas rurales de Veracruz se organizan, reinvierten hasta el 90 % de sus ingresos en sus comunidades [5]. “La Perla del Golfo” busca replicar estos modelos de éxito, transitando de una operación tradicional a un referente de inclusión.

Fundamentación Legal

La propuesta de integración estratégica de la mujer no es solo una iniciativa de buena voluntad, sino que encuentra sustento jurídico robusto en la legislación mexicana vigente. El rediseño de los estatutos de “La Perla del Golfo” se basa en los siguientes ordenamientos:

Ley General de Sociedades Cooperativas (LGSC): Artículo 11: Establece la libertad de asociación y retiro voluntario, pero enfatiza el principio de igualdad de derechos y obligaciones de los socios, sin distinción de género.

Ley de la Economía Social y Solidaria (LESS): En sus fines (Artículo 8), prioriza la promoción de la equidad de género y la inclusión productiva. Esto permite a la cooperativa acceder a fondos gubernamentales etiquetados para proyectos inclusivos si demuestra documentalmente (como se hace en este artículo) que trabaja bajo estos principios.

Norma Mexicana NMX-R-025-SCFI-2015:

Referente a la “Igualdad Laboral y No Discriminación”. Aunque la cooperativa es una sociedad de socios y no estrictamente de empleados, la adopción de los criterios de esta norma para la selección de personal en las nuevas áreas de Marketing y Calidad valida la calidad ética de la organización ante clientes internacionales.

MATERIAL Y MÉTODOS

Fundamentación Metodológica: Ingeniería de Desarrollo

Para el abordaje de esta problemática se seleccionó la metodología de Ingeniería de Desarrollo, un marco de trabajo sistémico que va más allá de la simple consultoría administrativa. A diferencia de los métodos tradicionales de reingeniería que buscan solo eficiencia financiera, la Ingeniería de Desarrollo integra variables sociales y humanas como ejes centrales del diseño organizacional.

El despliegue metodológico se ejecutó en cinco fases secuenciales, diseñadas para asegurar que la intervención fuera culturalmente aceptada por los socios de la cooperativa:

Fase I: Diagnóstico Participativo y Sensibilización (Meses 1-2)

El objetivo fue “abrir la caja negra” de la organización. No se limitó a revisar estados financieros; se aplicaron herramientas cualitativas profundas:

Entrevistas semiestructuradas: Se realizaron 15 entrevistas a profundidad con socios clave (fundadores, actuales directivos y mujeres de base).

Matriz de Roles y Tiempos: Se aplicó esta herramienta para cuantificar la “doble jornada” de las socias. Se descubrió que, en promedio, las mujeres de

la cooperativa dedican 6 horas a labores productivas y 5 horas a labores de cuidado no remunerado, un factor crítico que limita su disponibilidad para cargos directivos si no existen políticas de flexibilidad.

Fase II: Mapeo de la Cadena de Valor (Mes 3)

Se utilizó el modelo de Michael Porter adaptado a la Economía Social. Se documentó gráficamente el flujo de operaciones desde la adquisición de insumos hasta la post-venta. Cada eslabón se categorizó con una "Etiqueta de Género" (Masculino, Femenino o Mixto) dependiendo de quién ejecutaba la tarea y quién tomaba las decisiones sobre ella. Esto permitió visibilizar la segregación horizontal existente.

Fase III: Análisis de Brechas y Benchmarking (Mes 4)

Se contrastaron los hallazgos internos con las "Mejores Prácticas" de otras cooperativas exitosas en el estado de Veracruz (ver Discusión). Se utilizó un Árbol de Problemas para vincular las causas raíz (ej. falta de capacitación financiera) con los efectos indeseados (ej. ausencia de mujeres en el Consejo de Administración).

Tabla 1. Matriz de Transformación de Roles: Situación Actual vs. Propuesta.

| Área Funcional | Rol Actual de la Mujer (Diagnóstico) | Nivel de Decisión Actual | Nuevo Rol Propuesto (Estratégico) | Impacto Esperado |
|-------------------|---|-----------------------------------|---|---|
| Aprovisionamiento | Recepción básica de materiales y limpieza de almacén. | Bajo (Solo ejecuta instrucciones) | Gestora de Alianzas con Proveedores | Reducción de costos por negociación directa y volumen. |
| Operaciones | Empaquetado manual y etiquetado simple. | Nulo | Supervisora de Control de Calidad (Norma ISO) | Estandarización del producto y disminución de mermas del 15%. |
| Comercialización | Venta de mostrador (atención reactiva). | Bajo | Líder de Marketing Digital y E-commerce | Apertura de mercado nacional y eliminación de intermediarios. |
| Recursos Humanos | No existe formalmente (se asume como tarea administrativa menor). | Nulo | Coordinadora de Talento y Capacitación | Profesionalización de la plantilla y clima laboral equitativo. |
| Dirección | Vocal o secretaria de actas (sin voto real). | Medio-Bajo | Tesorera o Presidenta del Consejo | Transparencia financiera y visión social en la inversión de excedentes. |

Fuente: Elaboración propia basada en el diagnóstico organizacional.

Fase IV: Diseño Estratégico (La Propuesta)

En esta fase se aplicaron principios de Diseño Organizacional. Se redactaron los nuevos perfiles de puesto para las áreas propuestas (Marketing Digital y Control de Calidad) y se diseñó un cronograma de capacitación técnica de 120 horas, avalado por normativas de la Secretaría del Trabajo.

Tabla 2. Cronograma de Reingeniería Organizacional y Capacitación.

| FASE | ACTIVIDAD CLAVE | DURACIÓN | RESPONSABLE | ENTREGABLE (Evidencia) |
|---------------------------|---|-----------|---|--|
| I. Sensibilización | Talleres de "Nuevas Masculinidades" y "Liderazgo Femenino". | Mes 1-2 | Consultor Externo / Comité de Educación | Lista de asistencia y reporte de cambio de percepción. |
| II. Marco Legal | Asamblea Extraordinaria para reforma de estatutos (Cuotas de género). | Mes 3 | Consejo de Administración | Acta de Asamblea notariada con nuevos estatutos. |
| III. Capacitación Técnica | Curso intensivo: "Gestión de Calidad ISO" y "Marketing Digital para PyMES". | Mes 4-6 | Institución Académica Aliada (ITSM) | Certificados de competencia laboral de las socias. |
| IV. Reingeniería | Instalación física del área de Calidad y configuración de E-commerce. | Mes 7-8 | Gerencia General | Manuales de operación y plataforma web activa. |
| V. Lanzamiento | Campaña oficial de la marca "La Perla: Calidad Mujer". | Mes 9 | Equipo de Marketing (Mujeres) | Reporte de primeras ventas directas online. |
| VI. Evaluación | Auditoría de procesos y medición de clima organizacional. | Mes 10-12 | Consejo de Vigilancia | Informe de resultados comparativo (Antes vs. Después). |

Fuente: Elaboración propia con base en la metodología de Ingeniería de Desarrollo.

Discusión y análisis comparativo

La propuesta diseñada para "La Perla del Golfo" no es un experimento aislado, sino que dialoga con las tendencias exitosas observadas en el ecosistema de la Economía Social de Veracruz. Al analizar los resultados proyectados a la luz de la literatura existente, surgen tres puntos de discusión críticos:

La Profesionalización como Rompimiento del Techo de Cristal, el diagnóstico reveló que la principal barrera para las mujeres no era la falta de interés, sino la falta de pericia técnica percibida. Esto coincide con lo reportado por la OIT [8] sobre las cooperativas rurales en América Latina. Al comparar nuestro caso con la **Cooperativa "Mujeres Experimentando"** (Puerto de Veracruz), observamos una similitud crítica: el éxito de dicha organización pesquera no radicó solo en pescar, sino en que las socias aprendieron administración y gestión de permisos federales. Nuestra propuesta de capacitar a las mujeres de "La Perla" en **Gestión Financiera y Normatividad** emula ese factor de éxito, validando que el empoderamiento es, ante todo, un proceso educativo.

El Valor Agregado de la "Marca Mujer" Un hallazgo interesante de la investigación es el potencial comercial no explotado. Al observar a las **Cooperativas de Mujeres Productoras de Café en Cosautlán**, se valida la hipótesis de que la participación fe-

menina agrega valor tangible al producto final. Ellas lograron posicionar su café como “agroecológico y hecho por manos de mujeres”, diferenciándose en un mercado saturado y accediendo a precios premium. La estrategia de **Marketing Digital y Storytelling** que proponemos en este artículo busca replicar ese fenómeno: convertir la equidad de género en un sello de calidad y responsabilidad social que atraiga a consumidores conscientes, transformando un producto “commodity” en un producto con causa.

Resiliencia ante la Crisis, diversos autores [3], [5] señalan que las cooperativas mixtas con liderazgo paritario sobreviven mejor a las crisis económicas que las dirigidas exclusivamente por hombres. Esto se debe a que la gestión femenina tiende a ser más conservadora en el riesgo financiero y más orientada a la preservación del empleo a largo plazo. La reingeniería propuesta para “La Perla del Golfo”, al incluir a mujeres en el Consejo de Vigilancia, dota a la organización de un sistema de “pesos y contrapesos” más robusto, reduciendo la probabilidad de malos manejos administrativos que han llevado a la quiebra a otras sociedades en la región de Misantla.

RESULTADOS

El diagnóstico reveló que, aunque las mujeres representan el 40 % de la base social, ocupan menos del 10 % de los cargos directivos. Para revertir esto, se diseñó una nueva estructura operativa.

Rediseño de la Cadena de Valor, la Figura 1, ilustra la transformación propuesta, contrastando el modelo actual con el modelo inclusivo.



Figura 1. Comparativa de la Cadena de Valor: Situación Actual vs. Modelo Inclusivo.

Fuente: Elaboración propia basada en el análisis de campo.

Como se observa en la figura, la intervención se centra en dos áreas críticas:

Actividades de Soporte (Gestión Paritaria)

Se propone la profesionalización del área de Recursos Humanos mediante políticas de “Ascenso Ciego al Género” y programas de mentoría interna, emulando las mejores prácticas de cooperativas pesqueras del estado [7].

Actividades Primarias (Marketing y Calidad)

Se identificó que la mayor oportunidad de valor reside en el Marketing Digital. La propuesta asigna el liderazgo de esta nueva área a las socias, quienes gestionarán el desarrollo de una marca propia (“Storytelling”), eliminando intermediarios y capturando mayor valor del mercado, similar a la estrategia de las cafetaleras de Cosautlán [2].

CONCLUSIONES

El fortalecimiento del rol de la mujer en “La Perla del Golfo” trasciende la justicia social; es una estrategia de inteligencia de negocios.

1. Eficiencia Operativa: Al formalizar la participación femenina en el Control de Calidad, se estandarizan procesos y reducen mermas.

2. Competitividad Comercial: La incorporación de mujeres en el liderazgo del Marketing Digital abre canales de venta directa necesarios para la sostenibilidad económica. Al eliminar intermediarios en la cadena de valor, esta estrategia permite a la cooperativa capturar un margen de utilidad hasta un 20 % mayor, demostrando que la equidad se traduce en rentabilidad tangible.

3. El marco normativo de la Ley General de Sociedades Cooperativas: establece la base de la equidad; sus Artículos 11 y 64 garantizan la igualdad de condiciones y promueven el ingreso de las mujeres a la organización. Sin embargo, para capitalizar este mandato legal como una ventaja competitiva, es necesario adoptar directrices de instituciones como INMUJERES y ONU Mujeres, que recomiendan la integración activa de las mujeres en los Consejos de Administración y Vigilancia. Al elevar la participación femenina a los órganos de toma de decisiones, la cooperativa diversifica su visión del mercado y sus estrategias de comercialización. Como resultado directo, se incrementa la competitividad comercial, facilitando la innovación táctica, como el diseño de campañas de marketing digital y la apertura de canales de venta directa.

4. Alineación Global: La propuesta cumple con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS 5 y 8) y sigue las directrices de la OIT para el trabajo decente [8].

BIBLIOGRAFÍA

- [1] ONU Mujeres, “El progreso de las mujeres en el mundo 2023-2024,” Naciones Unidas, New York, 2023. [2] Animal Político, “Mujeres de

Veracruz siembran hortalizas, pero también su libertad,” *Animal Político*, 2020.

[3] Alianza Cooperativa Internacional, *Hacia la igualdad de género en el movimiento cooperativo*, ACI Américas, 2019.

[4] FAO, *Desarrollo de cadenas de valor sensibles al género: Directrices para profesionales*, Roma, 2022.

[5] Secretaría de Economía, *Sociedades Cooperativas en México: Marco legal y estadísticas*, Gobierno de México, 2023.

[6] INMUJERES, *Pautas para la igualdad en el ámbito laboral*, Gobierno de México, 2024.

[7] Diario de Xalapa, “Mujeres Experimentando, primera cooperativa en Veracruz por pescadoras independientes,” *Diario de Xalapa*, 2024.

[8] Organización Internacional del Trabajo, “Las cooperativas y el mundo del trabajo n.º 14,” OIT, Ginebra, 2022.

[9] Gammage, S., et al. (2016). “Gender and Value Chain Development.” *International Center for Research on Women (ICRW)*.

[10] O’Neil, S., et al. (2021). *Digital Literacy and Women’s Economic Empowerment*. USAID Research Paper.

[11] Duffy, B. E., & Pruchniewska, U. (2017). “The Digital ‘Girlboss’: Female Entrepreneurs and the Gendering of Creative Labour.” *New Media & Society*.

[12] Rojas, M., & Martínez, L. (2022). “Mujeres y Cooperativismo en el México Rural: Desafíos y Oportunidades.” *Estudios Sociales*.

[13] WIEGO (2024). *Organizing in the Informal Economy: Women’s Cooperatives and Collective Action*. WIEGO Resource Document.





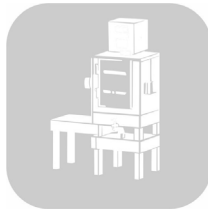
Multidisciplinario
e
ingenierías

Ingeniantes

RoboComposta: prototipo de compostera semi-automatizada para educación ambiental

RESUMEN: El incremento de los residuos orgánicos domésticos y su disposición inadecuada en rellenos sanitarios genera emisiones de gases de efecto invernadero, lixiviados contaminantes y saturación de vertederos. El compostaje surge como una alternativa sostenible para transformar estos residuos en abono, aunque su implementación doméstica presenta barreras de espacio, desconocimiento y ausencia de monitoreo de variables críticas. En este trabajo se presenta RoboComposta, un prototipo de compostera semi-automatizada orientado a la educación ambiental. El sistema se basa en un microcontrolador Arduino UNO, que integra sensores de temperatura y humedad, además de un sistema de aireación mediante ventilador y bomba peristáltica para ajuste de humedad. La arquitectura incluye indicadores visuales y una interfaz básica de retroalimentación para el usuario. El desarrollo corresponde a una validación preliminar de concepto, en la cual se verificó el funcionamiento del sistema electrónico, la lectura de sensores y la respuesta de los actuadores mediante pruebas de laboratorio. El prototipo constituye una plataforma base para el desarrollo de composteras educativas de bajo costo. Como trabajo futuro se plantea la validación experimental con residuos orgánicos reales y la evaluación de usabilidad con usuarios en contextos educativos.

PALABRAS CLAVE: Arduino, Compostaje doméstico, Educación ambiental, Prototipo, Sensor de humedad, Sensor de temperatura.



Colaboración

Diego Rafael Hernández Ruiz; Mariam Andrade San Martín; Noreni Casagnon Rodríguez; Alan Antonio Rico Barragán; Humberto Raymundo González Moreno, Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico Superior de Misantla

Fecha de recepción: 12 de diciembre de 2025

Fecha de aceptación: 18 de diciembre de 2025

ABSTRACT: The increase in domestic organic waste and its improper disposal in landfills generates greenhouse gas emissions, polluting leachates, and landfill saturation. Composting emerges as a sustainable alternative to transform this waste into fertilizer, although its domestic implementation presents barriers of space, lack of knowledge, and absence of monitoring of critical variables. This paper presents RoboComposta, a semi-automated composting prototype aimed at environmental education. The system is based on an Arduino UNO microcontroller, which integrates temperature and humidity sensors, as well as an aeration system using a fan and peristaltic pump for humidity adjustment. The architecture includes visual indicators and a basic feedback interface for the user. The development corresponds to a preliminary concept validation, in which the operation of the electronic system, sensor readings, and actuator response were verified through laboratory tests. The prototype constitutes a base platform for the development of low-cost educational composters. Future work includes experimental validation with real organic waste and usability evaluation with users in educational contexts.

KEYWORDS: Arduino, Home composting, Environmental education, Prototype, Humidity sensor, Temperature sensor.

INTRODUCCIÓN

La gestión inadecuada de los residuos orgánicos sigue siendo uno de los problemas ambientales más relevantes, pues su acumulación en vertederos incrementa la producción de lixiviados, emisiones de metano y pérdida de recursos que podrían reintegrarse a los sistemas productivos. Diversos estudios destacan que el compostaje constituye una estrategia eficaz y sostenible para reducir esta carga ambiental, ya que transforma los desechos biodegradables en productos útiles como abono orgánico [1]. Además, esta práctica ha demostrado ser una alternativa viable incluso en espacios limitados, siempre que se cuente con condiciones adecuadas de temperatura, humedad y oxigenación [2][3][4].

Más allá de los beneficios ecológicos, el compostaje tiene un valor educativo significativo. La participación de los niños en actividades ambientales fomenta la construcción de hábitos responsables y favorece la conciencia ecológica desde edades tempranas, especialmente cuando se trabaja mediante proyectos prácticos y experiencias directas con la naturaleza [5]. Adicionalmente, estudios han documentado que, a través de actividades guiadas, los niños pueden identificar materiales compostables y comprender el impacto del manejo adecuado de los recursos naturales [6].

En el caso de los adultos mayores, la literatura señala que este sector suele enfrentar barreras sistemáticas, falta de información y exclusión en temas ambientales, aunque en general muestran una actitud favorable hacia el cuidado del entorno [7]. Esta brecha evidencia la importancia de diseñar herramientas accesibles, intuitivas y adaptadas a sus capacidades, que faciliten su participación en actividades sostenibles.

Desde el ámbito del diseño tecnológico, el prototipado sostenible permite evaluar la relación entre funcionalidad, impacto ambiental y aprendizaje, asegurando coherencia entre la intención educativa y la solución creada [8]. Por su parte, la incorporación de metodologías de prototipado adaptadas a contextos con recursos limitados favorece el desarrollo de dispositivos accesibles, replicables y adecuados para distintas realidades [9]. Asimismo, el uso de modelos digitales desde las primeras etapas del diseño facilita visualizar el sistema, optimizar el espacio y prever la integración estructural y electrónica del prototipo [10].

La revisión bibliográfica que sustenta este proyecto se construyó a partir de una búsqueda encaminada a tres ejes temáticos, los cuales fueron, compostaje doméstico y sus variables críticas, educación ambiental enfocada en niños y adultos mayores, y diseño e integración de prototipos. Los documentos consultados provienen principalmente de repositorios institucionales, revistas de acceso abierto y plataformas especializadas en ingeniería y ciencias ambientales, tales como ScienceDirect, Helion, Sustainability, IntechOpen, Procedia CIRP, BMC Geriatrics, Development Engineering, así como tesis universitarias disponibles en repositorios. Esta variedad de fuentes permitió englobar diversas perspectivas. Una cantidad considerable de los artículos pertenece a investigaciones que se encuentran en bases de datos reconocidas y que abordan aspectos técnicos del compostaje, incluyendo la influencia de variables como la temperatura, humedad, aireación, entre otras. Otra parte relevante corresponde a literatura educativa y social, la cual explora la alfabetización ambiental infantil y las barreras cognitivas

o tecnológicas que enfrentan los adultos mayores al involucrarse en proyectos ambientales. Finalmente, el tercer grupo está constituido por estudios sobre prototipado, diseño ergonómico, integración electrónica y metodologías para desarrollar dispositivos accesibles en contextos de recursos limitados. Este fraccionamiento permitió comprender el problema desde un enfoque integral y no únicamente técnico. En recapitulación, la revisión bibliográfica se caracteriza por una combinación equilibrada de investigaciones recientes, estudios clásicos del compostaje, literatura sobre sostenibilidad educativa y trabajos sobre ingeniería de prototipos. Este enfoque híbrido fortalece la idea de RoboComposta, pues demuestra que la automatización de procesos, acompañada de una interfaz amigable y pedagógica, responde directamente a vacíos detectados en la literatura: falta de soluciones domésticas accesibles, ausencia de dispositivos diseñados específicamente para niños y adultos mayores, y escaso aprovechamiento del compostaje como herramienta formativa y comunitaria.

En este marco, RoboComposta surge como una propuesta que integra educación ambiental, accesibilidad y tecnología, mediante un prototipo de compostera inteligente que automatiza procesos como la medición de temperatura, humedad y aireación. El proyecto busca fomentar la participación activa en la gestión de residuos orgánicos, aprovechando un enfoque didáctico, interactivo y apoyado en principios de sostenibilidad y diseño ergonómico.

En los últimos años se han desarrollado diferentes sistemas de compostaje asistido mediante sensores y tecnologías de monitoreo. Algunos estudios integran sensores de temperatura, humedad y pH para supervisar el proceso de degradación orgánica, mientras que otros incorporan plataformas IoT para el seguimiento remoto de las condiciones del compostaje. Asimismo, existen composteras eléctricas y sistemas automatizados que incluyen ventilación, mezclado y control de humedad para mejorar la eficiencia del proceso. No obstante, gran parte de estas soluciones se orientan a aplicaciones industriales o domésticas de mayor costo, con menor énfasis en su utilización como herramienta educativa [11][12][13][14]. En este contexto, el desarrollo de prototipos de bajo costo que permitan introducir conceptos de economía circular y valorización de residuos en entornos educativos representa una oportunidad relevante para la formación ambiental.

MATERIAL Y MÉTODOS

El desarrollo del prototipo RoboComposta se realizó en el Instituto Tecnológico Superior de Misantla (Misantla, Veracruz, México), donde se efectuaron las actividades de diseño CAD, ensamble electrónico, pruebas de funcionamiento y calibración de senso-

res. Las actividades se llevaron a cabo en condiciones controladas, sin uso de material orgánico real.

El compostaje es un proceso biológico controlado donde los microorganismos descomponen y estabilizan materia orgánica bajo condiciones aeróbicas. Se eligió este método por su eficiencia y por la posibilidad de automatizar las variables críticas del proceso, las cuales a continuación se mencionan [15].

El sistema desarrollado regula tres variables esenciales:

- Temperatura
- Humedad
- Aireación

La literatura indica que estas son determinantes para la correcta descomposición, la actividad microbiana y la calidad del compost, aunque existe otras variables que también son de importancia como el Ph, la cual está siendo considerada para trabajos futuros [2][16].

El desarrollo del prototipo siguió los lineamientos de la ingeniería de prototipos, entendida como un proceso iterativo de diseño, construcción, verificación y validación, aunque es importante hacer mención que hasta el momento el prototipo se encuentra en la parte de verificación, teniendo pendiente la validación del mismo en entornos reales [17]. Este enfoque permitió adaptar el sistema a las características físicas, cognitivas y educativas pensando específicamente en el enfoque educativo ya que es el objetivo principal de este prototipo.

El proceso comenzó con la definición de los requerimientos del usuario, priorizando la facilidad de uso, la seguridad, la retroalimentación visual y auditiva, así como criterios de ergonomía y accesibilidad. Con base en estos lineamientos establecidos se elaboró el diagrama de flujo que se muestra en la Figura 1, el cual representara la lógica operacional del sistema completo desde que se cargan los residuos orgánicos hasta que se obtiene el abono, además de bocetos preliminares que sirvieron como guía para el posterior modelado tridimensional del prototipo en el software CAD.

El prototipo fue modelado en el software SolidWorks, generando una estructura tridimensional que incluyó:

- El contenedor de compostaje,
- La base para Arduino UNO,
- Alojamiento para LCD, botones e indicadores, una maceta.

El modelado permitió anticipar interferencias, optimizar dimensiones y verificar la ergonomía del sistema [10], respecto a la integración temprana de modelos digitales. Asimismo, el diseño consideró criterios de inclusión

y accesibilidad, criterio importante en el desarrollo de prototipos educativos [18].

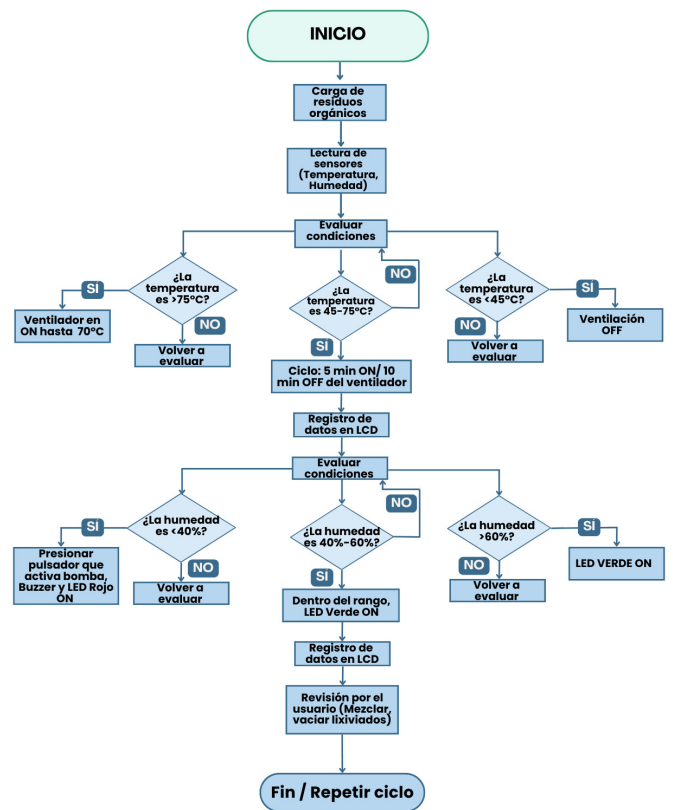


Figura 1. Diagrama de flujo de la lógica operacional del sistema.

Fuente: elaboración propia.

En la fase de integración electrónica se empleó un microcontrolador Arduino UNO como unidad central de control, un sensor de temperatura DS18B20 impermeable para medir la temperatura en el núcleo de la mezcla orgánica, y un sensor capacitivo de humedad V2.0 para estimar el contenido de agua en el sustrato. El sistema de actuación incluyó un ventilador de 12 V para aireación, una bomba peristáltica de 12 V para la adición de agua, focos LED rojo y verde como indicadores visuales, un pulsador de 22 mm para control manual y un módulo DFPlayer Mini con bocina de 3 W para reproducir mensajes de audio educativos.

La alimentación se realizó mediante una fuente de 12 Volts y 5 Amperes y un eliminador 127 Volts AC a 5 Volts DC para suministrar energía al Arduino y los componentes. Los actuadores de 12 V se controlaron a través de MOSFET canal N IRLZ44N con diodos flyback 1N4007 para protección. La pantalla LCD 16x2 con interfaz I2C se utilizó para mostrar en tiempo real los valores de temperatura y humedad registrados, cabe destacar que todo el conexionado está localizado en la cabeza de RoboComposta, como si fuera el cerebro del mismo.

Se elaboró una lista de materiales además de las tablas de conexión de cada componente del circuito, definiendo la asignación de pines analógicos y digitales que van a ser utilizados en el microcontrolador Arduino para cada sensor, actuador e interfaz. Y posterior a ello se construyó un diagrama de conexiones general, que sirvió como guía para el conexionado y verificación de la integridad eléctrica del sistema. En la Figura 2 se muestra el circuito antes de ser montado en el prototipo, realizándole pruebas en el protoboard.

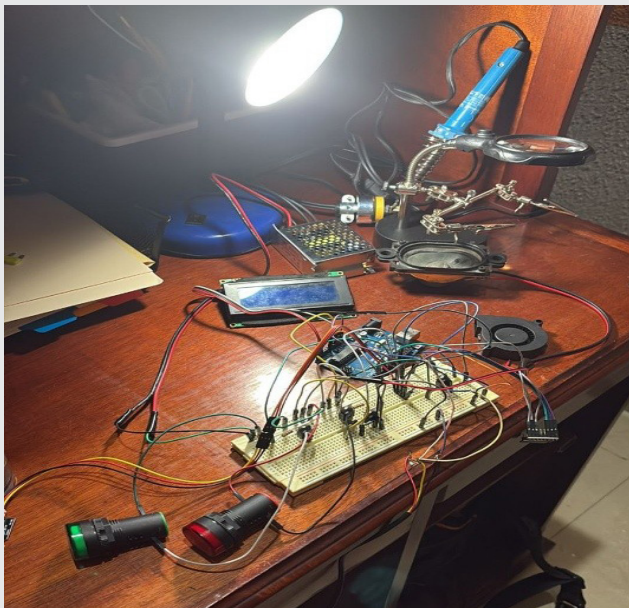


Figura 2. Elaboración del circuito.
Fuente: elaboración propia.

Posteriormente se realizó la calibración preliminar de los sensores. El DS18B20 se comparó con un pirómetro infrarrojo de referencia en tres rangos de temperatura aproximados: ambiente (~27 °C), templado (~48 °C) y caliente (~55 °C), en la Tabla 1 se pueden observar los resultados obtenidos.

Tabla 1. Comparación entre lecturas del sensor DS18B20 y un pirómetro en tres vasos con agua.

| Vaso | DS18B20 (°C) | Pirómetro (°C) | Diferencia (°C) |
|------|--------------|----------------|-----------------|
| 1 | 26.5 | 27.1 | ≈-0.6 |
| 2 | 49.1 | 48.4 | ≈+0.7 |
| 3 | 55.8 | 55.1 | ≈+0.7 |

Fuente: Elaboración propia.

Para el sensor de humedad capacitivo se emplearon tres niveles de tierra como sustrato (poco húmedo ≈25 %, medio ≈50 % y saturado ≈100 %), registrando el voltaje y el valor analógico a la salida para construir una curva de referencia valor análogo-humedad y definir umbrales de activación de la bomba, en la Tabla 2 se pueden observar los valores obtenidos. Es importante mencionar que esta calibración

se utilizó únicamente como aproximación preliminar para la interpretación de las lecturas del sensor dentro del prototipo, sin considerarse una validación metrológica del sistema en condiciones reales de compostaje.

Tabla 2. Registro inicial para la calibración del sensor capacitivo V2.0.

| Humedad (%) | Voltaje (V) | Lectura analógica |
|-------------|-------------|-------------------|
| 25 | 2.62 | 537 |
| 50 | 2.54 | 520 |
| 100 | 1.98 | 405 |

Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 3 podemos observar cómo se tomó la lectura de humedad con el sensor capacitivo v2.0.

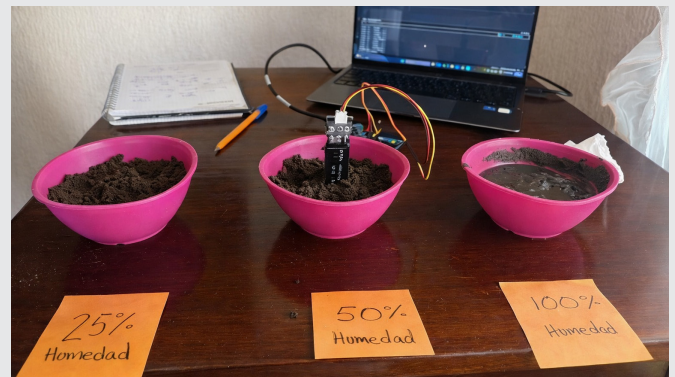


Figura 3. Registro de lectura de humedad con el sensor capacitivo V2.0.

Fuente: elaboración propia.

Finalmente, se implementó el código de control en la plataforma Arduino IDE, integrando la lectura periódica de sensores, comparación con rangos de referencia reportados en la literatura para procesos de compostaje (temperatura 55–65 °C y humedad 45–65 %), activación del ventilador y la bomba, encendido de indicadores LED y despliegue de información en la LCD, así como la reproducción de mensajes de alerta mediante el DFPlayer Mini y se procedió a montar todo en el prototipo.

Es importante señalar que, en esta etapa, no se realizaron pruebas con material orgánico real, por lo que el nivel de madurez tecnológica se considera TRL 3, enfocado a la validación experimental del concepto y del funcionamiento interno del prototipo.

Cabe mencionar que la metodología del proyecto no solo contempló la integración electrónica y el prototipo físico, sino también criterios de diseño orientados a facilitar su uso en contextos educativos. Por ello se

consideraron aspectos como accesibilidad, ergonomía y claridad visual de la interfaz, con el objetivo de desarrollar un dispositivo comprensible y seguro para usuarios no especializados. Asimismo, se tomaron en cuenta factores ambientales locales, como la disponibilidad de materiales, las condiciones de humedad y temperatura en interiores, y la posibilidad de utilizar la basura orgánica que comúnmente se genera en casa para futuras pruebas.

Por otro lado, el hecho de tomar en cuenta un enfoque de prototipado iterativo permitió corregir detalles estructurales y mejorar la distribución interna de la cámara de compostaje y los componentes externos antes de realizar lo que fue el ensamblaje final. Del mismo modo, la selección de sensores de bajo costo y módulos ampliamente documentados, tales como el sensor DS18B20 (temperatura) y el sensor capacitivo V2.0 (humedad), corresponde al objetivo con enfoque educativo de crear una herramienta que pueda ser replicada por estudiantes, docentes o comunidades con limitaciones económicas. Por consiguiente, la metodología se centró principalmente en la integración del sistema electrónico, el ensamblaje del prototipo y la verificación funcional del hardware y la lógica de control.

RESULTADOS

Diseño y modelado CAD

El modelado en SolidWorks permitió obtener una representación tridimensional del prototipo RoboComposta Kids & Senior, donde se definieron la geometría del contenedor de compostaje, la disposición del sistema de ventilación, el espacio para una maceta superior y las ubicaciones para Arduino, pantalla LCD, focos e interruptor. Las vistas explosionadas y planos derivados del modelo CAD facilitaron la fabricación y el montaje físico, reduciendo tiempos de ajuste y retrabajo. En la Figura 4 se muestra el resultado del diseño CAD.

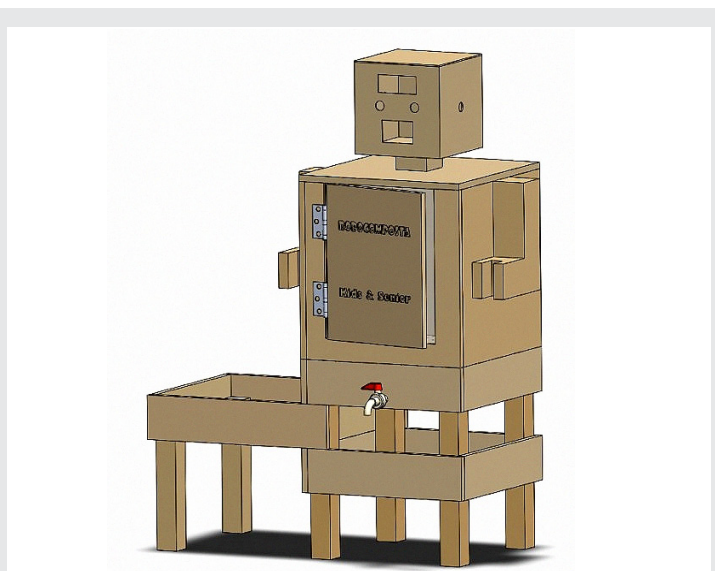


Figura 4. Diseño CAD elaborado en el software SolidWorks. Fuente: elaboración propia.

Ensamble físico y electrónico

Con base en el diseño CAD y los componentes eléctricos y electrónicos, se construyó el prototipo físico, el cual se muestra en la Figura 5, utilizando madera, un material común en la región para la estructura y componentes electrónicos de bajo costo. Se ensamblaron el sensor de temperatura, el sensor de humedad, ventilador, bomba peristáltica, indicadores luminosos, pulsador y módulo DFPlayer Mini. Durante las pruebas en laboratorio, sin presencia de residuos orgánicos, se verificó la lectura preliminar de los sensores y la respuesta a los cambios simulados en temperatura y humedad. El encendido y apagado del ventilador, la activación de la bomba de agua, el cambio de estado de los LED rojo y verde, y la reproducción de mensajes de audio se ejecutaron conforme a las condiciones programadas en el diagrama de flujo.



Figura 5. Prototipo de RoboComposta Kids & Senior. Fuente: elaboración propia.

Calibración de sensores

Para evaluar el funcionamiento básico de los sensores utilizados en el prototipo, se realizaron pruebas preliminares de verificación en laboratorio. En el caso del sensor de temperatura DS18B20, las lecturas obtenidas fueron comparadas con mediciones realizadas mediante un termómetro infrarrojo comercial en recipientes con agua a diferentes temperaturas. Las mediciones mostraron variaciones del orden de $\pm 0.7^\circ\text{C}$ entre ambos dispositivos, lo cual se consideró suficiente para

finés de monitoreo educativo dentro del rango típico de temperatura asociado a procesos de compostaje.

Para el sensor capacitivo de humedad del suelo V2.0 se realizaron pruebas exploratorias utilizando tierra como medio de referencia, observando la respuesta del sensor ante diferentes condiciones de humedad. Estas pruebas permitieron identificar rangos aproximados de lectura asociados a condiciones secas, intermedias y húmedas del sustrato, los cuales fueron utilizados como referencia para definir un umbral de activación del sistema de riego automático.

Es importante señalar que estas pruebas corresponden únicamente a una verificación preliminar del comportamiento de los sensores dentro del prototipo. No constituyen una calibración metrológica formal ni una validación exhaustiva para matrices heterogéneas como la composta. Una calibración más robusta requeriría experimentos con mayor número de puntos de medición y condiciones controladas, lo cual se plantea como trabajo futuro en etapas posteriores del desarrollo.

Validación de la lógica de control

El sistema lógico implementado en Arduino fue evaluado mediante pruebas de funcionamiento en laboratorio, simulando variaciones en las lecturas de los sensores de temperatura y humedad. Durante estas pruebas, la pantalla LCD mostró en tiempo real los valores registrados por los sensores, permitiendo observar el comportamiento del sistema.

Asimismo, se verificó la activación de los actuadores programados en el algoritmo de control. El ventilador, la bomba peristáltica, los indicadores LED y el sistema de audio cambiaron de estado de acuerdo con los umbrales de referencia definidos en el programa.

Las pruebas realizadas permitieron comprobar la comunicación entre sensores, microcontrolador y actuadores, así como la ejecución correcta de la secuencia de control implementada. Estos resultados confirman la integración funcional del sistema electrónico y del algoritmo de control dentro del prototipo antes de su evaluación con residuos orgánicos reales.

Es importante señalar que las pruebas realizadas corresponden a una validación preliminar del sistema electrónico y de control. No se realizaron experimentos con residuos orgánicos reales ni evaluaciones del proceso biológico de compostaje. Por lo tanto, los resultados presentados deben interpretarse como una verificación funcional del prototipo y no como una validación completa del desempeño del compostaje doméstico.

CONCLUSIONES

El desarrollo del prototipo RoboComposta permitió integrar un sistema de monitoreo y control básico para una compostera semi-automatizada orientada a fines

educativos. El proceso de diseño incluyó el modelado CAD de la estructura, la integración electrónica basada en un microcontrolador Arduino y la incorporación de sensores de temperatura y humedad junto con actuadores para ventilación y riego. Las pruebas realizadas en laboratorio permitieron verificar la comunicación entre sensores, microcontrolador y actuadores, así como el funcionamiento del algoritmo de control implementado. Estos resultados confirman la integración funcional del sistema electrónico y la viabilidad técnica del concepto propuesto.

No obstante, el trabajo presenta limitaciones propias de una validación preliminar de prototipo. En particular, no se realizaron experimentos con residuos orgánicos reales ni evaluaciones del proceso biológico de compostaje, por lo que no es posible aún demostrar el desempeño del sistema en condiciones domésticas reales. En consecuencia, el desarrollo actual corresponde a una validación inicial del concepto tecnológico, ubicada en un nivel de madurez tecnológica TRL 3. Como trabajo futuro se plantea la realización de experimentos con material orgánico real, así como la incorporación de sensores adicionales que permitan monitorear variables relevantes del proceso de compostaje, como el pH u otros indicadores biológicos, con el fin de avanzar hacia etapas posteriores de validación del sistema.

BIBLIOGRAFÍA

[1] Niekraś, L., Rombel-Bryzek, A., & Moliszewska, E. B. (2024). *Home Composting - Rules, Conditions, New Solutions. Chemistry-Didactics-Ecology-Metrology*, 29(1-2), 95-110. <https://doi.org/10.2478/cdem-2024-0007>.

[2] Smith, S. R., & Jasim, S. (2009). *Small-scale home composting of biodegradable household waste: overview of key results from a 3-year research programme in West London. Waste Management & Research: The Journal for a Sustainable Circular Economy*, 27(10), 941-950. <https://doi.org/10.1177/0734242X09103828>.

[3] Yang, Z., Muhayodin, F., Larsen, O. C., Miao, H., Xue, B., & Rotter, V. S. (2021). *A Review of Composting Process Models of Organic Solid Waste with a Focus on the Fates of C, N, P, and K. Processes*, 9(3), 473. <https://doi.org/10.3390/pr9030473>.

[4] Dharnaik, A. S., & Pol, P. (2024). *A Review on Composting of Organic Solid Waste. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1326(1), 012130. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1326/1/012130>.

[5] Maria Munoz Millet, O. (2023). *Composting in our Primary School. In Organic Fertilizers - New Advances and Applications [Working Tit-*

le]. *IntechOpen*. <https://doi.org/10.5772/intechopen.1001875>.

[6] Abdul Rahman, N., Mohd Yusop, N., & Awang, R. (2021). The effect of project on children attitude toward environmental balance. *Hungarian Educational Research Journal*, 11(4), 426–439. <https://doi.org/10.1556/063.2021.00021>.

[7] Wang, Y., Wu, Z., Duan, L., Liu, S., Chen, R., Sun, T., Wang, J., Zhou, J., Wang, H., & Huang, P. (2024). Digital exclusion and cognitive impairment in older people: findings from five longitudinal studies. *BMC Geriatrics*, 24(1), 406. <https://doi.org/10.1186/s12877-024-05026-w>.

[8] Soomro, S. A., Casakin, H., & Georgiev, G. v. (2021). Sustainable Design and Prototyping Using Digital Fabrication Tools for Education. *Sustainability*, 13(3), 1196. <https://doi.org/10.3390/su13031196>.

[9] Chou, S., & Austin-Breneman, J. (2018). Prototyping methods and constraints for small-to-medium sized enterprises in East Africa. *Development Engineering*, 3, 117–124. <https://doi.org/10.1016/j.deveng.2018.05.002>.

[10] Kim, D. Y. (2019). A Design Methodology Using Prototyping Based on the Digital-Physical Models in the Architectural Design Process. *Sustainability*, 11(16), 4416. <https://doi.org/10.3390/su11164416>.

[11] Elalami, M., Baskoun, Y., Zahra Beraich, F., Arouch, M., Taouzari, M., & Qanadli, S. D. (2019). Design and Test of the Smart Composter Controlled by Sensors. 2019 7th International Renewable and Sustainable Energy Conference (IRSEC), 1–6. <https://doi.org/10.1109/IRSEC48032.2019.9078197>.

[12] Hairol, Y. F. S. B. M. M., Mahmud, A., Jiziat, N. L. M., Aziz, A. A., & Yaacob, S. (2025). Energy-Efficient Smart Composting IoT System for Sustainable Food Waste Management. 2025 Multimedia University Engineering Conference (MECON), 1–6. <https://doi.org/10.1109/MECON67253.2025.11276898>.

[13] Kumaresan, M., Khanchana, K., & Anbarasu, M. (2024). A Review on Organic Composting Technology by using Different Microorganisms. *Ecology, Environment and Conservation*, 30(Suppl), S503–S512. <https://doi.org/10.53550/EEC.2024.v30i04s.082>.

[14] Manea, E. E., Bumbac, C., Dinu, L. R., Bumbac, M., & Nicolescu, C. M. (2024). Composting

as a Sustainable Solution for Organic Solid Waste Management: Current Practices and Potential Improvements. *Sustainability*, 16(15), 6329. <https://doi.org/10.3390/su16156329>.

[15] Vigneswaran, S., Kandasamy, J., & Johir, M. A. H. (2016). Sustainable Operation of Composting in Solid Waste Management. *Procedia Environmental Sciences*, 35, 408–415. <https://doi.org/10.1016/j.proenv.2016.07.022>.

[16] Escamilla-García, P., Ángeles Tovar, L. C., Perez Soto, F., & Rivera, G. (2024). Los Residuos Sólidos Urbanos, afectaciones ambientales y sociales: Una revisión crítica. *M+A Revista Electrónica de Medioambiente*, 25, 29–51.

[17] Elverum, C. W., Welo, T., & Tronvoll, S. (2016). Prototyping in New Product Development: Strategy Considerations. *Procedia CIRP*, 50, 117–122. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.05.010>.

[18] Török, J., & Duplákóvá, D. (2025). Integrated Practical Framework for Multidisciplinary Prototype Design and Manufacturing Process. *Processes*, 13(2), 454. <https://doi.org/10.3390/pr13020454>.





Multidisciplinario
e
ingenierías

Ingeniantes

Sistema automatizado de tamiz perforado basculante para el pretratamiento de aguas residuales cárnicas basado en diseño conceptual y caracterización hidráulica

RESUMEN: El manejo ineficiente de los residuos sólidos generados por la industria cárnica provoca obstrucciones y sobrecargas en las unidades de tratamiento de aguas residuales, lo que disminuye su eficiencia, incrementa los costos operativos y compromete la sostenibilidad del sistema. Ante esta problemática, se propone el diseño conceptual y dimensionamiento técnico de un sistema automatizado basado en un tamiz perforado basculante para la retención temprana de sólidos durante el pretratamiento.

Se realizó una caracterización hidráulica del efluente, obteniendo un volumen total de 12.0 m^3 en un periodo de 4 horas, un caudal promedio de 0.833 L/s , una masa de sólidos retenidos de 30.50 kg y un factor de punta de 2.67, lo que evidencia un régimen de descarga altamente intermitente. Con base en estos datos, se desarrolló un sistema automatizado que integra un sensor óptico de distancia tipo ToF, una válvula motorizada y un motor a pasos para la ejecución del ciclo de limpieza.

Adicionalmente, se realizó un análisis preliminar de diseño mecánico que permite estimar las condiciones de operación bajo carga máxima, estableciendo criterios para la selección de componentes y la viabilidad técnica del sistema. El sistema propuesto busca reducir la acumulación de sólidos gruesos, facilitar el mantenimiento y mejorar el desempeño hidráulico del pretratamiento.

Este trabajo constituye una base para el desarrollo e implementación de sistemas automatizados de bajo costo en mataderos de pequeña escala, proponiendo como trabajo futuro la validación experimental del prototipo en condiciones reales de operación.

PALABRAS CLAVE: Automatización, Pretratamiento, Industria cárnica, humedales construidos.



Colaboración

Diego Armando Bravo Foglia; Obed Oropeza Morales; Víctor Eliasib Pérez Méndez; Humberto Raymundo González Moreno; Jesús Castellanos Rivera, Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico Superior de Misantla

Fecha de recepción: 12 de diciembre de 2025

Fecha de aceptación: 18 de diciembre de 2025

ABSTRACT: The inefficient management of solid waste generated by the meat industry causes blockages and overloads in wastewater treatment units, reducing their efficiency, increasing operational costs, and compromising system sustainability. To address this issue, the conceptual design and technical sizing of an automated system based on a tilting perforated screen for early solids removal during pretreatment is proposed.

A hydraulic characterization of the effluent was conducted, obtaining a total volume of 12.0 m^3 over a 4-hour period, an average flow rate of 0.833 L/s , a retained solids mass of 30.50 kg , and a peak factor of 2.67, indicating a highly intermittent discharge regime. Based on these results, an automated system was developed integrating a time-of-flight (ToF) optical distance sensor, a motorized valve, and a stepper motor to perform the cleaning cycle.

Additionally, a preliminary mechanical design analysis was carried out to estimate operating conditions under maximum load, establishing criteria for component selection and supporting the technical feasibility of the system. The proposed system aims to reduce coarse solids accumulation, facilitate maintenance, and improve the hydraulic performance of the pretreatment stage.

This work provides a basis for the development and implementation of low-cost automated systems for small-scale slaughterhouses, proposing experimental validation of the prototype under real operating conditions as future work.

KEYWORDS: Automation, Pretreatment, Meat Industry, Constructed wetlands.

INTRODUCCIÓN

El tratamiento de aguas residuales en mataderos representa un reto ambiental significativo debido a su elevada carga de materia orgánica, grasas y sólidos gruesos, los cuales reducen la eficiencia de los sistemas de depuración y aceleran la colmatación de humedales construidos [1][2][3]. Como se observa en la Figura 1, la rejilla de desbaste del matadero municipal presenta colmatación severa por sólidos orgánicos, lo que evidencia la necesidad de implementar un sistema de limpieza más eficiente.



Figura 1. Estado actual de la rejilla de desbaste del matadero municipal, donde se observa colmatación severa por sólidos orgánicos.

Fuente: Elaboración propia.

Además, el cumplimiento de normativas como la NOM-001-SEMARNAT-2021 exige implementar procesos de pretratamiento más eficaces para prevenir obstrucciones, proteger las unidades posteriores y garantizar la calidad del efluente descargado [4][5].

El desbaste mediante tamices perforados constituye la primera barrera de protección en el tratamiento de aguas residuales, especialmente en mataderos donde una parte importante de los sólidos no ingresa únicamente por arrastre hidráulico, sino que es arrojada o cae directamente desde la parte superior del canal durante las actividades de sacrificio [7]. Esta deposición vertical provoca acumulaciones rápidas que, sin una limpieza frecuente, generan obstrucciones y sobrecargas en las unidades posteriores, acelerando la colmatación de los humedales construidos [3][6][7]. La automatización del proceso de desbaste permite mantener una limpieza continua, mejorar la eficiencia hidráulica del pretratamiento y prolongar la vida útil del sistema, además de reducir la intervención operativa y el mantenimiento asociado [8][9].

En el ámbito local, el matadero municipal de Misantla, Veracruz, presenta una elevada generación de sólidos orgánicos por caída directa durante las faenas de sacrificio, lo que favorece la colmatación temprana de las unidades de desbaste y compromete el desempeño hidráulico del sistema de tratamiento.

Este trabajo parte de la hipótesis de que un sistema de desbaste automatizado, equipado con microcontroladores Arduino y un mecanismo de accionamiento basculante, reduce la carga de sólidos gruesos que normalmente acelera la colmatación del humedal construido [3].

Objetivo general: diseñar un sistema automatizado basado en un tamiz perforado basculante para el pretratamiento de aguas residuales en un matadero.

Objetivos específicos: caracterizar el efluente generado; analizar tecnologías de desbaste aplicables a caudales pequeños y medianos; seleccionar la alternativa más eficiente para la remoción de sólidos gruesos caídos por gravedad; diseñar el mecanismo automatizado basado en un tamiz perforado basculante con control mediante sensores.

A pesar de la existencia de tecnologías de desbaste mecánico, la mayoría de los sistemas automatizados disponibles están diseñados para plantas de gran escala y presentan altos costos de implementación. Existe un vacío en el desarrollo de soluciones automatizadas de bajo costo adaptadas a mataderos municipales, donde la descarga de sólidos ocurre predominantemente por caída vertical y en régimen intermitente.

En este contexto, surge la siguiente pregunta de investigación:

¿Es posible diseñar un sistema de desbaste automatizado, basado en un tamiz perforado basculante, capaz de operar bajo condiciones de descarga intermitente y alta carga de sólidos en mataderos de pequeña escala?

MATERIAL Y MÉTODOS

El estudio se desarrolló en las instalaciones del matadero municipal de Misantla, Veracruz (México), donde actualmente opera un sistema de tratamiento de aguas residuales compuesto por rejillas de desbaste, sedimentadores y un humedal construido. Las actividades de campo y la toma de datos se realizaron durante el segundo semestre de 2025, considerando dos jornadas representativas de operación.

El material analizado correspondió al efluente generado durante las faenas de sacrificio bovino y porcino. Se registraron los caudales horarios, el volumen total de agua utilizada, el número de animales procesados y el volumen de sólidos gruesos retenidos en las rejillas del sistema de desbaste existente. La población de estudio se definió como el conjunto de descargas generadas por las operaciones del matadero, mientras que la muestra estuvo integrada por dos jornadas de muestreo representativas, denominadas A y B.

Las actividades realizadas durante la apertura de la caja de registro y la toma de datos pueden observarse en la Figura 2.



Figura 2. Actividades de campo durante la apertura de la caja de registro para inspección y toma de datos.

Fuente: Elaboración propia.

Se adoptó un enfoque cuantitativo, descriptivo y no experimental, fundamentado en observación directa, mediciones hidráulicas y un análisis comparativo de tecnologías de pretratamiento reportadas en la literatura [1] [2]. El procedimiento general comprendió las siguientes fases:

Investigación documental y revisión del estado del arte

Se realizó una revisión bibliográfica sobre tecnologías de prefiltrado para la protección de humedales construidos y sistemas de tratamiento secundarios. El objetivo fue identificar los rangos típicos de luz de paso, materiales de fabricación, esquemas de operación (manual vs. mecánico) y su impacto en la colmatación del medio filtrante [6][7][12][13][14].

En particular, se analizaron las siguientes tecnologías:
 Rejillas de barras (desbaste grueso): se utilizan como primera barrera para retener sólidos grandes (hojas, plásticos, restos orgánicos). Se recomiendan luces de paso entre 10 y 30 mm, con valores de 15–25 mm cuando el objetivo es proteger humedales de flujo sub-superficial y minimizar la colmatación [12][15][16]. La inclinación típica se sitúa entre 60 y 75° para facilitar la limpieza [6].

Cestas perforadas o mallas fijas: fabricadas en acero perforado o polímeros de alta densidad, con orificios de 5–15 mm. Suelen emplearse como segunda barrera extraíble para concentrar los sólidos retirados de la rejilla [12].

Tamices estáticos de cuña (wedgewire): presentan ranuras finas (0.5–2 mm) y un comportamiento autolimpiante. Ofrecen alta eficiencia y resistencia mecánica, aunque a un costo mayor [17][16].

Tamices rotativos mecánicos: permiten aperturas incluso menores a 1 mm, con operación continua y limpieza automática. Suelen reservarse para caudales elevados o instalaciones con alto nivel de automatización debido a su costo e infraestructura asociada [18][12][19].

También se revisaron comparaciones entre sistemas de limpieza manuales y mecánicos.

Los primeros son de bajo costo, pero dependen fuertemente de la disciplina operativa; en cambio, los segundos aseguran una remoción continua de sólidos a cambio de mayor inversión y mantenimiento especializado [19][11][18].

En humedales construidos, un pretratamiento adecuado reduce la colmatación, prolonga la vida útil del lecho y mantiene la capacidad hidráulica del sistema [12][14][3].

Caracterización del efluente

Las mediciones de caudal se efectuaron mediante un recipiente volumétrico calibrado y un cronómetro digital, determinando la tasa promedio de flujo (Q) conforme a la relación:

$$Q = \frac{V}{\Delta t} \quad \text{Ec. (1)}$$

donde V representa el volumen (m^3) y Δt el tiempo de llenado (s).

La toma manual de los sólidos gruesos retenidos durante este proceso de muestra en la Figura 3.



Figura 3. Toma manual de sólidos gruesos en la caja de registro durante la caracterización hidráulica.

Fuente: Elaboración propia.

La masa de sólidos retenidos (M_s) se estimó a partir del volumen de screenings (V_s) y la densidad aparente (ρ_s), considerando que la mayor parte de los sólidos se deposita desde arriba por caída directa durante las actividades de sacrificio, y no exclusiva-

mente por arrastre del flujo, según:

$$M_s = \rho_s V_s \quad \text{Ec. (2)}$$

Las mediciones se realizaron utilizando unidades del Sistema Internacional (SI).

El principal factor analizado fue la variación del caudal de descarga y del volumen de sólidos gruesos en función de la cantidad de animales sacrificados. El estudio comprendió dos jornadas operativas completas (Jornada A y Jornada B); sin embargo, únicamente se emplearon los datos de la Jornada A, pues la Jornada B fue proporcionada por el propietario del sitio y no contó con registro de tiempo medido, por lo que no permitió calcular caudales ni tasas comparables.

Aunque el muestreo consideró dos jornadas operativas (A y B), únicamente los datos de la Jornada A fueron empleados para el análisis hidráulico y el diseño del sistema automatizado. La Jornada B fue proporcionada por el responsable del sitio sin registro confiable de tiempos de descarga, lo que impidió el cálculo de caudales, tasas de generación de sólidos y factores de punta comparables. Por esta razón, dichos datos no fueron considerados representativos desde el punto de vista hidráulico y se excluyeron del análisis cuantitativo, constituyendo una limitación metodológica del presente estudio.

Selección tecnológica y criterios de automatización

La matriz de decisión mostró que, aunque la rejilla de barras presenta bajo costo de inversión, su operación manual y la tendencia a saturarse por la caída vertical de sólidos la vuelven poco adecuada para mataderos. El tamiz perforado basculante obtuvo el puntaje ponderado más alto debido a su mayor área efectiva de paso, su menor susceptibilidad al taponamiento y su capacidad de limpieza por gravedad mediante un giro controlado. Además, esta tecnología permite integrar sensores, una válvula motorizada y un motor a pasos a bajo costo, lo que la convierte en la opción óptima para el sitio estudiado.

Junto a la evaluación mecánica y económica, se analizó la compatibilidad de cada alternativa con la incorporación de sistemas de detección automática. En este sentido, el tamiz perforado basculante es el único que permite instalar sensores ópticos de distancia tipo tiempo de vuelo (ToF) fuera del contacto directo con el agua y los sólidos. Estos sensores emiten pulsos de luz infrarroja y miden el tiempo que tarda en regresar al detector, lo que permite calcular la distancia libre dentro del colador perforado con alta precisión.

Cuando la acumulación de screenings reduce la distancia medida por debajo de un umbral crítico, de-

terminando mediante la caracterización hidráulica, el ToF envía una señal al microcontrolador indicando saturación. Esto permite activar el ciclo automático de cierre de la válvula mariposa, giro del tamiz y vaciado del sólido retenido, restableciendo después la operación normal sin supervisión constante.

La Tabla 1 presenta la matriz de decisión cualitativa con escala de 1 a 5 (1 = desempeño muy bajo, 5 = desempeño muy alto). Las ponderaciones se normalizaron para que su suma total fuera igual a 1.0.

Tabla 1. Matriz de decisión cualitativa (escala 1-5) para la selección del tamiz perforado basculante como tecnología de desbaste.

| Criterio | Peso | Rejilla barras | Tamiz perforado basculante | Tamiz estático | Tamiz rotativo |
|------------------------------|------|----------------|----------------------------|----------------|----------------|
| Eficiencia sólidos gruesos | 0.25 | 4 | 5 | 5 | 5 |
| Operación y mantenimiento | 0.25 | 3 | 4 | 3 | 3 |
| Costo de inversión | 0.20 | 5 | 4 | 3 | 2 |
| Compatibilidad con humedales | 0.15 | 4 | 5 | 5 | 4 |
| Automatización futura | 0.15 | 3 | 5 | 2 | 4 |
| Puntaje ponderado | | 3.8 | 4.6 | 3.7 | 3.6 |

Fuente: Elaboración propia.

La ponderación asignada a cada criterio responde a consideraciones de ingeniería asociadas a la problemática específica del sitio. Se otorgó un mayor peso a la eficiencia en la remoción de sólidos gruesos (0.25) debido a que la principal causa de falla del sistema actual es la colmatación acelerada por deposición vertical de residuos orgánicos, lo cual compromete directamente la operación del sedimentador y del humedal construido. En contraste, aunque el costo de inversión es un factor relevante (0.20), su peso se consideró secundario frente a la necesidad de garantizar la continuidad hidráulica y la protección de las unidades posteriores, priorizando así la funcionalidad y confiabilidad del pretratamiento sobre la inversión inicial.

La Figura 4 muestra la comparación global de las alternativas de acuerdo con su puntaje ponderado.

Dimensionamiento mecánico del sistema

Con el fin de estimar las condiciones operativas del sistema, se realizó un análisis preliminar del torque requerido para el giro del tamiz bajo condiciones de carga máxima.

Se consideró una masa de sólidos retenidos de aproximadamente 30.5 kg, asumiendo un radio

efectivo de giro de 0.20 m, el momento generado por la carga se estimó como:

$$T = m \cdot g \cdot r \quad \text{Ec. (3)}$$

donde:

$$m = 30.5 \text{ kg}$$

$$g = 9.81 \text{ m/s}^2$$

$$r = 0.20 \text{ m}$$

Por lo tanto:

$$T \approx 30.5 \times 9.81 \times 0.20 \approx 59.8 \text{ N}\cdot\text{m}$$

Este valor representa el torque mínimo requerido para iniciar el movimiento del sistema en condiciones críticas.

Para complementar el análisis, se estimó la potencia mecánica necesaria considerando una velocidad de operación baja del tamiz, adecuada para procesos de separación de sólidos, de aproximadamente:

$$N=30 \text{ rpm}$$

Valor adoptado como velocidad de operación lenta para evitar salpicaduras, reducir esfuerzos dinámicos y favorecer una descarga controlada de los sólidos.

La velocidad angular correspondiente se calcula como:

$$\omega = (2\pi N)/60 \quad \text{Ec. (4)}$$

$$\omega = 3.14 \text{ rad/s}$$

La potencia mecánica teórica se determina mediante:

$$P = T \cdot \omega \quad \text{Ec. (5)}$$

$$P \approx 59.8 \times 3.14 \approx 187.7 \text{ W}$$

Considerando pérdidas mecánicas en el sistema (fricción en ejes, transmisión y condiciones reales de operación), se adopta una eficiencia global estimada del 80 %, por lo que la potencia real requerida se calcula como:

$$P_{real} = P/\eta \quad \text{Ec. (6)}$$

$$P_{real} \approx 187.7/0.8 \approx 234.6 \text{ W}$$

Bajo estas condiciones, se recomienda la selección de un motor con potencia mínima de 250 W y capacidad de torque superior a 70 N·m, incorporando un factor de seguridad que contemple variaciones en la carga, acumulación de sólidos y posibles condiciones de operación no ideales.

Con base en la potencia requerida estimada, se propone la selección de un motor eléctrico comercial con una potencia nominal superior a 0.25 kW ($\approx 1/3$ HP), garantizando un margen de seguridad adecuado para condiciones reales de operación y posibles sobrecargas del sistema.

Estos cálculos representan una estimación teórica inicial, por lo que su validación experimental forma parte del trabajo futuro para corroborar el desempeño real del sistema.

Diseño de ingeniería del sistema automatizado

El sistema propuesto se basa en un recipiente perforado tipo colador, fabricado en acero galvanizado y diseñado para recibir directamente el flujo que cae por gravedad desde la tubería de ingreso.

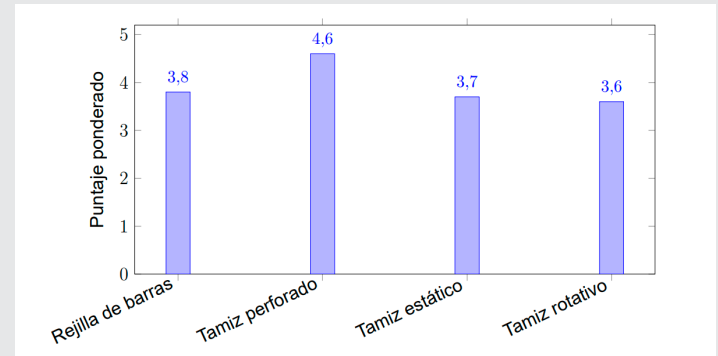


Figura 4. Puntaje ponderado de las alternativas de desbaste según la matriz multicriterio

.Fuente: Elaboración propia.

Las perforaciones circulares distribuidas en toda la superficie del tamiz permiten el paso del agua mientras los sólidos gruesos quedan retenidos temporalmente. Este tipo de geometría perforada presenta menor riesgo de taponamiento que las rejillas de barras tradicionales, las cuales tienden a obstruirse con restos fibrosos y grasas cuando la deposición de sólidos ocurre verticalmente, como sucede en mataderos durante las faenas de sacrificio [6][7][12][14]. Asimismo, la forma semiesférica del recipiente proporciona un área hidráulica efectiva mayor, disminuyendo la pérdida de carga y retrasando el punto de saturación que compromete la continuidad del flujo.

En operación normal, el tamiz permanece en reposo, permitiendo que el agua atraviese las perforaciones mientras los screenings se van acumulando. Con el fin de identificar el momento en que la carga sólida alcanza un nivel crítico, se integra un sensor óptico de distancia tipo tiempo de vuelo (ToF). Este sensor, instalado en la parte superior del tanque, emite pulsos de luz infrarroja y mide el tiempo de retorno del haz, determinando así la distancia entre el dispositivo y la superficie visible del material acumulado. La reducción progresiva de esta distancia permite detectar de manera precisa y continua el punto de saturación. La elección de sensores ópticos no intrusivos es ampliamente recomendada en sistemas de desbaste automatizados debido a su confiabilidad, rápida respuesta y mínima susceptibilidad a incrustaciones [8][9][15].

Una vez que el sensor indica que se ha alcanzado el umbral de saturación previamente calibrado, basado en las condiciones reales observadas en la Jornada A, el microcontrolador Arduino ejecuta el ciclo au-

tomático del sistema. La primera acción consiste en cerrar temporalmente la válvula mariposa eléctrica instalada en la tubería de ingreso, evitando el paso de agua hacia el recipiente durante la descarga. El uso de válvulas motorizadas es común en sistemas compactos de pretratamiento y permite gestionar flujos intermitentes con alta precisión [6][13][18].

Con el flujo detenido, el motor a pasos con sistema de reducción mecánica acciona el eje solidario al tamiz y ejecuta un giro controlado de aproximadamente 180°, vertiendo los sólidos acumulados en un contenedor lateral independiente. El uso de un sistema de reducción permite adaptar motores de bajo costo a los requerimientos de torque del sistema. Este esquema de basculamiento imita el funcionamiento de equipos autolimpiables utilizados en plantas pequeñas y medianas, donde el giro mecánico permite liberar la carga sin la necesidad de sistemas de lavado a presión [18][19][20]. Tras la descarga, el motor invierte su sentido de giro para devolver el tamiz perforado a su posición inicial, y posteriormente la válvula motorizada se reabre para reanudar el paso del agua.

El proceso completo es coordinado por un circuito de control gobernado por Arduino, que integra tres funciones esenciales:

- lectura continua del sensor ToF a través de comunicación digital I²C;
- operación de la electroválvula para gestionar el ingreso del flujo;
- control secuencial del motor a pasos para ejecutar el ciclo de basculamiento con precisión angular.

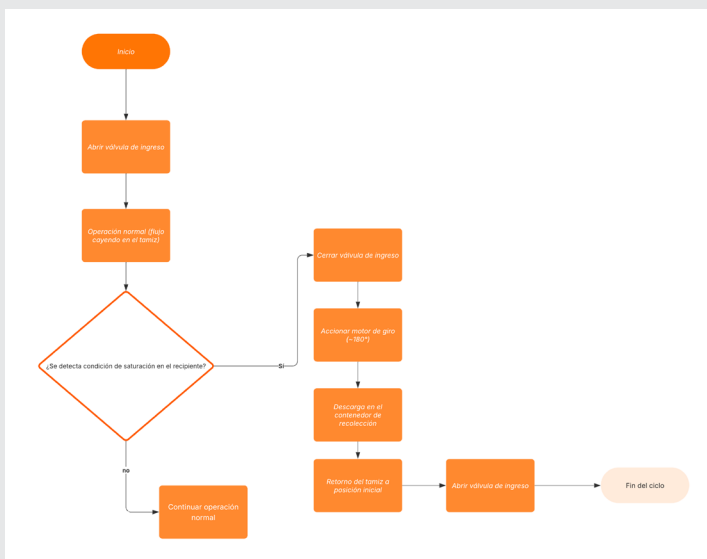


Figura 5. Diagrama de flujo del ciclo operativo del tamiz perforado basculante automatizado.

Fuente: elaboración propia.

tricos está ampliamente documentado en sistemas de automatización ligera, gracias a su fiabilidad, facilidad de programación y bajo mantenimiento [10][11]. La Figura 5 muestra el ciclo operativo completo del sistema y la interacción entre los elementos que conforman el proceso.

El algoritmo de control considera una lógica secuencial con temporizaciones definidas para asegurar una operación estable del sistema. Una vez que el sensor ToF detecta que la distancia medida es inferior al umbral de saturación establecido, el microcontrolador ejecuta un retardo de verificación para evitar activaciones por lecturas espurias o fluctuaciones momentáneas del flujo. Confirmada la condición de saturación, se ordena el cierre de la válvula mariposa y se introduce un tiempo de espera que garantiza la interrupción total del ingreso de agua antes de accionar el motor a pasos. Posteriormente, el motor ejecuta el giro de 180° del tamiz, mantiene la posición de descarga durante un intervalo predefinido y retorna el sistema a su posición inicial. Finalmente, se reabre la válvula y se restablece el monitoreo continuo del sensor. Esta lógica incorpora redundancias básicas para mejorar la robustez del proceso automatizado.

RESULTADOS

Los resultados obtenidos pertenecen exclusivamente a la caracterización hidráulica y de sólidos del sistema de desbaste existente; la evaluación experimental del prototipo automatizado se llevará a cabo en una fase posterior. Esta primera etapa permitió identificar las condiciones reales bajo las cuales el pretratamiento pierde eficiencia, así como los parámetros críticos que determinan el inicio de la colmatación. Tales observaciones son indispensables para definir el umbral de activación del sensor óptico de distancia (ToF), responsable de iniciar el ciclo automático de vaciado del tamiz.

Durante la Jornada A se registró una variación considerable tanto en el caudal instantáneo como en la tasa de generación de screenings. En particular, se observó un aumento abrupto de sólidos gruesos en los momentos de mayor actividad de sacrificio, lo cual provocó una reducción progresiva del área libre útil en el recipiente perforado. Esta disminución del paso hidráulico derivó en un incremento local de nivel y en una pérdida temporal de capacidad de conducción hacia el sedimentador. Dicho comportamiento confirma que la acumulación sobre la superficie del tamiz no es uniforme, sino que ocurre en oleadas asociadas a la operación diaria del matadero.

A partir de estas observaciones se determinó el nivel crítico de saturación que compromete la operación normal del sistema. Estos valores serán empleados

El uso de microcontroladores de bajo costo combinados con sensores ópticos y actuadores eléc-

para calibrar el umbral de disparo del sensor ToF, garantizando que el ciclo de limpieza únicamente se active en condiciones representativas y no ante fluctuaciones menores del flujo. Además, los datos obtenidos constituyen la base para el dimensionamiento hidráulico del componente perforado, la selección del torque necesario para el motor a pasos y la configuración de la válvula motorizada responsable del cierre temporal del ingreso. Los parámetros principales obtenidos en la Jornada A se muestran en la Tabla 2, y representan la referencia operativa para el diseño final del sistema automatizado, especialmente en lo relativo a los límites de control del sensor y al algoritmo de operación incorporado en el microcontrolador.

El factor de punta obtenido (PFS = 2.67) indica un régimen de descarga altamente intermitente, característico de mataderos donde el vertido se concentra en periodos cortos asociados a la faena y limpieza.

Tabla 2. Parámetros hidráulicos y de retención de sólidos registrados en la Jornada A.

| PARÁMETROS | Jornada A | Unidad |
|----------------------------|-----------|----------------|
| Volumen total de agua (V) | 12.0 | m ³ |
| Duración (Δt) | 4 | h |
| Caudal promedio (Q) | 0.833 | L/s |
| Screenings capturados (Vs) | 32.8 | L |
| Masa de sólidos (Ms) | 30.50 | kg |
| Factor de punta (PFS) | 2.67 | — |

Fuente: Elaboración propia.

Este valor se encuentra dentro del rango reportado por guías de diseño y estudios de variación horaria para sistemas de pequeña escala (≈2.5–2.7), aunque resulta superior a los factores típicos de descargas predominantemente domésticas (2.2), lo que evidencia una mayor exigencia hidráulica, lo cual valida la representatividad de los datos obtenidos para fines de diseño preliminar.

Este PFS implica que el sistema debe dimensionarse considerando un caudal pico aproximado de 2.22 L/s, y no únicamente el caudal promedio. Esto incrementa el riesgo de colmatación durante los eventos

de máxima descarga, justificando la necesidad de un pretratamiento con mayor área efectiva de paso y capacidad de operación bajo picos hidráulicos. El factor de punta constituye un parámetro clave para sustentar técnicamente la selección de un sistema de desbaste con tolerancia a sobrecargas y potencial de automatización para las condiciones operativas observadas en Misantla.

El factor de punta registrado en la Jornada A (PFS = 2.67) tuvo una influencia directa en el diseño del sistema automatizado. Este valor determinó la necesidad de seleccionar un motor a pasos con suficiente margen de torque para operar bajo condiciones de carga máxima durante los eventos de descarga pico, así como de programar un umbral del sensor ToF que evite activaciones prematuras durante fluctuaciones normales del flujo. Asimismo, el carácter intermitente del régimen hidráulico observado justificó la incorporación de tiempos de espera y confirmación en el algoritmo de control, asegurando que el ciclo de limpieza se active únicamente en condiciones representativas de saturación real del tamiz.

Los valores de acumulación de sólidos obtenidos durante la caracterización del sistema fueron utilizados como base para el análisis preliminar de carga mecánica del tamiz.

El sistema propuesto demuestra viabilidad técnica desde el punto de vista hidráulico y mecánico, constituyendo una alternativa de bajo costo para el pretratamiento automatizado en mataderos de pequeña escala.

No obstante, se requiere validación experimental del prototipo para confirmar su desempeño en condiciones reales de operación.

Desde el punto de vista económico, el sistema propuesto presenta una ventaja significativa frente a soluciones comerciales de desbaste mecánico. El costo estimado de los principales componentes del sistema automatizado, microcontrolador Arduino, sensor ToF, motor a pasos con reductor y válvula motorizada, se sitúa en un orden de magnitud inferior al de un tamiz rotativo comercial, cuyo precio puede superar fácilmente los USD 5,000–10,000 para aplicaciones de pequeña escala. En contraste, el sistema propuesto puede implementarse con una inversión aproximada inferior a USD 500, lo que lo convierte en una alternativa técnicamente viable y económicamente accesible para mataderos municipales con recursos limitados.

Adicionalmente, el análisis preliminar de torque confirma que el sistema puede ser operado mediante actuadores de bajo costo disponibles comercialmente, siempre que se consideren factores de se-

guridad adecuados. Esto respalda la viabilidad técnica del diseño propuesto bajo condiciones de carga máxima observadas en campo.

Discusión

El sistema propuesto responde a una problemática específica de mataderos municipales, donde la carga de sólidos es altamente variable y la deposición ocurre por caída directa. A diferencia de sistemas convencionales, el diseño planteado prioriza simplicidad mecánica y bajo costo.

Sin embargo, el presente estudio se limita a un análisis conceptual y preliminar, por lo que factores como desgaste mecánico, ensuciamiento del sensor y comportamiento dinámico del flujo requieren validación experimental en condiciones reales.

Asimismo, la dependencia de sensores ópticos implica la necesidad de mantenimiento periódico, lo cual debe considerarse en futuras implementaciones.

CONCLUSIONES

Los datos obtenidos en la caracterización hidráulica evidencian variaciones significativas en el volumen descargado y una alta presencia de sólidos gruesos caídos por gravedad durante las actividades de sacrificio. Esto confirma la necesidad de un sistema de desbaste con mayor capacidad de remoción y menor dependencia de operación manual.

Con base en los criterios de selección tecnológica evaluados, el tamiz perforado basculante constituye la alternativa más adecuada para el sitio: presenta bajo riesgo de colmatación, puede manejar sólidos irregulares con dimensiones variables y es totalmente compatible con esquemas de automatización basados en sensores y microcontroladores de bajo costo.

La incorporación de un sensor óptico de distancia tipo ToF aporta un mecanismo de detección temprana de saturación que mejora la oportunidad del ciclo de limpieza y reduce la intervención humana, aumentando la confiabilidad del pretratamiento. No obstante, la validación del desempeño del sensor y del accionamiento mecánico requiere su instalación en un entorno controlado y posteriormente en condiciones reales.

Se recomienda implementar una fase piloto para evaluar el sistema completo en operación real, estimar su impacto sobre la eficiencia del sedimentador y del humedal construido, y cuantificar los beneficios operativos en términos de mantenimiento, continuidad hidráulica y reducción de sobrecargas.

La principal contribución del estudio consiste en integrar caracterización hidráulica, selección tecnológica

multicriterio y dimensionamiento mecánico preliminar en una propuesta automatizada de bajo costo para mataderos municipales de pequeña escala.

AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan su agradecimiento a la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI) por el apoyo otorgado para la formación académica y el desarrollo del presente proyecto, respaldo que hizo posible la realización de este trabajo.

Asimismo, se reconocen las facilidades brindadas por el Matadero Municipal de Misantla "El Java", cuya colaboración permitió la toma de datos y observaciones técnicas indispensables para esta investigación. Finalmente, se agradece al Instituto Tecnológico Superior de Misantla (ITSM) por el acompañamiento académico y la infraestructura proporcionada durante el desarrollo del estudio.

BIBLIOGRAFÍA

[1] Aziz, A., Basheer, F., Sengar, A., Khan, S. U., & Farooqi, I. H. (2019). *Biological wastewater treatment (anaerobic-aerobic) technologies for safe discharge of treated slaughterhouse and meat processing wastewater*. *Science of the Total Environment*, 686, 681–708. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.05.295>.

[2] Díez, V., Cámara, J. M., Ruiz, M. O., Martínez, R., & Ramos, C. (2021). *A novel jet-loop anaerobic filter membrane bioreactor treating raw slaughterhouse wastewater: Biological and filtration processes*. *Chemical Engineering Journal*, 417, 128002. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2020.128002>.

[3] Dai, S., Wang, R., Lin, J., Zhang, G., Chen, Z., Li, L., & Shi, Q. (2025). *Study on physical clogging process and practical application of horizontal subsurface flow constructed wetlands*. *Scientific Reports*, 15, Article 10234. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-10234-x>.

[4] *Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT)*. (2022). *NOM-001-SEMARNAT-2021: Límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en cuerpos receptores propiedad de la nación*. *Diario Oficial de la Federación*.

[5] *Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) & Comisión Nacional del Agua (CONAGUA)*. (2023). *Guía técnica para la aplicación de la NOM-001-SEMARNAT-2021*. *Gobierno de México*.

[6] SUEZ. (2008). *Water treatment handbook: Pre-treatment and mechanical screens*. *SUEZ Environment*.

[7] U.S. Environmental Protection Agency. (2003). *Wastewater technology fact sheet: Screening and grit removal (EPA 832-F-03-011)*. U.S. EPA.

[8] JWC Environmental. (2024). *Guide to wastewater screening equipment*. JWC Environmental.

[9] HUBER SE. (2022). *HUBER Fine Screen ROTAMAT® (Ro1/Ro2/RPPS): Technical brochure*. HUBER Technology.

[10] Hughes, A., & Drury, B. (2019). *Electric motors and drives: Fundamentals, types and applications (5th ed.)*. Elsevier.

[11] Banzi, M., & Shiloh, M. (2022). *Getting started with Arduino (4th ed.)*. Maker Media.

[12] Karungamy, P. (2021). *Wastewater pretreatment methods for constructed wetlands: A review*. *Journal of Materials and Environmental Science*, 12(12), 1614–1626.

[13] Metcalf & Eddy. (2014). *Wastewater engineering: Treatment and resource recovery (5th ed.)*. McGraw-Hill Education.

[14] Rodríguez-González, L., Martínez-Santos, M., & Sánchez-Leal, L. (2013). *Evaluación de tecnologías de pretratamiento para humedales construidos*. *Revista Ingeniería Ambiental*, 34(2), 45–56.

[15] En-Nabety, K., & Boudi, Y. (2024). *Screening and pretreatment methods in small treatment plants*. *Water Science and Technology*, 89(4), 1123–1134. <https://doi.org/10.2166/wst.2024.065>.

[16] Saju, R., Thomas, J., & Binu, A. (2020). *Performance of screening systems in decentralized wastewater treatment units*. *Journal of Environmental Engineering*, 146(9), 04020089. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)EE.1943-7870.0001765](https://doi.org/10.1061/(ASCE)EE.1943-7870.0001765).

[17] WedgeWire Screen Co. (2022). *Wedgewire static screens: Technical manual*. WedgeWire Screen Company.

[18] Hydro-Dyne Engineering. (2023). *Screens and screening handling systems: Technical catalogue*. Hydro-Dyne Engineering.

[19] Franklin Miller Inc. (2021). *Wastewater headworks screens: Product and performance guide*. Franklin Miller Inc.

[20] Hydro-Dyne Engineering. (2023). *Hydro-Flo® / Hydro-Grit® screening systems: Technical overview*. Hydro-Dyne Engineering.





Multidisciplinario
e
ingenierías

Ingeniantes

Diseño y validación de un prototipo de bajo costo para la adquisición de datos del campo magnético terrestre RADM: aplicación en levantamientos magnéticos superficiales

RESUMEN: En este estudio se presenta el diseño, construcción y validación experimental de un prototipo de bajo costo para la adquisición de datos del campo magnético terrestre, denominado RADM (Registro de Adquisición de Datos Magnéticos). El sistema integra un sensor magnetométrico, un posicionamiento GPS para adquisición georreferenciada y un sistema de almacenamiento Micro SD, lo que permite la adquisición simultánea de datos magnéticos y georreferenciados.

La validación experimental se llevó a cabo mediante un levantamiento magnético superficial en el Instituto Tecnológico Superior de Misantla, donde se adquirieron y procesaron 355 puntos de medición en un área de 800 m², obteniendo una densidad de muestreo de aproximadamente 0.44 puntos/ m². Los datos fueron procesados mediante interpolación kriging utilizando el software Surfer, generándose mapas de anomalías magnéticas. Se estimó una variación instrumental con una desviación estándar promedio de ± 15 nT, y una coherencia espacial superior al 85 % en la correlación entre puntos vecinos. Comparaciones preliminares con valores de referencia del campo geomagnético regional indican diferencias menores al 5 %, lo cual se considera aceptable para estudios superficiales de detalle.

Los resultados indican que el prototipo es capaz de identificar anomalías magnéticas de origen geológico y antropogénico, confirmando su idoneidad para aplicaciones académicas y estudios geofísicos preliminares.

El sistema registró variaciones coherentes con amplitudes del orden de decenas de nanoteslas, permitiendo identificar el cauce



Colaboración

Silvia Patricia Morales Juárez, Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico Superior de Misantla; Ulises Santos López, Instituto Tecnológico Superior de Poza Rica; Elizabeth Salazar Hernández; José Francisco Santiago Rojas, Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico Superior de Misantla

Fecha de recepción: 12 de diciembre de 2025

Fecha de aceptación: 18 de diciembre de 2025

de un río y perturbaciones asociadas a estructuras metálicas en las instalaciones del ITSM. La base de datos georreferenciada presenta una adecuada coherencia espacial, lo que respalda su uso en estudios magnéticos superficiales de detalle, particularmente en contextos donde el acceso a equipos profesionales es limitado.

PALABRAS CLAVE: Prototipo, Campo Magnético, ESP32, HM-C5883L, adquisición de datos.

ABSTRACT: This study presents the design, construction, and experimental validation of a low-cost prototype for terrestrial magnetic field data acquisition, named RADM (Magnetic Data Acquisition System). The system integrates a magnetometric sensor, a GPS positioning module for georeferenced acquisition, and a MicroSD storage system, enabling the simultaneous recording of magnetic and spatial data.

Experimental validation was conducted through a surface magnetic survey at the Instituto Tecnológico Superior de Misantla, where 355 measurement points were acquired and processed over an area of 800 m², resulting in a sampling density of approximately 0.44 points/m². The data were processed using kriging interpolation with Surfer software, generating magnetic anomaly maps. An instrumental variation with an average standard deviation of ± 15 nT was estimated, along with spatial coherence exceeding 85 % in the correlation between neighboring points. Preliminary comparisons with regional geomagnetic reference values indicate differences below 5 %, which are considered acceptable for detailed surface studies.

The results indicate that the prototype is capable of identifying magnetic anomalies of both geological and anthropogenic origin, confirming its suitability for academic applications and preliminary geophysical studies. The system recorded coherent variations with amplitudes on the order of tens of nanoteslas, allowing the identification of a river channel and disturbances associated with metallic structures within the ITSM facilities. The georeferenced dataset shows adequate spatial coherence, supporting its application in detailed surface magnetic studies, particularly in contexts where access to professional equipment is limited.

KEYWORDS: *Prototype, magnetic field, ESP32, HMC5883L, data acquisition.*

INTRODUCCIÓN

La magnetometría es una técnica geofísica ampliamente utilizada debido a su carácter no invasivo y a la rapidez en la adquisición de datos, lo que la convierte en una herramienta fundamental para la identificación de estructuras del subsuelo y la caracterización de anomalías asociadas a distintos materiales geológicos [1], [2]. No obstante, el acceso a equipos magnetométricos profesionales sigue siendo limitado en muchas instituciones públicas de educación, principalmente por sus elevados costos.

En este contexto, las plataformas de hardware libre se han consolidado como alternativas relevantes en el ámbito educativo y científico, debido a su facilidad de programación, bajo costo y versatilidad [3]. En años recientes, diversos estudios han explorado el uso de sensores magnetométricos accesibles en aplicaciones geofísicas y ambientales, evidenciando que dispositivos basados en tecnologías como Arduino y ESP32 pueden emplearse en el monitoreo geomagnético, la detección de perturbaciones locales y actividades formativas. Esta accesibilidad ha impulsado el desarrollo de sistemas capaces de registrar fenómenos geomagnéticos dinámicos, como se observó durante la tormenta solar de mayo de 2024, cuyos efectos fueron detectados a escala global mediante variaciones significativas del campo magnético en distintas latitudes [4].

Aunque el error absoluto es mayor que en magnetómetros de precesión de protones o vapor de cesio, la respuesta relativa del sistema es consistente. Asimismo, su aplicación en levantamientos magnéticos superficiales de alta resolución continúa siendo restringida, particularmente en contextos académicos y de investigación aplicada en países en desarrollo, donde aún es necesario validar su desempeño bajo condiciones reales de campo. En este sentido, la confiabilidad de los datos adquiridos puede evaluarse mediante su comparación con estándares internacionales, como el índice geomagnético K_p [5].

Bajo este panorama, el desarrollo de prototipos de bajo costo basados en microcontroladores y sensores comerciales representa una alternativa viable tanto para la en-

señanza como para la investigación aplicada en distintos entornos geológicos [6], [7].

En este contexto, surge la siguiente pregunta de investigación: ¿puede un sistema de adquisición magnetométrico de bajo costo, basado en sensores comerciales, generar datos con suficiente precisión, coherencia espacial y resolución para identificar anomalías magnéticas en levantamientos superficiales de detalle, comparables a los obtenidos mediante equipos profesionales?

El presente trabajo tiene como objetivo desarrollar y validar un prototipo de bajo costo para la adquisición del campo magnético terrestre en estudios superficiales. Su relevancia radica en su potencial para fortalecer la formación académica, facilitar la investigación aplicada y contribuir al desarrollo de herramientas tecnológicas accesibles en el ámbito de las geociencias.

MATERIALES Y MÉTODOS

Descripción general del prototipo RADM

El Prototipo RADM fue diseñado como un sistema integrado para la adquisición de datos magnéticos y geográficos de manera simultánea. El núcleo del sistema es un microcontrolador ESP32, seleccionado por su capacidad de procesamiento, bajo consumo energético y compatibilidad con múltiples sensores.

El sensor magnetométrico HMC5883L permite la medición de las tres componentes vectoriales del campo magnético terrestre (X, Y, Z), mientras que el módulo GPS proporciona información precisa de latitud, longitud y altitud. Los datos adquiridos son almacenados en una memoria Micro SD, lo que facilita su posterior procesamiento.

El sistema fue programado utilizando el entorno Arduino IDE, desarrollando rutinas para la lectura de sensores, almacenamiento de datos y sincronización de información geográfica.

Ensamblaje e integración de los componentes del Prototipo RADM

El ensamblaje del Prototipo RADM se realizó mediante la integración modular de sus componentes electrónicos (Figura 1), priorizando la estabilidad mecánica, la reducción de interferencias magnéticas y la facilidad de operación en campo. El prototipo fue montado de manera que todos los elementos trabajaran de forma sincronizada, lo que facilita la adquisición simultánea de datos magnéticos y geográficos.

El microcontrolador ESP32 actúa como el núcleo del sistema, encargándose de la comunicación con los sensores, el procesamiento de la información y el control general de la adquisición de datos. A este se conecta el sensor magnetométrico HMC5883L, el cual mide las tres componentes vectoriales del campo magnético terrestre (X, Y y Z). El sensor fue colocado a una distancia prudente de otros componentes electrónicos con el fin de minimizar interferencias magnéticas.

El módulo GPS se integró al sistema para proporcionar información de latitud, longitud y altitud, facilitando la georreferenciación precisa de cada medición magnética. La comunicación entre el GPS y el ESP32 se realizó mediante protocolos seriales, sincronizando la adquisición de datos magnéticos y de posicionamiento.

La memoria Micro SD se incorporó como medio de almacenamiento, permitiendo guardar los datos adquiridos en formato de tabla para su posterior procesamiento. La escritura en la memoria se ejecuta de manera automática durante la adquisición, garantizando la integridad de la información.

La fuente de alimentación proporciona la energía necesaria para el funcionamiento autónomo del sistema durante los levantamientos de campo. Su selección consideró la estabilidad del voltaje y la duración requerida para las pruebas experimentales.

Finalmente, la computadora con Arduino IDE se utilizó para la programación del microcontrolador ESP32, la carga del código y la verificación del funcionamiento del sistema previo a las pruebas de campo (Figura 3). El código desarrollado permite la lectura continua de los sensores, el registro de datos y su almacenamiento en la memoria Micro SD.

Programación y adquisición de datos

El microcontrolador ESP32 fue programado mediante el entorno de desarrollo Arduino IDE. El código implementado permite la lectura continua de las componentes del campo magnético, así como la captura simultánea de las coordenadas GPS (Figura 3).

Las mediciones se almacenan en la memoria Micro SD en formato de tabla, incluyendo: Coordenadas geográficas, Altitud, Componentes del campo magnético (X, Y, Z), Dirección y azimut.

Código programado usado para el microcontrolador ESP32.

```

1  #include <Wire.h>
2  #include <SD.h>
3  #include <SPI.h>
4  #include <QMC5883LCompass.h>
5
6  QMC5883LCompass compass;
7  File archivo;
8  const int chipselect = 4;
9
10 const unsigned long duracion = 2UL * 60UL * 1000UL; // 2 horas en milisegundos
11 const int intervaloLectura = 1000; // 1 segundo
12 const int lecturasPorBloque = 30;
13
14 unsigned long tiempoInicio;
15 unsigned long ultimoTiempoLectura = 0;
16 int contadorLecturas = 0;
17
18 long sumaX = 0, sumaY = 0, sumaZ = 0, sumaAzimuth = 0;
19

```

Figura 3 Código usado para el microcontrolador EPS32.

Fuente: Elaboración propia.

Calibración del sensor magnetométrico

La calibración del sensor magnetométrico constituye una etapa crítica para garantizar la calidad y confiabilidad de los datos adquiridos durante un levantamiento magnético. Los sensores triaxiales, como el HMC5883L, son particularmente sensibles a perturbaciones generadas por el entorno electrónico y mecánico en el que se encuentran instalados.

Estas perturbaciones se clasifican comúnmente en dos tipos: efectos hard iron y efectos soft iron, además de la influencia directa de la orientación del sensor durante la medición. El sensor HMC5883L se somete a correcciones de hard iron (desplazamientos por imanes) y soft iron (distorsiones ferromagnéticas) mediante algoritmos de software que ajustan los datos a una geometría ideal [16].

Para la corrección de hard iron se calcularon los desplazamientos en cada eje mediante el ajuste del centroide de la nube de datos, mientras que para soft iron se aplicó una normalización elipsoidal utilizando matrices de transformación. El proceso se realizó con un conjunto de datos de rotación completa del sensor en múltiples orientaciones.

Hard iron

El efecto hard iron se produce por la presencia de materiales ferromagnéticos con magnetización permanente ubicados cerca del sensor. Estos materiales generan un campo magnético constante que se superpone al campo magnético

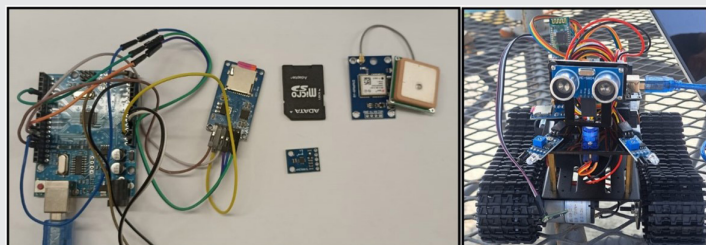


Figura 1. Componentes esenciales para el ensamblaje.

Fuente: Elaboración propia.

La integración adecuada de estos componentes permitió el desarrollo de un sistema compacto, portátil y funcional (Figura 2), adecuado para la adquisición de datos magnéticos superficiales en entornos académicos y de investigación aplicada.

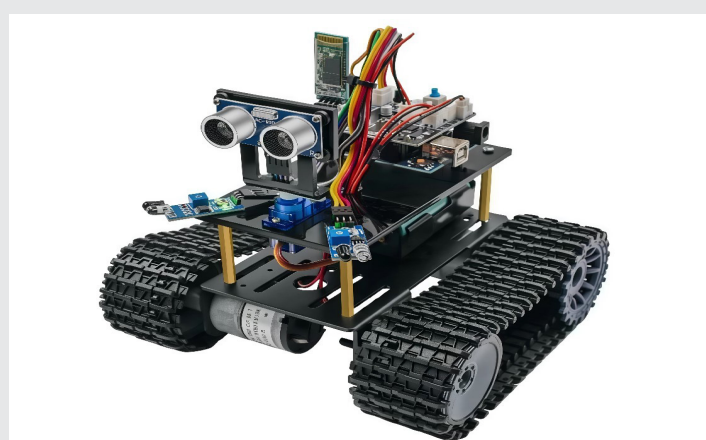


Figura 2. Armado del prototipo.

Fuente: Elaboración propia.

tico terrestre, provocando un desplazamiento del centro de la nube de datos obtenidos por el magnetómetro.

En términos prácticos, el hard iron se manifiesta como un corrimiento de los valores medidos en las componentes X, Y y Z, incluso cuando el sensor se encuentra en un ambiente magnéticamente estable [8], [9].

Soft iron

El efecto soft iron está asociado a la presencia de materiales ferromagnéticos no permanentemente magnetizados, los cuales distorsionan el campo magnético terrestre al interactuar con él. A diferencia del hard iron, el soft iron no genera un campo constante, sino que deforma la forma del campo magnético, produciendo escalamiento desigual y rotación de las mediciones en los diferentes ejes [8], [9].

Este efecto se observa comúnmente como una deformación elipsoidal de los datos cuando se representan en el espacio tridimensional, en lugar de la distribución esférica esperada para un sensor ideal [8], [9].

Importancia de la orientación del sensor

La orientación del sensor magnetométrico durante la adquisición de datos es un factor determinante en la calidad de las mediciones, especialmente cuando se utilizan sensores triaxiales. La intensidad y dirección del campo magnético medido dependen directamente de la orientación relativa del sensor respecto al campo magnético terrestre.

Variaciones no controladas en la orientación pueden introducir cambios artificiales en las componentes X, Y y Z, los cuales pueden ser interpretados erróneamente como anomalías magnéticas reales. Por esta razón, es fundamental mantener una orientación al norte constante del sensor durante el levantamiento o, en su defecto, registrar la orientación mediante sensores inerciales (IMU) para realizar correcciones posteriores.

En el caso del Prototipo RADM, la orientación del sensor fue controlada mediante un montaje fijo para asegurar una orientación X, Y y Z, garantizando la repetibilidad y minimizando rotaciones bruscas y asegurando una posición estable durante la adquisición de datos. Esta práctica contribuye significativamente a la repetibilidad de las mediciones y a la confiabilidad del análisis de anomalías magnéticas superficiales [5].

Metodología del levantamiento magnético

La validación experimental del Prototipo RADM se llevó a cabo mediante la realización de un levantamiento magnético terrestre superficial dentro de las instalaciones del Instituto Tecnológico Superior de Misantla (ITSM) (Figura 4). Previo al trabajo de campo, se realizaron pruebas de funcionamiento y calibración del sensor magnetométrico HMC5883L, con el objetivo de garantizar la estabilidad y coherencia de las mediciones. El sensor HMC5883L presenta una resolución típica de 5 mG ($\sim 0.5 \mu\text{T}$) y un rango de medición de ± 8 gauss.

El levantamiento se diseñó como un estudio superficial de detalle, seleccionando un área representativa que incluye elementos naturales y estructuras artificiales, lo que permitió evaluar el comportamiento del prototipo ante diferentes fuentes de perturbación magnética. Los puntos de medición fueron adquiridos de manera continua, manteniendo una velocidad de desplazamiento constante y una altura aproximada del sensor de entre 1 y 1.5 metros sobre el nivel del suelo [10], [11].

Cada medición incluyó el registro simultáneo de las componentes del campo magnético (X, Y, Z) y las coordenadas geográficas (latitud, longitud y altitud), obtenidas mediante el módulo GPS integrado al sistema con una precisión horizontal aproximada de $\pm 3\text{--}5$ m bajo condiciones estándar, las cuales se pueden comparar con base de datos de estaciones geomagnéticas [12].

Se implementaron medidas de control de error tales como: repetición de mediciones en puntos seleccionados, eliminación de datos atípicos mediante análisis estadístico (criterio de 2 desviaciones estándar) y mantenimiento de condiciones constantes de altura y orientación del sensor.



Figura 4. Mapa de ubicación del área de prueba y localización de puntos medidos.

Fuente: Elaboración propia.

Procesamiento de datos

Los datos adquiridos en campo fueron almacenados en la memoria Micro SD del Prototipo RADM y posteriormente transferidos a un equipo de cómputo para su procesamiento. La base de datos fue organizada y depurada, eliminando registros incompletos o valores atípicos asociados a perturbaciones momentáneas. Como parte de la validación, los datos se contrastaron con valores del modelo geomagnético internacional (IGRF) para la región, permitiendo evaluar la desviación relativa del sistema.

La base de datos final, lista para el software Surfer se muestra en la siguiente tabla, la cual contiene las componentes coordenadas de cada punto medido, vectoriales del campo magnético, azimut y dirección (Tabla 1).

El método magnético se basa en la medición de variaciones espaciales del campo magnético terrestre asociadas

a contrastes en la susceptibilidad magnética de los materiales del subsuelo. A escala local, los campos magnéticos medidos representan la superposición del campo geomagnético principal y las perturbaciones causadas por fuentes geológicas o antropogénicas [13], [14].

Tabla 1. Formato de datos ordenados.

| COORDENADAS | | | CAMPO MAGNÉTICO nT | | | | |
|-------------|------------|---------|--------------------|--------|----------|--------|-----------|
| LAT | LONG | ALT | X | Y | Z | AZIMUT | DIRECCIÓN |
| 19.947439 | -96.842553 | 279.284 | 692.65 | 483.58 | -954.56 | 34.47 | Noreste |
| 19.947494 | -96.842497 | 279.480 | 283.07 | 687.00 | -1016.43 | 67.26 | Este |
| 19.947531 | -96.842447 | 279.613 | 256.75 | 807.76 | -934.35 | 71.92 | Este |
| 19.947577 | -96.842403 | 279.779 | 264.63 | 811.19 | -958.81 | 71.61 | Este |
| 19.947621 | -96.842356 | 279.924 | 56.41 | 701.87 | -958.35 | 85.30 | Este |

Fuente: Elaboración propia.

Mediante el uso de sensores triaxiales, la magnitud del campo magnético se calcula a partir de sus componentes vectoriales, lo que permite un análisis cualitativo de las anomalías magnéticas.

Posteriormente, los datos del cálculo de estas componentes fueron importados al software Surfer, donde se realizó la interpolación espacial y la generación de mapas de anomalías magnéticas superficiales.

Se utilizó el método de kriging para la interpolación de datos en el programa Surfer [13], [14]. El método de kriging fue seleccionado debido a su capacidad para modelar la estructura espacial de los datos mediante funciones de variograma, permitiendo estimaciones óptimas en presencia de correlación espacial. Este método es ampliamente utilizado en geofísica por su capacidad de minimizar el error de estimación y representar de manera más realista las anomalías magnéticas en comparación con métodos determinísticos.

El procesamiento se enfocó en el análisis relativo de las anomalías del campo magnético directo, considerando las limitaciones propias del sensor.

RESULTADOS

El levantamiento magnético permitió la obtención de una base de datos georreferenciada completa dentro del área de estudio. Los resultados demuestran que el Prototipo RADM es capaz de registrar variaciones espaciales coherentes del campo magnético terrestre, identificándose anomalías de distinta intensidad y extensión.

El análisis estadístico de los datos muestra una media de intensidad magnética de aproximadamente -820 nT, con una desviación estándar de 120 nT, lo que indica una variabilidad moderada asociada a fuentes locales. El coeficiente de variación obtenido sugiere una adecuada sensibilidad del sistema para detectar contrastes magnéticos.

El mapa (Figura 5) muestra la distribución de estas anomalías preliminares de los puntos medidos dentro del área de prueba en las instalaciones del ITSM, con un total de 355 datos procesados, en un área total de 800 metros cuadrados.

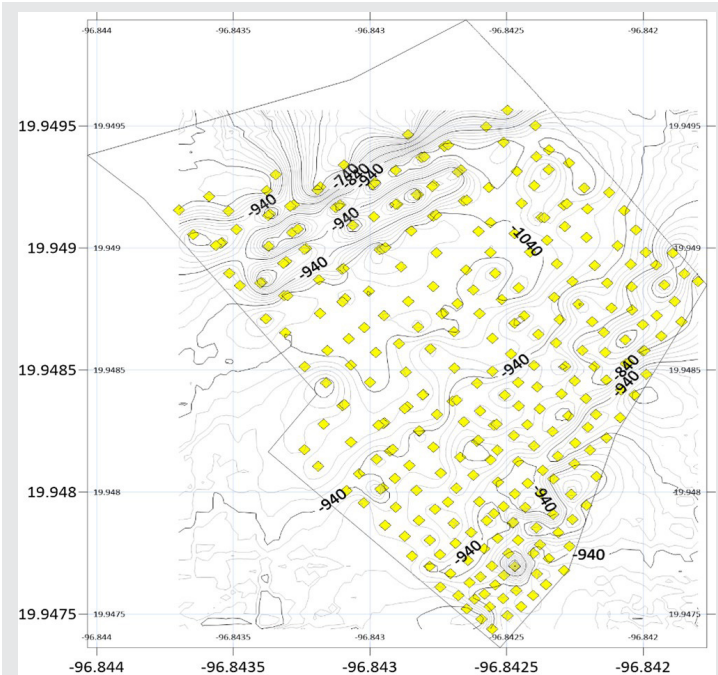


Figura 5. Mapa de anomalías y puntos de muestreo.

Fuente: Elaboración propia.

El mapa de anomalías magnéticas generado muestra patrones claramente definidos, entre los cuales destacan variaciones asociadas al cauce del río presente en la zona de estudio, así como perturbaciones locales vinculadas a la presencia de estructuras metálicas en los límites del área. Estas anomalías presentan amplitudes del orden de decenas de nT (Figura 6).

Estas anomalías pueden asociarse a contrastes en la susceptibilidad magnética del subsuelo, así como a la presencia de materiales ferromagnéticos superficiales.

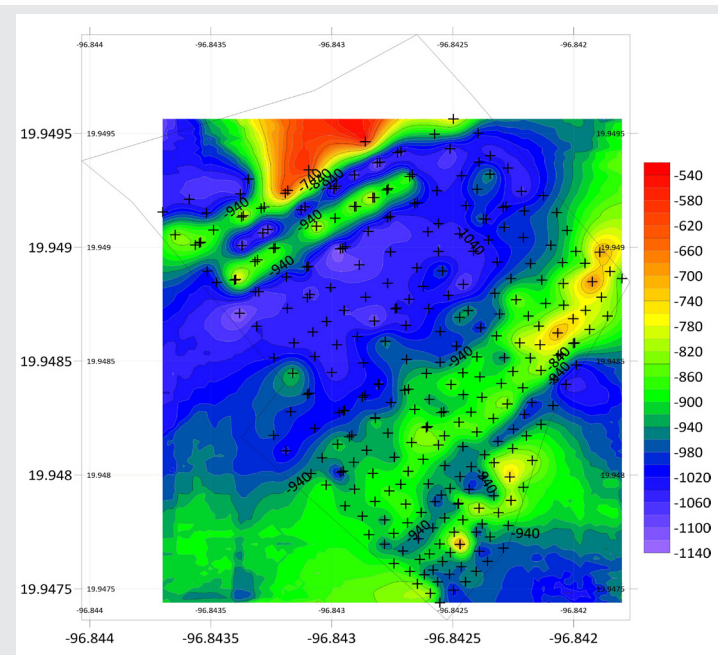


Figura 6. Mapa de anomalías magnéticas preliminar.

Fuente: Elaboración propia.

En términos de desempeño, el prototipo presentó una repetibilidad del 90 % en mediciones realizadas en puntos control, con cambios menores a ± 20 nT. La resolución espacial alcanzada permitió identificar anomalías con dimensiones del orden de pocos metros.

La Tabla 2. presenta un resumen general de las características del levantamiento magnético realizado. El número de puntos adquiridos y el área cubierta permitieron obtener una densidad de muestreo adecuada para el análisis espacial de las variaciones del campo magnético. El rango de valores registrado refleja la respuesta del entorno geológico y de las estructuras superficiales presentes en la zona de estudio.

Tabla 2. Datos relevantes del levantamiento magnético realizado con el Prototipo RADM.

| Parámetro | Descripción |
|---|--|
| Número total de puntos medidos | 355 |
| Área total cubierta | 800 m ² |
| Rango de intensidad del campo magnético | -1140 a -540 nT |
| Método de interpolación | Kriging (Software, 2025). |
| Tipo de estudio | Levantamiento magnético superficial de detalle |
| Sistema de adquisición | Prototipo RADM (ESP32 + HMC5883L + GPS) |
| Desviación estándar | ± 15 nT |

Fuente: Elaboración propia.

En comparación con magnetómetros profesionales, cuyo error típico es menor a ± 1 nT, el prototipo presenta limitaciones en precisión absoluta; sin embargo, su capacidad para detectar anomalías relativas lo hace adecuado para estudios preliminares y fines educativos [15].

CONCLUSIONES

El uso de sensores de bajo costo, en combinación con software libre, constituye una herramienta accesible y

funcional para la investigación académica, de esta manera el Prototipo RADM demostró ser eficaz en la detección de variaciones significativas del campo magnético dentro del área de estudio.

A pesar de sus limitaciones frente a equipos profesionales, en cuanto a la precisión y toma de datos automáticos, el prototipo proporciona información de valor científico cuando se aplica una correcta calibración y metodología de adquisición.

Entre las principales limitaciones del sistema se encuentran la sensibilidad a interferencias externas, la ausencia de corrección en tiempo real mediante estación base y una menor precisión respecto a equipos profesionales. No obstante, estas limitaciones no impiden su uso en estudios de carácter preliminar y académico.

Como líneas futuras de investigación, se propone la integración de sensores de mayor precisión, incorporación de una unidad inercial (IMU) para corrección de orientación, implementación de filtros en tiempo real y validación en distintos entornos geológicos.

Este tipo de desarrollos representa una oportunidad estratégica para democratizar el acceso a herramientas geofísicas en contextos educativos y de investigación aplicada.

BIBLIOGRAFÍA

[1] W. Lowrie, *Fundamentals of Geophysics*, 2nd ed. Cambridge, U.K.: Cambridge Univ. Press, 2007.

[2] W. M. Telford, L. P. Geldart, and R. E. Sheriff, *Applied Geophysics*, 2nd ed. Cambridge, U.K.: Cambridge Univ. Press, 1990.

[3] A. S. Ismailov and Z. B. Jo'Rayev, "Study of the possibility of using Arduino microcontrollers in scientific research," *Scientific Progress*, vol. 3, no. 1, pp. 154-161, 2022.

[4] J. A. Lazzús and I. Salfate, "Análisis de la tormenta geomagnética de mayo de 2024 mediante sensores de bajo costo," *Revista de Ciencias Tecnológicas*, vol. 7, no. 1, pp. 12-25, 2024.

[5] J. Matzka, C. Stolle, J. Kerlow, and S. Bruni, "The geomagnetic Kp index and its related indices," *Space Weather*, vol. 19, no. 5, Art. no. e2020SW002641, 2021.

[6] M. J. Caruso, "Applications of magnetic sensors for low-cost compass systems," *IEEE Sensors Journal*, vol. 1, no. 1, pp. 1-6, 2000.

[7] A. I. Rodríguez-Trejo et al., "La utilidad de los sensores de bajo costo en las geociencias," *Enseñanza y Comunicación de las Geociencias*, vol. 3, no. 2, pp. 60-68, 2024.

[8] D. Gebre-Egziabher, G. H. Elkaim, J. D. Powell, and B. W. Parkinson, "Calibration of strapdown magnetometers in magnetic field domain," *Journal of Aerospace Engineering*, pp. 87–102, 2006.

[9] V. Renaudin, M. Afzal, and G. Lachapelle, "Complete triaxis magnetometer calibration in the magnetic domain," *Journal of Sensors*, 2010, Art. no. 967245.

[10] J. M. Reynolds, *An Introduction to Applied and Environmental Geophysics*, 2nd ed. Hoboken, NJ, USA: Wiley, 2011.

[11] P. Kearey, M. Brooks, and I. Hill, *An Introduction to Geophysical Exploration*, 3rd ed. Oxford, U.K.: Blackwell, 2013.

[12] E. Hernández-Quintero et al., "Más de 100 años ininterrumpidos de registro geomagnético en México," *Arqueología Iberoamericana*, no. 39, pp. 36–43, 2018.

[13] R. J. Blakely, *Potential Theory in Gravity and Magnetic Applications*. Cambridge, U.K.: Cambridge Univ. Press, 1995.

[14] W. J. Hinze et al., *Gravity and Magnetic Exploration: Principles, Practices, and Applications*. Cambridge, U.K.: Cambridge Univ. Press, 2013.

[15] S. Li et al., "Low-cost magnetometers for geophysical applications," *Sensors*, 2022.

[16] J. Wang et al., "Evaluation of MEMS magnetometers in field surveys," *IEEE Sensors Journal*, 2023.





Bioquímica
y
Biológicos

Ingeniantes

Optimización de las condiciones de extracción del maguey morado (*Rhoeo spathacea*) con potencial de uso tópico

RESUMEN: El maguey morado (*Rhoeo spathacea*) es una planta medicinal con potencial como ingrediente natural en formulaciones tópicas debido a sus compuestos bioactivos con propiedades antioxidantes y antiinflamatorias. No obstante, su aplicación directa enfrenta desafíos, ya que la eficiencia de extracción y la estabilidad del extracto pueden variar según el tiempo, la temperatura y el estado del material vegetal, lo que limita su uso en productos seguros y reproducibles. En este estudio se evaluó la obtención de un extracto estable y con buen rendimiento para su incorporación en una crema dermatológica, como alternativa funcional frente a productos sintéticos. Se analizaron ocho condiciones de extracción mediante la comparación del rendimiento de sólidos y la estabilidad del extracto, considerando variaciones del proceso y del tratamiento de la materia prima. Los resultados mostraron que los tratamientos 1-4 presentaron la mayor concentración de sólidos y mejor estabilidad con un promedio de 0.17 y una desviación estándar de 0.005, mientras que los tratamientos 5-8 reflejaron rendimientos bajos y mayor variabilidad con un promedio de 0.05 y una desviación estándar de 0.024. Se determinaron como óptimas las condiciones de extracción en frío, con hojas frescas y 12 h de agitación. En conclusión, del extracto se conservó los sólidos totales y se incorporó adecuadamente en una crema base, evidenciando su potencial para el desarrollo de cosméticos naturales con aplicaciones dermatológicas.

PALABRAS CLAVE: Maguey morado, *Rhoeo spathacea*, Extracto vegetal, Extracción en frío, Estabilidad, Crema dermatológica, Compuestos bioactivos, Cosméticos naturales.



Colaboración

Irma Castillo Carmona; Arturo Cabrera Hernández; Joaquín Sangabriel Lomeli; Naomi Barrera Villalobos; Brenda Suemy Trujillo García, Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico Superior de Misantla

Fecha de recepción: 12 de diciembre de 2025

Fecha de aceptación: 18 de diciembre de 2025

ABSTRACT: Purple maguey (*Rhoeo spathacea*) is a medicinal plant with potential as a natural ingredient in topical formulations due to its bioactive compounds with antioxidant and anti-inflammatory properties. However, its direct application faces challenges, as extraction efficiency and extract stability can vary depending on time, temperature, and the condition of the plant material, limiting its use in safe and reproducible products. This study evaluated the optimal conditions to obtain a stable, high-yield extract for incorporation into a dermatological cream as a functional alternative to synthetic products. Eight extraction conditions were analyzed by comparing solids yield and extract stability, considering variations in the process and raw material treatment. The results showed that treatments 1-4 had the highest solids concentration and best stability with an average of 0.17 and a standard deviation of 0.005, while treatments 5-8 showed low yields and greater variability with an average of 0.05 and a standard deviation of 0.024. Cold extraction with fresh leaves and 12 hours of agitation were determined to be optimal. In conclusion, the extract retained total solids and was properly incorporated into a base cream, demonstrating its potential for the development of natural cosmetics with dermatological applications.

KEYWORDS: Purple maguey, *Rhoeo spathacea*, Plant extract, Cold extraction, Stability, Dermatological cream, Bioactive compounds, Natural cosmetics.

INTRODUCCIÓN

El maguey morado (*Rhoeo spathacea*) es una planta medicinal ampliamente utilizada en la medicina tradicional de México por sus propiedades antiinflamatorias, antioxidantes y cicatrizantes [1,2], lo que la convierte en una alternativa natural prometedora para el desarrollo de productos tópicos orientados al cuidado de la piel [3]. Sin embargo, su aprovechamiento científico y

tecnológico enfrenta un problema importante: existe información limitada y poco estandarizada sobre la obtención de extractos estables y con adecuada concentración de compuestos bioactivos para su aplicación segura en formulaciones cosméticas. Además, la calidad del extracto puede verse afectada por diversos desafíos, como la variación del proceso de extracción, la temperatura, el tiempo y el estado del material vegetal, lo cual influye directamente en el rendimiento y la estabilidad del producto final.

Diversas investigaciones han reportado que *Rhoeo spathacea* contiene metabolitos como flavonoides, compuestos fenólicos, taninos y alcaloides [4, 5], asociados con efectos terapéuticos relevantes, incluyendo actividad antioxidante y antimicrobiana [6], lo que respalda su potencial biotecnológico y farmacológico. Asimismo, se ha documentado que el contenido de fenoles totales y la capacidad antioxidante pueden mantenerse o incluso incrementarse bajo ciertas condiciones de procesamiento y almacenamiento [7], evidenciando oportunidades para su aplicación en productos funcionales; sin embargo, no siempre se definen parámetros claros de extracción óptima ni criterios de estabilidad orientados específicamente a su incorporación en formulaciones cosméticas, lo que restringe su escalamiento y validación como ingrediente activo. Hasta nuestro conocimiento y en base al análisis bibliográfico realizado no se ha encontrado de manera sistemática la comparación de variables de extracción orientadas específicamente a su aplicación cosmética. La mayoría de los trabajos solo se limitan al análisis químico del extracto, sin considerar el estado de la materia prima ya sea fresca o seca, y el tiempo de agitación al cual es sometido la extracción y cómo influyen en la estabilidad y el rendimiento obtenido del extracto, el cual será base de un producto cosmético.

En este trabajo se propone evaluar comparativamente ocho condiciones de extracción con el objetivo de identificar aquellas que permitan obtener un extracto de maguey morado (*Rhoeo spathacea*) con alta concentración de sólidos y estabilidad adecuada para uso tópico. El enfoque experimental se centra en analizar variables de entrada como el tipo de hoja (fresca o seca), la extracción en frío y distintos tiempos de agitación, con el fin de determinar si estas condiciones influyen en el rendimiento y estabilidad del extracto.

Bajo este planteamiento, se establece la hipótesis de que las condiciones de extracción en frío, empleando hojas frescas y tiempos específicos de agitación, favorecerán una mayor concentración de sólidos y una mejor estabilidad del extracto, lo cual permitiría fundamentar una metodología óptima para su aprovechamiento futuro.

MATERIAL Y MÉTODOS

Diseño del estudio

La investigación se desarrolló bajo un enfoque cuantitativo, donde se recolectaron y analizaron datos medibles relacionados con el rendimiento y estabilidad del extracto de *Rhoeo spathacea*, con el propósito de evaluar su viabilidad para su uso en una formulación tópica tipo crema. El diseño fue experimental y descriptivo, debido a que se aplicaron condiciones controladas durante la extracción y concentración del material vegetal, describiendo posteriormente las características observadas en los productos obtenidos.

Material vegetal y preparación de muestras

Se recolectaron hojas de maguey morado (*Rhoeo spathacea*), las cuales fueron lavadas y cortadas en fragmentos pequeños. Posteriormente, se dividieron en dos grupos: hojas frescas y hojas secas. Para el secado del material vegetal, hojas recién cortadas se colocaron en un contenedor de madera protegido de la luz solar a temperatura ambiente durante 10 días, con el fin de evaluar el efecto del contenido de humedad del material vegetal en el proceso de extracción.



Figura 1. Preparación del material vegetal de *Rhoeo spathacea*: a) hojas frescas y b) hojas secas.

Fuente: Elaboración propia.

Extracción y almacenamiento del extracto

La extracción se llevó a cabo mediante maceración utilizando etanol al 96 % como solvente. Se seleccionó éste como solvente de extracción debido a que las antocianinas presentan mayor estabilidad en medios con bajo contenido de agua en comparación con soluciones predominantemente acuosas. En un sistema casi anhidro se minimizan procesos como la

hidrólisis, se reduce la actividad de agua y se limita la degradación oxidativa cuando el sistema permanece cerrado [8].

Se prepararon extractos con 100 g de hojas frescas en 175 mL de etanol al 96 %, y 25 g de hojas secas en 43.5 mL de etanol al 96 %. Se evaluaron ocho condiciones de extracción, aplicando tiempos de agitación de 12, 24 y 72 h, además de una muestra control sin agitación (Tabla 1). Los extractos se mantuvieron sin calentamiento con el fin de evitar la degradación de compuestos bioactivos. Los frascos se protegieron con papel opaco y cinta en la tapa para evitar la exposición directa a la luz solar.

Tabla 1. Condiciones experimentales evaluadas para la extracción de maguay morado (*Rhoeo spathacea*).

| Tratamiento | Estado del material vegetal | Masa de hojas (g) | Volumen de etanol 96% (mL) | Agitación | Tiempo (h) | Condición |
|-------------|-----------------------------|-------------------|----------------------------|-----------|------------|-----------|
| 1 | Fresca | 100 | 175 | Sí | 12 | En frío |
| 2 | Fresca | 100 | 175 | Sí | 24 | En frío |
| 3 | Fresca | 100 | 175 | Sí | 72 | En frío |
| 4 | Fresca | 100 | 175 | No | 0 | En frío |
| 5 | Seca | 25 | 43.5 | Sí | 12 | En frío |
| 6 | Seca | 25 | 43.5 | Sí | 24 | En frío |
| 7 | Seca | 25 | 43.5 | Sí | 72 | En frío |
| 8 | Seca | 25 | 43.5 | No | 0 | En frío |

Fuente: Elaboración propia.

Análisis espectrofotométrico y filtración

Cada extracto macerado fue filtrado para separar las fracciones líquidas y sólidas; posteriormente se midieron los volúmenes obtenidos de cada tratamiento con fines comparativos de concentración.

Los extractos filtrados se analizaron mediante espectrofotometría visible utilizando un equipo Genesys 10S UV-Vis (Thermo Scientific) aplicando un barrido desde los 400 nm hasta los 700 nm, registrando los espectros de absorción para aplicar un análisis comparativo e identificar variaciones asociadas con la concentración y estabilidad del extracto. Este método espectrofotométrico fue validado en un trabajo reportado previamente en la literatura [8]. La extracción y el análisis espectrofotométrico se realizaron por triplicado. Los datos obtenidos de cada barrido fueron ordenados empleando el software Excell® y graficados con apoyo del software OriginPro 2021®.

Concentración del extracto e incorporación en crema

A fin de eliminar el solvente, los extractos filtrados se colocaron en recipientes previamente llevados a peso constante y se secaron en estufa durante 24 horas a 40 °C, seguido de enfriamiento en desecador durante 45 minutos, garantizando la evaporación del solvente y la obtención del residuo seco. La temperatura de 40 °C se emplea como un punto intermedio que favorece la eficiencia de extracción al incrementar la difusión y solubilización de los compuestos, sin comprometer significativamente su estabilidad estructural. A esta temperatura, la degradación térmica de las antocianinas es más lenta que a temperaturas superiores y, en estas condiciones, el proceso suele ajustarse a una cinética de primer orden con una constante de velocidad (k) menor que la observada en medios acuosos. Una vez alcanzada la temperatura ambiente, el residuo fue recuperado por raspado y se adicionaron 2 g de crema base neutra, realizando el mezclado manual con espátula hasta lograr la integración del extracto. El producto final se transfirió a contenedores plásticos (Figura 3) para su almacenamiento.

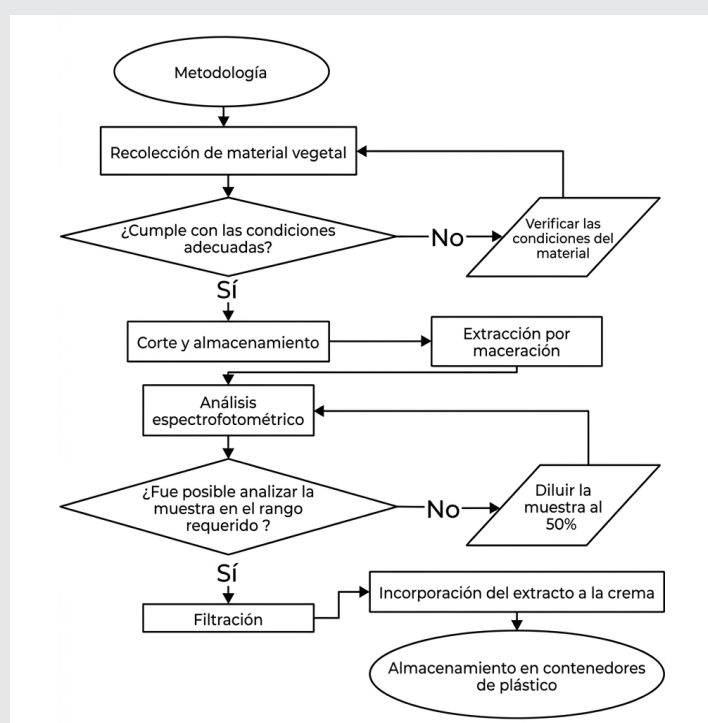


Figura 2. Diagrama de flujo sobre la metodología aplicada. Fuente: Elaboración propia.



Figura 3. Almacenamiento en contenedores de plástico. Fuente: Elaboración propia.

Tabla 2. Sólidos totales (g) obtenidos de las hojas frescas.

| TIEMPO | REPETICIÓN 1 | REPETICIÓN 2 | REPETICIÓN 3 |
|--------|--------------|--------------|--------------|
| 0 h | 0.171 | 0.1638 | 0.1755 |
| 12 h | 0.1729 | 0.1778 | 0.1785 |
| 24 h | 0.175 | 0.1782 | 0.1743 |
| 72 h | 0.1678 | 0.1697 | 0.169 |

Fuente: Elaboración propia.

Tablas 3. Sólidos totales (g) obtenidos de las hojas frescas.

| TIEMPO | REPETICIÓN 1 | REPETICIÓN 2 | REPETICIÓN 3 |
|--------|--------------|--------------|--------------|
| 0 h | 0.0442 | 0.0817 | 0.0347 |
| 12 h | 0.0756 | 0.0786 | 0.0398 |
| 24 h | 0.0413 | 0.0445 | 0.0465 |
| 72 h | 0.0748 | 0.0704 | 0.0666 |

Fuente: Elaboración propia.

RESULTADOS

Perfil espectrofotométrico del extracto de *Rhoeo spathacea*

El análisis espectrofotométrico UV-Vis evidenció un comportamiento característico del extracto de *Rhoeo spathacea*, asociado con mezclas pigmentarias ricas en antocianinas y compuestos fenólicos, responsables de la coloración púrpura típica del maguey morado [9]. En cada uno de los ocho tratamientos los barridos instrumentales presentaron un patrón espectral consistente, así como en sus replicas, lo cual confirma una adecuada reproducibilidad del registro y estabilidad general del perfil de absorción para cada tratamiento de extracción.

El espectro mostró una absorbancia relativamente alta en la región cercana a 400 nm, alcanzando valores de 4.7 de absorbancia, seguida de un descenso pronunciado y un valle estable en longitudes intermedias aproximadas entre 450–550 nm. Finalmente, se observó un repunte en la región final del espectro, aproximadamente entre 600–700 nm, asociado con formas estructurales estables de antocianinas. Este comportamiento confirma la persistencia de pigmentos responsables de la coloración del extracto, lo cual resulta relevante para aplicaciones donde la estabilidad cromática es un criterio funcional [10,11].

Dado que la absorbancia del extracto crudo era alta; las muestras se diluyeron y con las lecturas, se graficaron nuevamente. El comportamiento del perfil se mantuvo y los gráficos se presentan en la Anexo A del texto.

La asociación entre fenoles totales determinada por el método de Folin-Ciocalteu, la capacidad antioxidante (DPPH/ABTS) y los espectros de absorción, fueron validados previamente [12].

Comparación entre condiciones de extracción

La evaluación comparativa de los ocho tratamientos permitió identificar diferencias en el rendimiento de extracción y la estabilidad del extracto. De manera general, los tratamientos donde se emplearon hojas frescas (1–4) presentaron un comportamiento más estable y consistente, mientras que los tratamientos que emplearon hojas secas, tratamientos 5 al 8 mostraron mayor variabilidad y menor rendimiento (Figura 4). Estos resultados sugieren que el estado fresco o seco del material vegetal influye directamente en la eficiencia del contenido del peso seco obtenido durante el proceso de extracción y en la estabilidad del producto obtenido.

Asimismo, las evidencias espectrales obtenidas en los tratamientos con hojas frescas mantuvieron el patrón característico del extracto púrpura (Figura 4, panel 1 al 4) mientras que los tratamientos con hojas secas reflejaron una menor intensidad para los máximos de absorbancia y consistencia del perfil, indicando un menor contenido de compuestos extraídos o posibles cambios asociados al secado y almacenamiento del material vegetal.

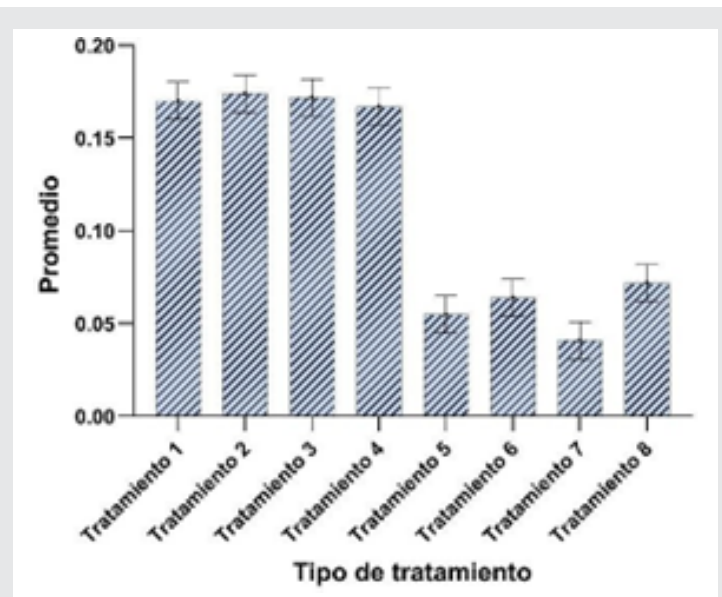


Figura 4. Rendimiento promedio del extracto de maguey morado (*Rhoeo spathacea*) para los ocho tratamientos evaluados. Se presenta la media y la desviación estándar para cada uno de los 8 tratamientos evaluados.

Fuente: Elaboración propia.

Con base en los resultados obtenidos las condiciones óptimas más favorables para obtener un extracto estable y con mayor concentración se encontraron en los tratamientos bajo condiciones en frío, con hojas frescas y 12 h de agitación, lo cual se considera una alternativa eficiente al reducir tiempos sin comprometer la calidad del extracto.

Incorporación del extracto en formulación tipo crema

El extracto concentrado obtenido posterior al secado fue integrado en una crema base, logrando una incor-

poración adecuada del material, lo cual permitió obtener un producto final homogéneo. Este resultado respalda la viabilidad del extracto como insumo funcional, ya que el residuo seco recuperado pudo dispersarse correctamente en la matriz cosmética, manteniendo características visibles compatibles con el desarrollo de un producto tópico.

Discusión

Este trabajo aporta evidencia experimental útil sobre el comportamiento del maguey morado bajo distintas condiciones de extracción, sirviendo como referencia para el diseño de productos naturales con valor agregado.

En Anexo A se aprecia una diferenciación marcada entre los ocho tratamientos evaluados, evidenciando que las condiciones de extracción modulan directamente la respuesta promedio del extracto. Los tratamientos 1-4 exhibieron los valores medios más elevados (≈ 0.17) y una dispersión reducida, lo que sugiere una mayor eficiencia del proceso y una reproducibilidad experimental más robusta. En contraste, los tratamientos 5-8 registraron promedios inferiores (≈ 0.04 - 0.07) y una variabilidad incrementada; particularmente, el tratamiento 5 presentó la mayor dispersión, lo que podría reflejar una mayor susceptibilidad del procedimiento a fluctuaciones externas, como cambios de temperatura durante la extracción, lo cual puede estar asociado a una mayor sensibilidad del procedimiento frente a factores externos como temperatura.

El perfil UV-Vis del extracto de *Rhoeo spathacea* presentó un patrón espectral consistente entre réplicas y tratamientos, lo que evidencia reproducibilidad y estabilidad del registro. La alta absorbancia cercana a 400 nm (≈ 4.7 UA), seguida de un descenso pronunciado y un valle entre 450-550 nm, sugiere la presencia de mezclas pigmentarias ricas en antocianinas y compuestos fenólicos. El repunte en 600-700 nm concuerda con especies de antocianinas en formas estructuralmente más estables, apoyando la persistencia de la coloración púrpura y su relevancia cuando la estabilidad cromática es crítica [10,11]. Comparativamente, los tratamientos del 1 a 4 con hojas frescas conservaron intensidad y coherencia del perfil (Figura 4) y mayores rendimientos (Anexo A), mientras que las hojas secas; tratamientos 5 a 8, mostraron menor absorbancia y mayor variabilidad, atribuible a degradación u oxidación durante secado y almacenamiento. En conjunto, la extracción en frío con hojas frescas y 12 h de agitación maximizó concentración y estabilidad del extracto.

Este comportamiento sugiere que el uso de hojas frescas favorece la transferencia de masa entre el solvente (etanol al 96 %) y la matriz vegetal, promoviendo la solubilización de metabolitos como compuestos fenólicos, flavonoides y pigmentos característicos del

maguey morado [13], [14]. En general, estos hallazgos confirman que los primeros cuatro tratamientos representan condiciones más adecuadas para obtener extractos con mayor rendimiento relativo y mejor estabilidad, aportando una base experimental útil para futuras etapas de optimización del proceso.

CONCLUSIONES

Los resultados confirmaron la hipótesis del estudio: el extracto de maguey morado (*Rhoeo spathacea*) mantuvo una concentración relevante de compuestos bioactivos tras el proceso de extracción y secado bajo condiciones experimentales controladas, lo que permitió su incorporación eficiente en una crema base, obteniendo un producto estandarizado. Las condiciones de extracción influyeron de manera decisiva en el desempeño del proceso; en particular, la extracción en frío con hojas frescas y 12 h de agitación (tratamientos 1-4) proporcionó el mayor rendimiento y la menor variabilidad, mientras que los tratamientos con hojas secas (5-8) mostraron menor rendimiento y mayor dispersión. En conjunto, estos hallazgos respaldan el potencial del maguey morado como materia prima accesible y sostenible para el desarrollo de formulaciones cosméticas naturales con propiedades funcionales.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos el apoyo que el Tecnológico Nacional de México, campus Instituto Tecnológico Superior de Misantla para la realización de este proyecto.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] S.-P. Tan, X.-Y. Keng, C.-W. Bryan Lim, y H.-Y. Tan, "Traditional uses, phytochemistry and pharmacological activities of *Tradescantia spathacea*-X", *Rec. Nat. Prod.*, núm. 2, pp. 176-200, 2024. <http://doi.org/10.25135/rnp.436.2311.2983>
- [2] P. G. Trejo-Flores et al., "Evaluation of aqueous and ethanolic extracts for the Green synthesis of zinc oxide nanoparticles from *Tradescantia spathacea*", *Nanomaterials (Basel)*, vol. 15, núm. 14, p. 1126, 2025. <https://doi.org/10.3390/nano15141126>.
- [3] K. Mansoor, T. Aburjai, F. Al-Mamoori, y M. Schmidt, "Plants with cosmetic uses", *Phytother. Res.*, vol. 37, núm. 12, pp. 5755-5768, 2023. <https://doi.org/10.1002/ptr.8019>.
- [4] J. B. L. Tan, Y. Y. Lim, y S. M. Lee, "Antioxidant and antibacterial activity of *Rhoeo spathacea* (Swartz) Stearn leaves", *J. Food Sci. Technol.*, vol. 52, núm. 4, pp. 2394-2400, 2015. <https://doi.org/10.1007/s13197-013-1236-z>.
- [5] M. A. Hidayah y R. A. Fikroh, "Potential analysis of boat Lily leaf extract (*Rhoeo spathaceae* (SW.) Stearn) as an alternative indicator in acid-base

titration of acid-base learning”, J. Penelit. Pendi-dik. IPA, vol. 9, núm. 9, pp. 7491–7502, 2023. <https://doi.org/10.29303/jppipa.v9i9.3306>.

[6] B. L. J. Tan, “Bioactivity and chemical constituents of *Rhoeo spathacea* and *Rhoeo discolor*, with emphasis on *Rhoeo spathacea*”. Monash University, 15-feb-2017. <https://doi.org/10.4225/03/58a4e818ce3a0>

[7] J. B. L. Tan, Y. Y. Lim, y S. M. Lee, “*Rhoeo spathacea* (Swartz) Stearn leaves, a potential natural food colorant”, J. Funct. Foods, vol. 7, pp. 443–451, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.jff.2014.01.012>.

[8] Revilla, E., Ryan, J. M. & Martin-Ortega, G. (1998). Comparison of several procedures used for the extraction of anthocyanins from red grapes. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 46(11), 4592–459.

[9] González, C. et al (2016). Evaluación fitoquímica, físicoquímica y farmacológica de Maguey Morado (*Rhoeo discolor*). *Revista Tendencias en Docencia e Investigación en Química*, 2–10.

[10] S. Jurić et al., “Sources, stability, encapsulation and application of natural pigments in foods”, *Food Rev. Int.*, vol. 38, núm. 8, pp. 1735–1790, 2022. <https://doi.org/10.1080/87559129.2020.1837862>.

[11] B. Szadkowski, M. Kuśmierk, M. Śliwka-Kaszyńska, y A. Marzec, “Structure and stability characterization of natural lake pigments made from plant extracts and their potential application in polymer composites for packaging materials”, *Materials (Basel)*, vol. 15, núm. 13, p. 4608, 2022. <https://doi.org/10.3390/ma15134608>.

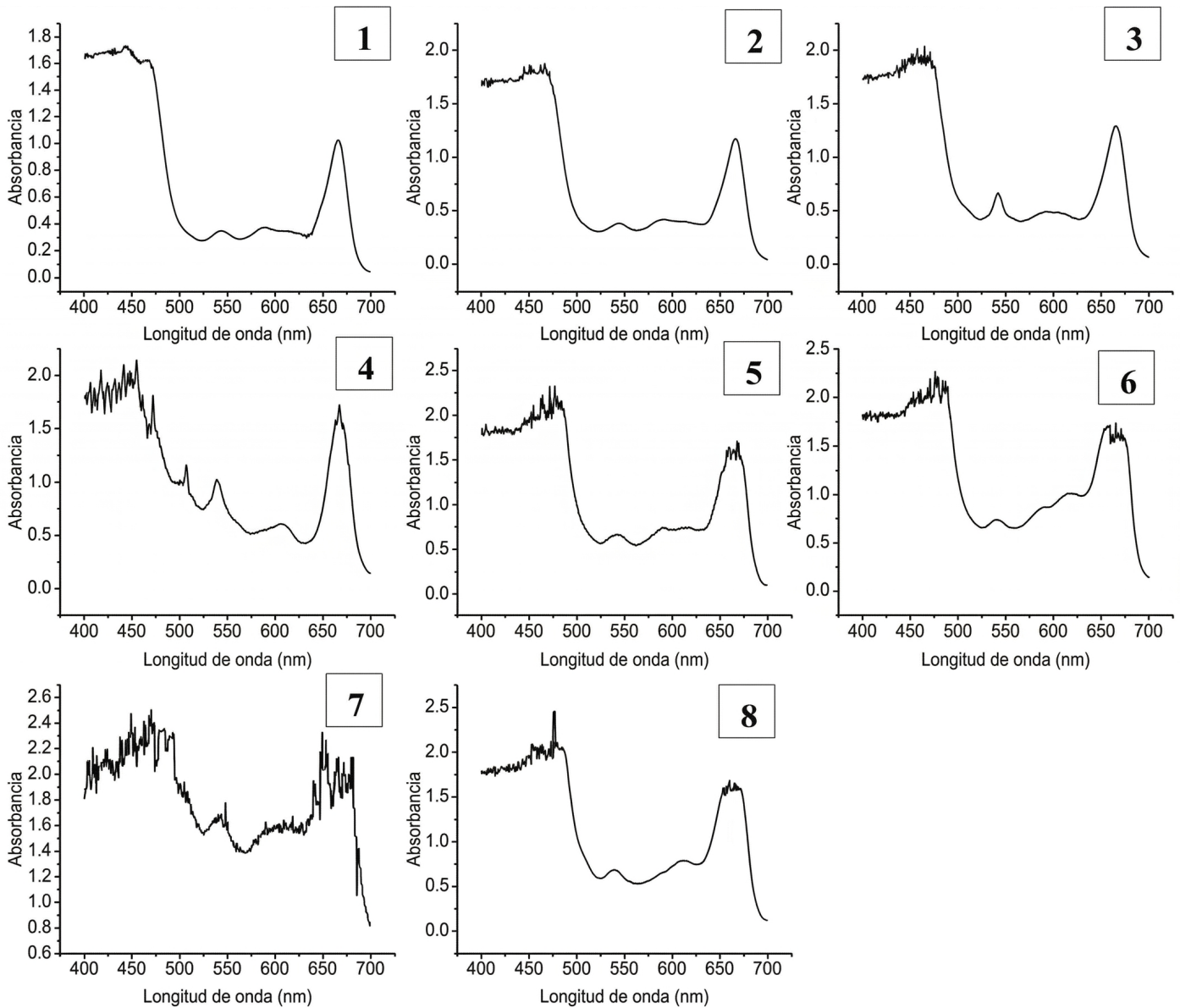
[12] Reyes-Munguía, E. Azúara-Nieto, C. I. Beristain, F. Cruz-Sosa & E. J. Vernon-Carter (2009) Propiedades antioxidantes del maguey morado (*Rhoeo discolor*) Purple maguey (*Rhoeo discolor*) antioxidant properties, *CyTA – Journal of Food*, 7:3, 209–216.

[13] Y. K. Ahlawat, M. Singh, K. Manorama, N. Lakra, A. Zaid, y F. Zulfiqar, “Plant phenolics: neglected secondary metabolites in plant stress tolerance”, *Braz. J. Bot.*, vol. 47, núm. 3, pp. 703–721, 2023. <https://doi.org/10.1007/s40415-023-00949-x>.

[14] N. Yeasmen y V. Orsat, “Green extraction and characterization of leaves phenolic compounds: a comprehensive review”, *Crit. Rev. Food Sci. Nutr.*, vol. 63, núm. 21, pp. 5155–5193, 2023. <https://doi.org/10.1080/10408398.2021.2013771>.

Anexo A. Perfiles espectrofotométricos UV-Vis del extracto de *Rhoeo spathacea* (maguey morado) obtenidos bajo ocho tratamientos de extracción. Cada panel (1-8) corresponde al espectro de absorbancia en el intervalo de 400- 700 nm, asociado a pigmentos fenólicos/antociánicos del extracto de acuerdo a las condiciones descritas en la Tabla 1.

Fuente: Elaboración propia





Bioquímica

y

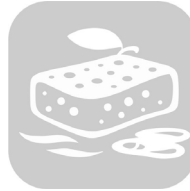
Biológicos

Ingeniantes

Evaluación cualitativa de la cáscara de naranja como material bioabsorbente para la remoción de hidrocarburos ligeros

RESUMEN: Los derrames de hidrocarburos constituyen una problemática ambiental crítica por sus efectos negativos sobre ecosistemas y comunidades en Veracruz, México. En este estudio se evaluó el aprovechamiento de la cáscara de naranja, un residuo agroindustrial abundante, como materia prima para desarrollar una esponja orgánica capaz de absorber hidrocarburos ligeros. La metodología incluyó la recolección, limpieza, secado y trituración de las cáscaras, seguidos de procesos de moldeado y compactación para obtener diferentes prototipos. Además, se elaboró un modelo alternativo tipo “trenzado”. Los resultados obtenidos cualitativamente en escala alto, medio y bajo, con base en el tiempo de absorción, el tiempo de retención del hidrocarburo y la cantidad de hidrocarburo restante observada en la superficie, evidenciaron que los prototipos compactados no lograron la porosidad ni la estabilidad estructural esperadas, ya que tendieron a separarse al contacto con el agua o el hidrocarburo, alcanzando niveles de absorción promedio medio y bajo. En contraste, las cáscaras secas sin triturar y el trenzado mostraron una absorción rápida y eficiente, manteniéndose en la superficie y reteniendo el contaminante, confirmando su potencial como materiales orgánicos absorbentes. Se concluye que, aunque no es posible obtener una esponja orgánica estable sin el uso de aditivos, la cáscara de naranja en su forma natural sí es un material orgánico eficaz para la remoción general de hidrocarburos ligeros. Se recomienda continuar con el desarrollo de métodos alternativos de conformado y la evaluación de aditivos en mínima proporción para mejorar la estabilidad del producto manteniendo su carácter sustentable.

PALABRAS CLAVE: absorción, cáscara de naranja, esponja orgánica, hidrocarburos.



Colaboración

Jesús Iván Ruiz Simón; Karla Ivette Rodríguez Tlapa; Abel Eduardo Meza Martínez; David Reyes González, María Cristina López Méndez, Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico Superior de Misantla.

Fecha de recepción: 12 de diciembre de 2025

Fecha de aceptación: 18 de diciembre de 2025

ABSTRACT: Oil spills are a critical environmental problem due to their negative effects on ecosystems and communities in Veracruz, Mexico. This study evaluated the use of orange peel, an abundant agro-industrial waste product, as a raw material for developing an organic sponge capable of absorbing light hydrocarbons. The methodology included the collection, cleaning, drying, and crushing of the peels, followed by molding and compaction processes to obtain different prototypes. In addition, an alternative “braided” model was developed. The results obtained qualitatively at low, medium, and high scales, based on absorption time, hydrocarbon retention time, and the amount of hydrocarbon remaining on the surface, showed that the compacted prototypes did not achieve the expected porosity or structural stability, as they tended to separate upon contact with water or hydrocarbons, reaching medium/low average absorption levels. In contrast, the dry, uncrushed peels and the braided material showed rapid and efficient absorption, remaining on the surface and retaining the contaminant, confirming their potential as absorbent organic materials. It is concluded that, although it is not possible to obtain a stable organic sponge without the use of additives, orange peel in its natural form is an effective organic material for the removal of light hydrocarbons. It is recommended to continue with the development of alternative forming methods and the evaluation of additives in minimal proportions to improve the stability of the product while maintaining its sustainable nature.

KEYWORDS: absorption, orange peel, organic sponge, hydrocarbons.

INTRODUCCIÓN

En la actualidad, los derrames de hidrocarburos principalmente en ambientes marinos son una de las principales fuentes de contaminación que provocan severos daños ambientales, económicos y sociales en comunidades costeras [1]. Dentro

de las causas de estos se encuentran las fuentes antropogénicas que incluye a las actividades de transporte marítimo como los accidentes, fallas, incendios, etc. [2][3][4], así como a la extracción de petróleo y gas offshore (reventones, fugas, fallas de infraestructura y refinerías) [3][5]. Mientras que en las fuentes naturales incluyen a los huracanes, terremotos, y las filtraciones que se dan en el fondo oceánico [4][6]. En México, los estados de Veracruz y Tabasco presentan más del 50 % de los eventos registrados, lo que evidencia la magnitud del problema [7]. Como estrategia de mitigación, se emplean materiales capaces de degradar o transformar contaminantes mediante procesos de absorción [8]. Estos pueden clasificarse en sintéticos, naturales de origen inorgánico o naturales de origen orgánico [9]. Aunque los materiales sintéticos son los más utilizados, su elevado costo de producción, dificultades en la disposición final y contribución a la contaminación han impulsado la búsqueda de alternativas más sostenibles [10]. Debido a lo anterior, se ha recurrido al uso de materiales de origen orgánico que no son tóxicos ni corrosivos, y que sean activos tras el reciclaje y rentables; entre estos materiales destacan los derivados de residuos agrícolas como las fibras de coco, la corteza del plátano y las cáscaras de naranja [11].

En el ámbito cítrico, la naranja tiene gran importancia a nivel mundial debido a su alta producción [12], sin embargo, su procesamiento en jugo y derivados genera una gran cantidad de bagazo, concretamente cáscaras, residuos de tejidos internos y semillas [13], que, al descomponerse, generalmente en vertederos, contaminan suelos y aguas, lo que ha provocado que en estados como Veracruz se vean seriamente afectados [14]. En particular, gracias a las propiedades que tiene la cáscara, como la celulosa, lignina y limoneno, le dan la cualidad de ser material para la captación de hidrocarburos [11], siendo el limoneno quien posee potentes propiedades disolventes derivados de petróleo [13]. Por lo que su aprovechamiento presenta una alternativa sostenible alineada a los ODS 6, 12, 13 y 14.

Ante este panorama, y con el propósito de responder simultáneamente a la problemática ambiental y al aprovechamiento de residuos agroindustriales, en este estudio se plantea el desarrollo de una esponja orgánica absorbente a base de cáscara de naranja para la remediación de aguas contaminadas por hidrocarburos ligeros en el estado de Veracruz. Esta propuesta busca otorgar un valor agregado al residuo mientras se contribuye a reducir los impactos ambientales asociados. Ver infografía para más información detallada (Anexo A).

MATERIAL Y MÉTODOS

Lugar de ejecución

El presente proyecto se llevó a cabo en el Instituto Tecnológico Superior de Misantla, en el estado de Veracruz.

Método

La metodología empleada se presenta en el diagrama de flujo de la Figura 1, basada en la propuesta por Michael-Igolima et al. (2023). El proceso se dividió en tres etapas principales. La primera correspondió a la recolección y preparación de la cáscara de naranja, contemplando su acondicionamiento para ser utilizada como materia prima. La segunda etapa consistió en la elaboración de la esponja orgánica mediante técnicas de moldeado y compresión, con el fin de obtener prototipos estructuralmente estables. Finalmente, en la tercera etapa se llevó a cabo la evaluación de la capacidad de absorción de los prototipos, de lo contrario se debía ajustar las condiciones iniciales de elaboración, con el propósito de determinar su funcionalidad. En caso de que los resultados fueran desfavorables, se consideró la posibilidad de ajustar y mejorar el proceso.

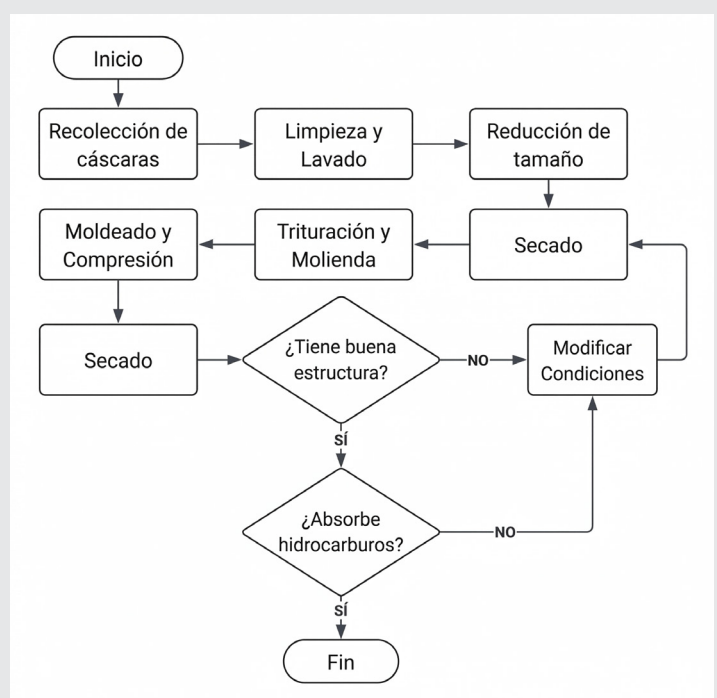


Figura 1. Diagrama de flujo de la metodología empleada. Fuente: Elaboración propia.

Recolección y preparación de la cáscara de naranja para su uso como materia prima absorbente

Se utilizaron cáscaras de naranja dulce de la variedad Marrs (Citrus sinensis), recolectadas en la localidad de Troncones, perteneciente al municipio de Misantla, Veracruz. Las cáscaras fueron sometidas a un proceso inicial de limpieza, durante el cual se retiró la materia orgánica no deseada y se lavaron con abundante agua para asegurar la eliminación de impurezas. Posteriormente, se cortaron 500g en trozos de tamaño medio y se procedió a su secado en un horno de convección marca Ecoshel, modelo 9023A, durante 24 horas a una temperatura de 60 °C. Además de este secado controlado, otras muestras de cáscaras se dejaron reposar a temperatura ambiente durante 5 días con el fin de garantizar una deshidratación uniforme.

Una vez secas, las cáscaras fueron trituradas utilizando un Molino Pulverizador Eléctrico para Granos Secos modelo 800C, obteniéndose partículas de distintas granulometrías (Figura 2). Con el objetivo de elaborar un prototipo adicional, la cáscara triturada fue sometida a un proceso de cribado, en el cual la muestra se hizo pasar por un tamiz No. 50, logrando partículas con un tamaño aproximado de 300 µm.



Figura 2. Recolección y preparación de las cáscaras de naranja.

Fuente: Elaboración propia.

Elaboración de un prototipo de la esponja orgánica absorbente utilizando cáscaras de naranja

Las cáscaras previamente trituradas se colocaron en cantidades de 50 o 100 g dentro de un molde de acero con dimensiones de 10 x 10cm. Posteriormente, se realizó la compactación del material orgánico empleando una prensa hidráulica manual, aplicando una presión de 44.51 MPa para conformar el prototipo. Una vez obtenido el bloque compactado, la esponja orgánica fue retirada cuidadosamente del molde y sometida a un proceso de secado durante 5 minutos, con el fin de estabilizar su estructura y eliminar la humedad superficial (Figura 3). Esto se realizó por duplicado.



Figura 3. Diseño y elaboración de la esponja.

Fuente: Elaboración propia.

Trenzado

Derivado de las modificaciones realizadas a la metodología previamente descrita, se propuso la elaboración de productos alternativos, entre ellos un modelo denominado "trenzado", cuyo proceso de obtención se detalla a continuación (Figura 4).

Las cáscaras fueron sometidas a la eliminación manual del exceso de tejido aún adherido, tras lo cual se lavaron con abundante agua para retirar completamente los residuos de tierra y otras impurezas. Después, utilizando tijeras, las cáscaras se cortaron en forma de tiras uniformes con el fin de facilitar su manipulación. Estas tiras se colocaron en agua hirviendo durante 10 minutos, proceso que permitió ablandarlas y mejorar su flexibilidad para las etapas siguientes. Una vez retiradas del fuego, se escurrieron y se dejaron enfriar a temperatura ambiente. Cuando alcanzaron la consistencia adecuada, se seleccionaron tres tiras y se procedió a entrelazarlas cuidadosamente para formar una trenza.

Posteriormente, la trenza se enrolló de manera circular para dar forma al prototipo. Esta estructura fue asegurada con hilo y aguja para mantener su cohesión y evitar que se deshiciera durante el secado o la manipulación. Finalmente, las piezas se dejaron secar a temperatura ambiente durante unos minutos para eliminar el exceso de humedad superficial, y posteriormente se colocaron en un horno a 60 °C durante 24 horas para completar el proceso de deshidratación y estabilización estructural.

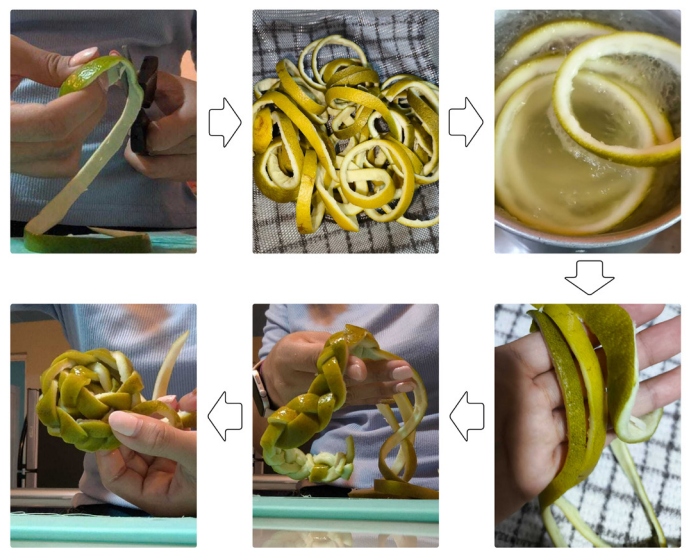


Figura 4. Proceso de trenzado de las cáscaras.

Fuente: Elaboración propia.

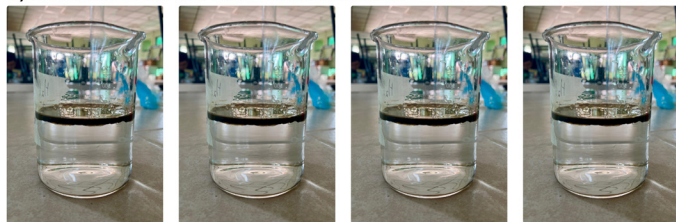
Evaluación de la capacidad de absorción frente a hidrocarburo ligero en condiciones controladas de laboratorio

Para determinar la estabilidad de la estructura y la capacidad de absorción se realizó una simulación de derrame en un ambiente controlado de laboratorio,

creando una capa de hidrocarburo de 5 mL sobre la superficie de 150 mL de agua (Figura 5a). Para la prueba principal, se preparó una muestra de la esponja orgánica cortando un fragmento de 3 x 3 cm, el cual fue pesado y posteriormente colocado sobre la superficie de la suspensión, dejándolo actuar durante 5 minutos (Figura 5b). Una vez transcurrido el tiempo establecido, la muestra fue retirada del sistema experimental.

Además, se ejecutaron pruebas de absorción en diferentes materiales obtenidos durante el proceso. En primer lugar, se pesaron 5 g de cáscaras secas sin triturar y se sometieron a la misma simulación (Figura 5c). Posteriormente, se pesó el prototipo trenzado y se evaluó bajo las mismas condiciones (Figura 5d). Finalmente, se pesaron 5 g de polvo de cáscara y se aplicó la prueba correspondiente (Figura 5e). Si la evaluación fue desfavorable se modificaron las condiciones iniciales del proceso.

a) Simulación de derrame en laboratorio



b) Prototipo Esponja

c) Cáscaras secas

d) Trenzado

e) Polvo de cáscara

Figura 5. Pruebas de absorción: a) prototipo de esponja b) cáscaras secas sin triturar, c) cáscaras secas trenzadas, y d) polvo de cáscaras secas.

Fuente: Elaboración propia.

RESULTADOS

Esta sección se divide en dos apartados, el primero se enfoca en mostrar el resultado del diseño de esponja orgánica a partir de cáscaras de naranja y el segundo apartado presenta el análisis cualitativo del comportamiento de absorción de hidrocarburo ligero, en diferentes configuraciones de interacción material absorbente – hidrocarburo.

Diseño prototipo de la esponja orgánica

En la Figura 6 se presenta uno de los prototipos de esponja obtenidos durante el proceso experimental.

En cuanto a su estructura, los resultados no fueron los esperados. Los prototipos desarrollados mostraron una porosidad limitada, ya que su superficie presentó

un alto grado de compactación que impidió la formación de poros visibles, a diferencia de lo observado en una esponja doméstica convencional. A pesar de esta compactación, los materiales exhibieron una dureza semirrígida que les otorgó resistencia a la rotura, aunque al aplicar presión se percibieron relativamente suaves.



Figura 6. Prototipo de esponja elaborada a partir de las cáscaras de naranja secas.

Fuente: Elaboración propia.

La textura obtenida fue predominantemente rugosa y fibrosa, con la posibilidad de considerarse porosa dependiendo de su capacidad de absorción.

Respecto al color, los prototipos conservaron la tonalidad natural de la cáscara utilizada como materia prima. Tras el procesamiento, se observó una gama de tonos amarillos que variaron ligeramente entre cada muestra. En relación con el olor, el material final presentó un aroma natural con un matiz cítrico tenue, propio del origen del residuo empleado.

Finalmente, el espesor de los prototipos osciló entre 0.5 y 1.0 cm. Este parámetro estuvo determinado directamente por la cantidad de materia compactada y por la presión aplicada durante el proceso de conformado.

Absorción

En la Tabla 1 se presentan los resultados cualitativos, identificando únicamente si los prototipos y las muestras evaluadas mostraron capacidad de absorción del hidrocarburo ligero. Para determinar el nivel de efectividad, se empleó una escala visual de tres categorías: (bajo, medio y alto), tomando en cuenta el tiempo requerido para la absorción, la capacidad de retención del hidrocarburo (HC) y la cantidad de HC observada en la superficie del matraz al finalizar cada prueba.

Alto: absorción rápida con un tiempo de retención mayor a 5 min y disminución de superficie contaminada.

Medio: absorción lenta con un tiempo de retención menor a 5 min y disminución de superficie contaminada.

Bajo: absorción lenta con un tiempo de retención menor a 1 min y superficie totalmente contaminada.

Tabla 1. Resultados de la evaluación de la capacidad de absorción de hidrocarburo ligero en los distintos prototipos y muestras analizadas.

| Muestra | Nivel de absorción |
|--------------------------|--------------------|
| Esponja orgánica | Medio/Bajo |
| Cáscaras secas | Alto |
| Cáscaras secas trenzadas | Alto |
| Polvo de cáscaras | Bajo |

Fuente: Elaboración propia.

Prototipo compactado y prototipo tamizado: El prototipo de esponja logró absorber el hidrocarburo de manera inicial, encapsulándolo en los poros generados durante el proceso de compactación. No obstante, la absorción fue lenta y la retención insuficiente. Al saturarse, la estructura perdió cohesión y comenzó a descender en el matraz. En contacto con el agua, el material se desintegró, liberando nuevamente el hidrocarburo, lo que compromete su funcionalidad. Estas características coinciden con reportes que señalan que materiales lignocelulósicos altamente compactados pierden permeabilidad y se desestabilizan cuando no se utilizan agentes aglutinantes o tratamientos térmicos específicos [15]. El prototipo elaborado con material tamizado mostró aún menor eficiencia. Su absorción fue mínima y tardía, y la estructura se deshizo rápidamente por su granulometría fina, comportándose de manera similar a materiales vegetales sin cohesión estructural reportados en la literatura [17]. Por estas razones, ambos prototipos se clasificaron con un nivel de absorción medio / bajo.

Cáscaras secas: Las cáscaras sin triturar presentaron una absorción rápida y eficiente, manteniéndose en la superficie incluso después de saturarse. Su flotabilidad y retención del contaminante se explican por su estructura lignocelulósica porosa, rica en celulosa, lignina y limoneno, compuestos asociados a la afinidad oleofílica y a la resistencia mecánica en medios líquidos. Estos resultados coinciden con estudios previos donde la cáscara de naranja se identifica como un absorbente natural de alto rendimiento para hidrocarburos [9][11][15][16]. Por ello se les asignó un nivel de absorción alto.

Cáscaras secas trenzadas: El prototipo trenzado, elaborado también con cáscaras secas, mostró un comportamiento similar al de las cáscaras naturales: absorción rápida, buena retención y flotabilidad. Adicionalmente, la estructura entrelazada generó mayor cohesión, reduciendo la dispersión del material y permitiendo manipulación más eficiente. Con base en lo anterior, se clasificó con un nivel de absorción alto, lo que lo convierte en un subproducto viable para desarrollos futuros.

Polvo de cáscara: Finalmente, el polvo de cáscara presentó una absorción limitada. Su granulometría fina pro-

vocó que el material se hundiera rápidamente, arras-trando consigo una mínima cantidad de hidrocarburo que posteriormente retornó a la superficie al liberar el contaminante. Este comportamiento es consistente con estudios que señalan que partículas extremada-mente finas pierden flotabilidad y capacidad de adhe-sión oleofílica [17]. En consecuencia, su desempeño fue clasificado como bajo.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos al Laboratorio de Bioquímica, al Labo-ratorio de Petrolera y al Centro de Ecobaldosas per-tenecientes al Instituto Tecnológico Superior de Mi-santla, por su colaboración y disposición en el uso de los equipos.

CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos permiten establecer que las cáscaras de naranja pueden funcionar como un mate-rial orgánico absorbente para contaminantes, particu-larmente hidrocarburos ligeros. No obstante, su proce-samiento para la elaboración de una esponja orgánica presenta dificultades importantes, especialmente en lo referente a mantener la integridad estructural del mate-rial al entrar en contacto con el hidrocarburo y/o con el agua. Con base en las pruebas realizadas, se concluye que no es posible obtener una esponja orgánica esta-ble bajo condiciones completamente naturales, es de-cir, sin el empleo de algún agente químico o aditivo; aun así, el material conserva cierta capacidad de absorción.

Aunque el prototipo trenzado no constituyó el objetivo principal de este estudio, su comportamiento y carac-terísticas permiten considerarlo como un posible sub-producto. Por ello, se propone continuar con su desa-rrollo para evaluar su potencial como una estructura absorbente tipo esponja. Por otro lado, si bien el polvo de cáscara no mostró efectividad para absorber hidro-carburos ligeros, podría presentar un mejor desempe-ño frente a otros tipos de hidrocarburos, por lo que será necesario realizar pruebas adicionales para determinar su alcance y aplicabilidad.

Recomendaciones: Se recomienda continuar con in-vestigaciones que incluyan diferentes métodos de elaboración e incorporar aditivos en proporciones míni-mas, de manera que se preserve la sustentabilidad del producto final sin comprometer su funcionalidad.

BIBLIOGRAFÍA

[1] Beyer, J., Trannum, H. C., Bakke, T., Hodson, P. V., & Collier, T. K. (2016). *Environmental effects of the Deepwater Horizon oil spill: A review. Marine Pollution Bulletin*, 110(1), 28-51.

[2] Monteiro, C. B., Oleinik, P., Leal, T. F., de Paula Kirinus, E., Júnior, E. E. T., Marques, W., & Lopes, B. C. (2020). *Susceptibility to oil spill spreading using case studies and simulated scenarios. En-*

vironmental pollution (Barking, Essex: 1987), 267, 115451.

[3] Abdallah, I. M., & Chantsev, V. Y. U. (2022). Modeling marine oil spill trajectory and fate off Hurgada, Red Sea Cost, Egypt. *Egyptian Journal of Aquatic Biology and Fisheries*, 26(6), 41–61.

[4] Burgherr, P. (2007). In-depth analysis of accidental oil spills from tankers in the context of global spill trends from all sources. *Journal of Hazardous Materials*, 140(1–2), 245–256.

[5] Lednicka, B., Otremba, Z., & Piskozub, J. (2023). Modelling the upwelling radiance detected in a seawater column for oil-in-water emulsion tracking. *Scientific Reports*, 13(1), 23098.

[6] Quigley, C., Brekke, C., & Eltoft, T. (2020). Comparison between dielectric inversion results from synthetic aperture radar co-and quad-polarimetric data via a polarimetric two-scale model. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 60, 1–18.

[7] Ramírez, P. (2025, 21 marzo). Pemex registra 270 derrames y fugas de alto impacto ambiental de 2018 a 2024. Casa Cultura Media. Recuperado el 02 de octubre de 2025 desde: <https://causanaturamedia.com/es/notas/pemex-registra-270-derrames-y-fugas-de-alto-impacto-ambiental-de-2018-a-2024>

[8] Ferrera-Cerrato, R., Rojas-Avelizapa, N. G., Poggi-Varaldo, H. M., Alarcón, A., & Cañizares-Villanueva, R. O. (2006). Procesos de biorremediación de suelo y agua contaminados por hidrocarburos del petróleo y otros compuestos orgánicos. *Revista Latinoamericana de Microbiología*, 48(2), 179–187.

[9] Gheriany, I. A., Ahmad El Saqa, F., Abd El Razek Amer, A., & Hussein, M. (2020). Oil spill sorption capacity of raw and thermally modified orange peel waste. *Alexandria Engineering Journal*, 59(2), 925–932.

[10] Al-Majed, A. A., Adebayo, A. R., & Hossain, M. E. (2012). A sustainable approach to controlling oil spills. *Journal of Environmental Management*, 113, 213–227.

[11] Michael-Igolima, U., Abbey, S. J., Ifelebuegu, A. O. & Eyo, E. U. (2023). Modified Orange Peel Waste as a Sustainable Material for Adsorption of Contaminants. *Materials*, 16, 1092.

[12] Zema, D. A., Calabrò, P. S., Folino, A., Tamburino, V., Zappia, G. & Zimbone, S. M. (2018). Valori-

sation of citrus processing waste: A review. *Waste Management*, 80, 252–273.

[13] Sharma, K., Mahato, N., & Lee, Y. R. (2018). Extraction, characterization and biological activity of citrus flavonoids. *Reviews in Chemical Engineering*, 35(2), 265–284.

[14] Galindo-Segura, L. A., Pérez-Vázquez, A., Ramírez-Martínez, A., López-Romero, G., & Gómez-Merino, F. C. (2023). El Manejo del Bagazo de Naranja en la Zona Centro del Estado de Veracruz. *Terra Latinoamericana*, 41, 1–8. e1673.

[15] Singh, A. K., Ketan, K. & Singh, J. K. (2017). Simple and green fabrication of recyclable magnetic highly hydrophobic sorbents derived from waste orange peels for removal of oil and organic solvents from water surface. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 5(5), 5250–5259.

[16] Hernández-San-Juan, C. E., Méndez-Hernández, M. L., Cruz-Rivero, L., Ángeles-Herrera, D. & Hernández-Lorenzo, F. (2021). Desarrollo de un compuesto reforzado con fibra de cáscara de naranja con la metodología Triz. *Revista Interdisciplinaria de Ingeniería Sustentable y Desarrollo Social*. ISSN 2448-8003.

[17] Doshi, B., Sillanpää, M., & Kalliola, S. (2018). A review of bio-based materials for oil spill treatment. *Water Research*, 135, 262–277.



DERRAMES DE HIDROCARBUROS

CAUSAS Transporte marítimo e infraestructura, fugas en ductos, vaciados ilegales, naufragios, extracción y transporte inadecuado.

Fuentes naturales: huracanes, terremotos y filtraciones naturales.

CONTAMINACIÓN

BARRILES DERRAMADOS 2000-2024

| | |
|-----------|-----|
| 2000-2006 | 288 |
| 2006-2012 | 166 |
| 2012-2018 | 11 |
| 2018-2024 | 15 |

Miles de barriles diarios

Fuente: Centro de Coordinación y Apoyo a Emergencias (CCAEE)

Estados de México con mayor afectación:

VERACRUZ 50.7%

TABASCO

En los últimos años han ocurrido graves derrames que han contaminado los diferentes cuerpos de agua cercanos.

CONSECUENCIAS

- Pérdida de biodiversidad
- Impacto en salud, economía y seguridad alimentaria
- Pérdida de la fauna marina

ALTERNATIVAS DE LIMPIEZA ...

LOS MATERIALES ABSORBENTES

| Sintéticos | Inorgánicos | Orgánicos |
|---|--|---|
| <ul style="list-style-type: none"> Espumas de Poliuretano Alto costo de producción Residuo contaminante No biodegradables | <ul style="list-style-type: none"> Caña de azúcar Kapak Algodón Reciclables y rentables No corrosivos No tóxicos | <ul style="list-style-type: none"> Cáscaras de frutas Arroz GRAN POTENCIAL |

ASÍ NACE

CITRUSPONGE

ESPONJA ABSORBENTE A BASE DE CÁSCARAS DE NARANJA

PARA MITIGAR LOS DERRAMES DE HIDROCARBUROS

BUSCAR SER: **ECONÓMICA, SOSTENIBLE Y BIODEGRADABLE** ALINEADA A LOS ODS

6 AGUA LIMPIA Y SANEAMIENTO 12 PRODUCCIÓN Y CONSUMO RESPONSABLES

LA CÁSCARA DE NARANJA DE DESECHO A INNOVACIÓN

PRODUCCIÓN NARANJAS - 2024

México: +4.8 millones de ton.

| Estado | Toneladas de naranja |
|-----------------|----------------------|
| Veracruz | 2 575 414 |
| Tamaulipas | 520 467 |
| San Luis Potosí | 373 597 |
| Puebla | 379 102 |
| Nuevo León | 264 976 |

Fuente: Anuario Estadístico de la Producción Agrícola del SIAP 2024

DESTINOS

- Consumo doméstico
- Consumo industrial genera 300 000 TON*
- Semillas 10%
- BAZAJO 40-55%
- Tejidos internos 30-35%
- PRODUCCIÓN ANUAL 32 MILLONES** DE TONELADAS

Terminan en rellenos sanitarios, generando problemas de manejo de desechos.

CAPACIDAD DE ABSORCIÓN

Su estructura fibrosa aumenta la absorción.

3 - 5 MG/G

APROVECHAMIENTO

TRANSFORMAR UN RESIDUO ABUNDANTE EN UN RECURSO FUNCIONAL

CELULOSA **Hemicelulosa** **Lignina** **Pectina**

13 ACCIÓN POR EL CLIMA 14 VIDA SUBMARINA

Fuente: Elaboración propia.



Ciencias *de la* Computación

Ingeniantes

Caracterización de la topografía superficial de polímeros con potencial triboeléctrico mediante Microscopía de Fuerza Atómica

RESUMEN: Los nanogeneradores triboeléctricos (TENG) representan una alternativa prometedora para la generación de energía verde a partir de estímulos mecánicos de baja frecuencia. Su desempeño depende tanto de la afinidad electrónica de los materiales como de su topografía a escala nanométrica. En este estudio, bajo un enfoque descriptivo y comparativo, se caracterizó la rugosidad superficial de politetrafluoroetileno (PTFE), silicona y polipropileno (PP) mediante Microscopía de Fuerza Atómica (AFM) en modo "tapping", realizando escaneos de $10\ \mu\text{m} \times 10\ \mu\text{m}$ y calculando los parámetros de rugosidad promedio (R_a) y rugosidad cuadrática media (R_q). Los resultados mostraron que el PTFE presentó los valores más elevados ($R_a = 131\ \text{nm}$; $R_q = 164\ \text{nm}$), seguido del PP ($R_a = 84.1\ \text{nm}$; $R_q = 105\ \text{nm}$), mientras que la silicona registró la menor rugosidad ($R_a = 27.4\ \text{nm}$; $R_q = 34.3\ \text{nm}$). Estas diferencias topográficas evidencian que la rugosidad superficial constituye un parámetro físico relevante en la estimación del potencial triboeléctrico. El principal aporte del estudio radica en demostrar que el análisis cuantitativo de rugosidad mediante AFM complementa la serie triboeléctrica como criterio de selección de materiales, fortaleciendo el diseño de TENGs para la generación de energía sustentable.

PALABRAS CLAVE: Nanogeneradores triboeléctricos; Microscopía de Fuerza Atómica; Rugosidad superficial; Polímeros; Energía verde.



Colaboración

Antia Ivett Álvarez Bernabé, Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico de Misantla; Agustín Leobardo Herrera May, Centro de investigación en micro y nanotecnología; María Cristina López Méndez, Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico de Misantla, Juan Vicente Méndez Méndez; Israel Arzate Vázquez, Centro de Nanociencias y Micro y nanotecnologías

Fecha de recepción: 12 de diciembre de 2025

Fecha de aceptación: 18 de diciembre de 2025

ABSTRACT: Triboelectric nanogenerators (TENGs) represent a promising alternative for generating green energy from low-frequency mechanical stimuli. Their performance depends on both the electron affinity of the materials and their topography at the nanoscale. In this study, using a descriptive and comparative approach, the surface roughness of polytetrafluoroethylene (PTFE), silicone, and polypropylene (PP) was characterized by Atomic Force Microscopy (AFM) in tapping mode, performing $10\ \mu\text{m} \times 10\ \mu\text{m}$ scans and calculating the average roughness (R_a) and root mean square roughness (R_q) parameters. The results showed that PTFE exhibited the highest values ($R_a = 131\ \text{nm}$; $R_q = 164\ \text{nm}$), followed by PP ($R_a = 84.1\ \text{nm}$; $R_q = 105\ \text{nm}$), while silicone registered the lowest roughness ($R_a = 27.4\ \text{nm}$; $R_q = 34.3\ \text{nm}$). These topographical differences demonstrate that surface roughness is a relevant physical parameter in estimating triboelectric potential. The main contribution of this study lies in showing that quantitative roughness analysis using AFM complements the triboelectric series as a material selection criterion, strengthening the rational design of portable TENGs geared towards sustainable energy generation.

KEYWORDS: Triboelectric nanogenerators; Atomic Force Microscopy; Surface roughness; Polymers; Green energy.

INTRODUCCIÓN

Los nanogeneradores triboeléctricos (TENG) se han consolidado como una alternativa emergente para la generación de energía verde a partir de movimientos mecánicos de baja frecuencia, tales como vibraciones, presión o fricción superficial. Su principio de funcionamiento se basa en la electrificación por contacto y separación entre materiales con distinta afinidad electrónica, siendo su desempeño altamente dependiente tanto de la naturaleza química como de las propiedades físicas de las superficies involucradas.

Selección de materiales

Se analizaron tres materiales poliméricos con potencial aplicación en nanogeneradores triboeléctricos (TEG):

- Politetrafluoroetileno (PTFE)
- Silicona
- Polipropileno (PP)

La selección se realizó considerando su posición en la serie triboeléctrica y su uso frecuente en dispositivos de recolección de energía mecánica.

Preparación de muestras

Las muestras fueron sometidas a limpieza básica para eliminar contaminantes superficiales y posteriormente fijadas sobre el portamuestras del equipo de Microscopía de Fuerza Atómica.

Condiciones de operación del AFM

La caracterización topográfica se realizó mediante una microscopía de fuerza atómica (AFM) marca Bruker en modo tapping (modo intermitente), utilizando:

- Punta modelo RTESPA-300 (MPP-11120)
- Cantilever de silicio
- Radio nominal de punta < 10 nm
- Frecuencia de resonancia aproximada ~300 kHz
- Constante de fuerza aproximada ~40 N/m

Para cada material se realizaron escaneos en áreas de:

- 10 μm \times 10 μm
- Resolución de imagen: 512 \times 512 píxeles
- Velocidad de escaneo: 0.5 Hz

Se obtuvieron mapas topográficos tridimensionales de cada superficie.

A partir de las imágenes topográficas se calcularon:

- Rugosidad promedio aritmética (R_a)
- Rugosidad cuadrática media (R_q)

Ambos parámetros fueron expresados en nanómetros (nm) y determinados mediante el software de análisis del equipo.

Análisis de datos

El análisis de los resultados se realizó de manera descriptiva y comparativa, evaluando las diferencias en topografía superficial entre los polímeros y su posible relación con el comportamiento triboeléctrico esperado de acuerdo a la literatura.

Debido al carácter exploratorio del estudio y al número limitado de muestras analizadas, no se aplicaron pruebas estadísticas inferenciales, enfocándose el análisis en la interpretación comparativa de los parámetros de rugosidad.

RESULTADOS

La caracterización topográfica mediante AFM permitió identificar diferencias estructurales significativas entre las superficies poliméricas analizadas. La Figura 2 muestra que el PTFE presenta una morfología con picos alineados y mesetas elongadas, lo que sugiere

una distribución anisotrópica de alturas superficiales. Este tipo de topografía puede incrementar el número de microcontactos efectivos durante la fricción, favoreciendo la acumulación y redistribución de carga en la interfaz como menciona Xiao et al. en su revisión [8].

En contraste, la Figura 3 revela que la silicona exhibe una superficie con baja amplitud topográfica y distribución homogénea de alturas, lo que indica una menor dispersión de asperezas activas. Desde el punto de vista tribológico, una superficie más lisa reduce la variabilidad del contacto, pero también puede disminuir la densidad de sitios activos para electrificación.

La Figura 4 muestra que el polipropileno presenta picos aislados y morfología irregular, lo que podría inducir concentración localizada de esfuerzos mecánicos y generación puntual de carga, aunque con menor uniformidad espacial [2].

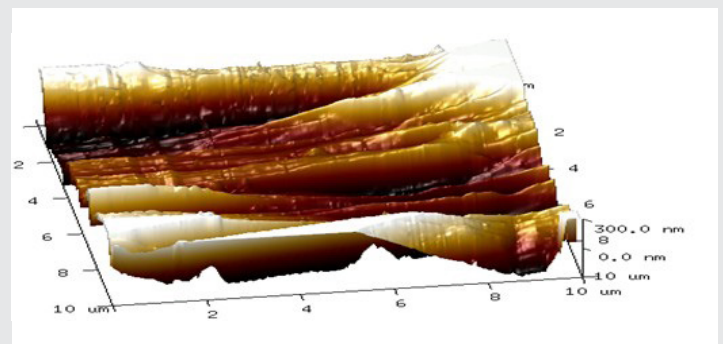


Figura 2. Topografía de una muestra de PTFE.

Fuente: Elaboración propia.

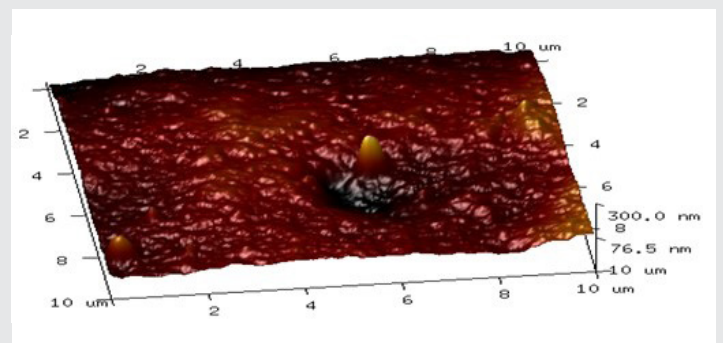


Figura 3. Topografía de una muestra de silicona.

Fuente: Elaboración propia.

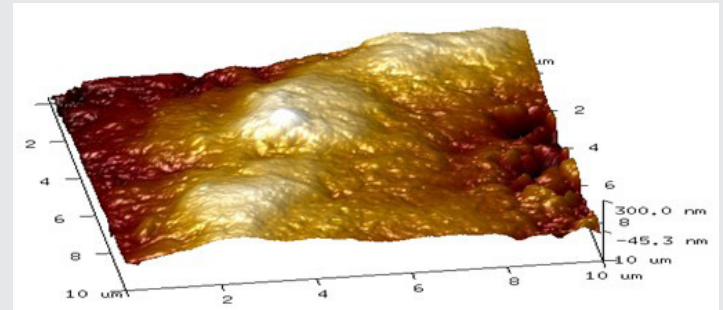


Figura 4. Topografía de una muestra de polipropileno.

Fuente: Elaboración propia.

El análisis cuantitativo confirmó estas observaciones. El PTFE registró los valores más altos de rugosidad ($R_a = 131$ nm, $R_q = 164$ nm), seguido del PP ($R_a = 84.1$ nm, $R_q = 105$ nm). En contraste, la silicona presentó los valores más bajos ($R_a = 27.4$ nm, $R_q = 34.3$ nm), indicando una superficie más homogénea como se muestra en la Tabla 1.

Tabla 1. Parámetros de rugosidad.

| Rugosidad R_a y R_q de los polímeros. | | |
|---|------------|------------|
| Material | R_a (nm) | R_q (nm) |
| PTFE | 131 | 164 |
| Silicona | 27.4 | 34.3 |
| PP | 84.1 | 105 |

Fuente: Elaboración propia.

El valor elevado de R_q en PTFE indica una mayor dispersión de alturas, lo que sugiere presencia de picos prominentes que incrementan el área de contacto bajo deformación mecánica. De acuerdo a modelos de contacto superficial (teoría de Greenwood-Williamson), un aumento en la rugosidad puede incrementar la fracción real de contacto respecto al área aparente, lo cual impacta directamente en la transferencia de electrones durante la electrificación por fricción [9].

Estudios han demostrado que la densidad de carga superficial (σ) puede correlacionarse con el área de contacto, la cual depende de la topografía nanométrica [10]. En este sentido, la mayor rugosidad del PTFE podría favorecer un incremento en la generación de carga triboeléctrica, particularmente considerando su posición negativa en la serie triboeléctrica.

Por otro lado, la silicona, al presentar valores bajos de R_a y R_q , ofrece un contacto más uniforme y mecánicamente estable, lo cual puede ser ventajoso en aplicaciones flexibles donde la repetibilidad del ciclo contacto-separación es prioritaria sobre la máxima de carga generada.

El PP mostró un comportamiento intermedio, donde la presencia de asperezas irregulares podría generar puntos de alta concentración de carga, pero con menor eficiencia global debido a la heterogeneidad del contacto.

Desde una perspectiva topográfica, la generación de carga en TENGs depende de:

1. Afinidad electrónica relativa (serie triboeléctrica).
2. Área de contacto.
3. Capacidad de retención superficial de carga.

El presente análisis sugiere que la rugosidad superficial medida mediante AFM puede actuar como parámetro complementario a la serie triboeléctrica para predecir el desempeño potencial del material.

Si bien los resultados corresponden a escaneos representativos, la tendencia observada establece una jerarquía topográfica clara: PTFE > PP > Silicona lo cual coincide con lo reportado en literatura respecto a la influencia de la morfología superficial en la densidad de carga interfacial.

CONCLUSIONES

La caracterización mediante Microscopía de Fuerza Atómica evidenció diferencias claras en la rugosidad superficial de los polímeros analizados, confirmando que este parámetro influye en el potencial triboeléctrico del material. El PTFE destacó por combinar alta rugosidad y afinidad electrónica favorable, posicionándose como el candidato con mayor potencial para aplicaciones en TENG. La silicona mostró ventajas en estabilidad de contacto para sistemas flexibles, mientras que el PP presentó un comportamiento intermedio.

El principal aporte del estudio radica en demostrar que el análisis cuantitativo de rugosidad mediante AFM complementa la serie triboeléctrica como criterio de selección de materiales, proponiendo una estrategia metodológica que fortalece el diseño racional de nanogeneradores triboeléctricos orientados a la generación de energía sustentable.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos al CNMN-IPN, MICRONA-UV, TECNM Campus Misantla y a la SECIHTI por el apoyo brindado para la realización de este trabajo.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Q. Chen et al., "Quantifying triboelectric series of polymers based on the measurement of triboelectrification with NaCl solution," *Chemical Engineering Journal*, vol. 488, p. 150871, May 2024, doi: 10.1016/j.cej.2024.150871.
- [2] L.-X. Wu et al., "Interfacial Charge Transfer Mechanism and Output Characteristics of Identical-Material Triboelectric Nanogenerators," *Nanomaterials*, vol. 15, no. 10, p. 708, May 2025, doi: 10.3390/nano15100708.
- [3] T. P. Rahul and P. S. R. Sreekanth, "Synergies in Materials and Manufacturing: A Review of Composites and 3D Printing for Triboelectric Energy Harvesting," *Journal of Composites Science*, vol. 9, no. 8, p. 386, Jul. 2025, doi: 10.3390/jcs9080386.
- [4] Y. Kim et al., "Atomic Force Microscopy for Ferroelectric Materials Research," *J. Mater. Chem. C Mater.*, 2026, doi: 10.1039/D5TC03998C.

[5] S. Dinarelli, A. Sikora, A. Sorbo, M. Rossi, and D. Passeri, "Atomic force microscopy as a tool for mechanical characterization at the nanometer scale," *Nanomaterials and Energy*, vol. 12, no. 2, pp. 71–80, Jul. 2023, doi: 10.1680/jnaen.23.00016.

[6] N. Wang and X. Zhao, "Atomic Force Microscopy – A Powerful Tool for Studying Contact Electrification," *Adv. Mater. Technol.*, vol. 8, no. 6, Mar. 2023, doi: 10.1002/admt.202201408.

[7] Y. Li et al., "Roughness-driven compressive sensing AFM for accurate nanoscale surface characterization in functional material systems," *Mater. Des.*, vol. 256, p. 114351, Aug. 2025, doi: 10.1016/j.matdes.2025.114351.

[8] K. Xiao, W. Wang, K. Wang, H. Zhang, S. Dong, and J. Li, "Improving Triboelectric Nanogenerators Performance Via Interface Tribological Optimization: A Review," *Adv. Funct. Mater.*, vol. 34, no. 39, Sep. 2024, doi: 10.1002/adfm.202404744.

[9] J. Wen, H. He, C. Niu, M. Rong, Y. Huang, and Y. Wu, "An improved equivalent capacitance model of the triboelectric nanogenerator incorporating its surface roughness," *Nano Energy*, vol. 96, p. 107070, Jun. 2022, doi: 10.1016/j.nanoen.2022.107070.

[10] P. I. Brăileanu and N. E. Pascu, "Influence of Surface Texture in Additively Manufactured Biocompatible Materials and Triboelectric Behavior," *Materials*, vol. 18, no. 14, p. 3366, Jul. 2025, doi: 10.3390/ma18143366.





Ciencias
de la
Computación

Ingeniantes

Monitoreo regional del estrés hídrico en cultivos de cítricos mediante imágenes hiperespectrales Prisma e Inteligencia Artificial en el centro-norte de Veracruz

RESUMEN: El estrés hídrico constituye uno de los principales factores que afectan la productividad y sostenibilidad de los cultivos de cítricos en regiones con alta variabilidad climática. En el centro-norte del estado de Veracruz, México, la disponibilidad irregular de agua ha incrementado la vulnerabilidad de estos sistemas agrícolas, haciendo necesaria la implementación de herramientas de monitoreo más eficientes. En este trabajo se propone una metodología para el análisis del estrés hídrico en cultivos de cítricos mediante el uso de imágenes hiperespectrales del satélite PRISMA y técnicas de inteligencia artificial. La metodología contempla la adquisición de datos hiperespectrales en los rangos VNIR y SWIR, su preprocesamiento, la generación de índices espectrales sensibles al contenido de agua y la aplicación de modelos de aprendizaje profundo para la identificación de patrones asociados al estrés hídrico. Como resultados esperados, se plantea la obtención de mapas temáticos que permitan identificar zonas con distintos niveles de estrés hídrico a escala regional. El enfoque propuesto busca contribuir al desarrollo de herramientas de agricultura de precisión orientadas a una gestión más eficiente del recurso hídrico y al fortalecimiento de la producción citrícola sostenible.

PALABRAS CLAVE: Agricultura de precisión, estrés hídrico, cítricos, imágenes hiperespectrales, satélite PRISMA, inteligencia artificial.



Colaboración

Luis Enrique Gómez Guerrero; Irahan Otoniel José Guzmán; Ojilve Ramón Medrano Pérez; Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico Superior de Misantla; Isaías Avendaño Cortes, Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico Superior de Huatusco

Fecha de recepción: 12 de diciembre de 2025

Fecha de aceptación: 18 de diciembre de 2025

ABSTRACT: Water stress is one of the main factors affecting the productivity and sustainability of citrus crops in regions with high climatic variability. In the central-northern region of the state of Veracruz, Mexico, irregular water availability has increased the vulnerability of these agricultural systems, making the implementation of more efficient monitoring tools necessary. This work proposes a methodology for the analysis of water stress in citrus crops using hyperspectral images from the PRISMA satellite and artificial intelligence techniques. The methodology includes the acquisition of hyperspectral data in the VNIR and SWIR ranges, image preprocessing, the generation of spectral indices sensitive to water content, and the application of deep learning models for the identification of patterns associated with water stress. As expected results, the generation of thematic maps is proposed to identify areas with different levels of water stress at a regional scale. The proposed approach aims to contribute to the development of precision agriculture tools oriented toward more efficient water resource management and the strengthening of sustainable citrus production.

KEYWORDS: Precision agriculture, water stress, citrus crops, hyperspectral imagery, PRISMA satellite, artificial intelligence.

INTRODUCCIÓN

El estrés hídrico constituye uno de los principales factores que afectan la productividad y sostenibilidad de los cultivos agrícolas, especialmente en especies perennes como los cítricos, donde la disponibilidad de agua influye directamente en procesos fisiológicos clave como la fotosíntesis, la transpiración y el crecimiento vegetativo [7]. La reducción prolongada del contenido hídrico en las plantas genera alteraciones metabólicas que impactan negativamente el rendimiento y la calidad del fruto. En regiones con alta variabilidad climática, como el centro-norte del estado de Veracruz, la irregularidad en la preci-

pitación y el aumento en la frecuencia de periodos secos han incrementado la vulnerabilidad de los sistemas agrícolas, haciendo necesaria la implementación de herramientas de monitoreo más oportunas y escalables.

Tradicionalmente, el monitoreo del estado hídrico de los cultivos se ha basado en mediciones puntuales en campo, tales como sensores de humedad del suelo, evaluación visual del follaje o mediciones fisiológicas localizadas. Si bien estas técnicas ofrecen información directa, presentan limitaciones significativas en términos de cobertura espacial, continuidad temporal y capacidad de anticipación ante escenarios de variabilidad climática creciente [8]. En sistemas agrícolas extensivos y heterogéneos, como los del centro-norte de Veracruz, estos métodos resultan insuficientes para capturar patrones regionales de estrés hídrico y para detectar alteraciones fisiológicas tempranas antes de que los síntomas sean visibles.

En este contexto, la percepción remota hiperespectral ha demostrado un alto potencial para identificar variaciones fisiológicas asociadas al contenido de agua en la vegetación, mediante el análisis detallado de la respuesta espectral en múltiples longitudes de onda [3]. En particular, las bandas del infrarrojo cercano y del infrarrojo de onda corta (SWIR) permiten detectar cambios sutiles en la reflectancia relacionados con la absorción de agua en los tejidos vegetales. Índices espectrales como el Normalized Difference Water Index (NDWI) han sido ampliamente utilizados como indicadores sensibles al estado hídrico de la vegetación [5].

La misión satelital PRISMA proporciona imágenes hiperespectrales en los rangos VNIR y SWIR con alta resolución espectral, lo que la convierte en una herramienta adecuada para el monitoreo agrícola a escala regional [1]. Asimismo, los avances recientes en técnicas de aprendizaje profundo han permitido mejorar la clasificación de patrones complejos en datos hiperespectrales, integrando información espectral y espacial de manera simultánea [6].

A pesar de estos avances, existe una brecha técnica en la aplicación sistemática de imágenes hiperespectrales satelitales para el monitoreo regional del estrés hídrico en cultivos perennes bajo condiciones de alta heterogeneidad ambiental, particularmente en regiones citrícolas como el centro-norte del estado de Veracruz. La mayoría de los estudios previos se han centrado en análisis experimentales localizados o en cultivos anuales, sin evaluar de manera integral el potencial de plataformas hiperespectrales satelitales combinadas con inteligencia artificial en contextos regionales.

En este sentido, la pregunta de investigación que guía este estudio es:

¿Puede la combinación de imágenes hiperespectrales del satélite PRISMA y modelos de aprendizaje profun-

do mejorar la detección temprana del estrés hídrico en cultivos de cítricos a escala regional, en comparación con métodos tradicionales basados en mediciones puntuales en campo?

Bajo esta premisa, se plantea como hipótesis que la integración de datos hiperespectrales PRISMA e inteligencia artificial permite identificar patrones espectrales asociados al estrés hídrico con mayor precisión y anticipación que los enfoques convencionales.

El objetivo de este trabajo es proponer y evaluar una metodología cuantitativa para el monitoreo regional del estrés hídrico en cultivos de cítricos mediante el uso de imágenes hiperespectrales del satélite PRISMA y técnicas de inteligencia artificial, orientada al apoyo de prácticas de agricultura de precisión y a la gestión eficiente y sostenible del recurso hídrico.

Problema de Investigación

El problema científico que motiva esta investigación radica en la ausencia de metodologías regionales basadas en datos hiperespectrales satelitales que permitan el monitoreo temprano y sistemático del estrés hídrico en cultivos perennes bajo condiciones de alta heterogeneidad ambiental.

En el centro-norte del estado de Veracruz, la producción citrícola se desarrolla en un contexto caracterizado por variabilidad climática interanual, diferencias edafológicas y diversidad en prácticas de manejo agrícola. En este entorno, los métodos tradicionales de medición puntual en campo resultan insuficientes para capturar patrones espaciales amplios de estrés hídrico y para anticipar alteraciones fisiológicas antes de que los síntomas sean visibles [8]. Estas limitaciones dificultan la toma de decisiones oportunas relacionadas con el manejo del riego y la gestión eficiente del recurso hídrico.

Si bien la percepción remota multiespectral ha sido utilizada para el monitoreo agrícola, su capacidad para discriminar variaciones sutiles en el contenido de agua vegetal es limitada en comparación con plataformas hiperespectrales que incluyen bandas en el rango SWIR [3], [5]. Asimismo, aunque la inteligencia artificial ha mostrado avances en la clasificación de datos hiperespectrales [6], su aplicación integrada al análisis regional del estrés hídrico en cultivos perennes en México sigue siendo incipiente.

En consecuencia, existe una brecha técnica en la implementación de enfoques que combinen imágenes hiperespectrales satelitales y modelos de aprendizaje profundo para la detección temprana del estrés hídrico en sistemas citrícolas regionales. Atender esta brecha permitiría avanzar hacia esquemas de monitoreo agrícola más precisos, escalables y orientados a la agricultura de precisión.

Área de estudio

El área de estudio se localiza en la zona centro-norte del estado de Veracruz, particularmente en regiones con alta presencia de cultivos de cítricos, donde la actividad agrícola representa un componente relevante de la economía local. Esta zona (Figura 1) se caracteriza por una marcada variabilidad climática interanual, con periodos de sequía recurrentes que afectan la disponibilidad de agua para riego y el desarrollo fisiológico de los cultivos.

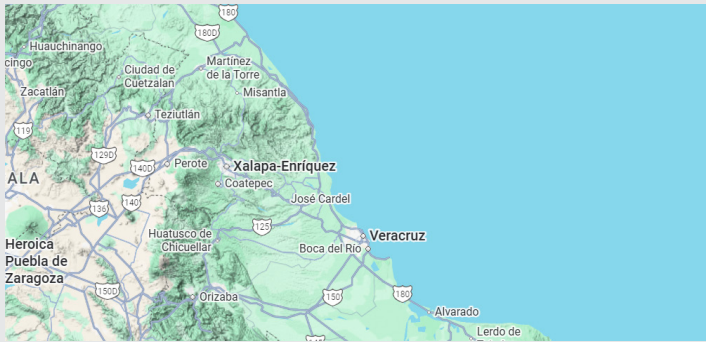


Figura 1. Localización del área de estudio en la región centro-norte del estado de Veracruz, México.

Fuente: Google Maps.

Las condiciones edafológicas, topográficas y de manejo agrícola presentan una alta heterogeneidad espacial, lo que convierte a esta región en un escenario adecuado para evaluar metodologías de monitoreo del estrés hídrico basadas en percepción remota. Asimismo, la escala regional del área de estudio permite analizar la viabilidad del uso de datos hiperespectrales satelitales como alternativa frente a métodos tradicionales de monitoreo puntual en campo [2].

Contexto de aplicación de la metodología

La región citrícola del centro-norte del estado de Veracruz se selecciona como contexto de aplicación de la metodología propuesta debido a su alta variabilidad en la disponibilidad del recurso hídrico y a la importancia estratégica de los cítricos dentro de la producción agrícola regional. Estas condiciones convierten a la zona en un escenario adecuado para evaluar el potencial de las imágenes hiperespectrales satelitales como herramienta de monitoreo del estrés hídrico a escala regional.

Desde una perspectiva metodológica, este contexto permite analizar la capacidad de los datos hiperespectrales del satélite PRISMA para identificar los patrones espectrales asociados al contenido de agua en la vegetación, sin centrarse exclusivamente en el diagnóstico puntual a nivel de parcela. El enfoque adoptado prioriza la evaluación conceptual y analítica de la metodología, considerando que la resolución espacial de los sensores satelitales es especialmente adecuada para estudios regionales orientados a la agricultura de precisión [1].

Asimismo, la selección de esta región posibilita el análisis del desempeño de índices espectrales sensibles al contenido hídrico y de modelos de inteligencia artificial aplicados a datos hiperespectrales, en un entorno agrícola real con heterogeneidad en el manejo del riego y en las condiciones fisiológicas del cultivo. Este enfoque es consistente con estudios previos que destacan la utilidad de la percepción remota hiperespectral para el monitoreo del estrés hídrico en sistemas agrícolas extensos [3], [7].

De este modo, el contexto de aplicación no busca caracterizar de manera exhaustiva los cultivos de cítricos, sino evaluar la viabilidad del enfoque metodológico propuesto como una herramienta de monitoreo agrícola replicable en otras regiones con condiciones climáticas y productivas similares.

Fuente de datos hiperespectrales

Para el desarrollo del estudio se consideran entre 4 y 6 escenas satelitales PRISMA correspondientes a periodos críticos de disponibilidad hídrica (temporada seca y transición estacional). Las escenas son seleccionadas bajo los siguientes criterios:

- Cobertura completa del área de estudio
- Nubosidad inferior al 10 %
- Coincidencia temporal con periodos de alta demanda evapotranspirativa
- Calidad radiométrica validada por los metadatos oficiales de la misión.

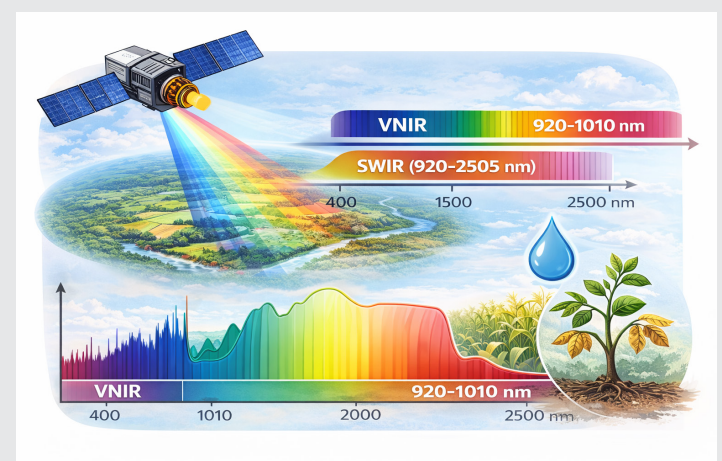


Figura 2. Esquema de la adquisición de información hiperespectral por el satélite PRISMA en superficies vegetadas.

Fuente: Elaboración propia.

El satélite PRISMA proporciona información espectral continua en los rangos VNIR (400–1010 nm) y SWIR (920–2505 nm), con alta resolución espectral y radiométrica (Figura 2), permitiendo capturar variaciones sutiles en la reflectancia asociadas al contenido hídrico en la vegetación [1], [3].

Preprocesamiento de imágenes

Las imágenes hiperespectrales son sometidas a un

proceso sistemático (Figura 3) de preprocesamiento que incluye:

- Corrección radiométrica
- Eliminación de bandas afectadas por ruido
- Normalización espectral

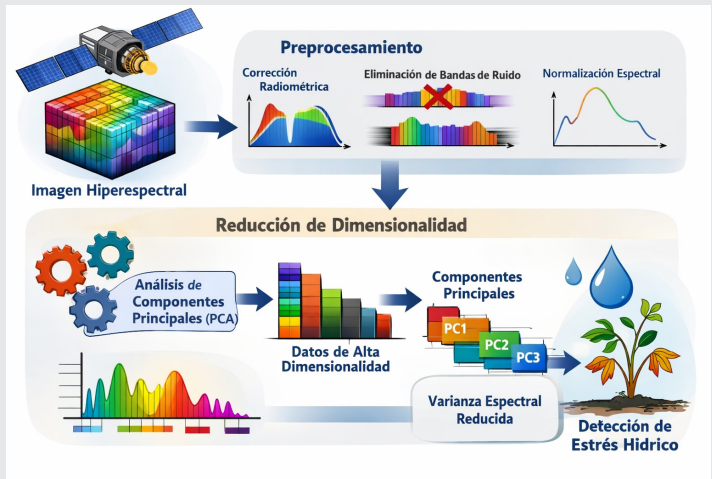


Figura 3. Esquema del preprocesamiento y reducción de dimensionalidad de imágenes hiperespectrales mediante PCA para la identificación del estrés hídrico.

Fuente: Elaboración propia con base en [4].

Debido a la alta dimensionalidad de los datos hiperespectrales, se aplica el Análisis de Componentes Principales (PCA) como técnica de reducción de dimensionalidad [4].

La selección del número de componentes principales se realiza considerando el porcentaje acumulado de varianza explicada, estableciendo un umbral mínimo del 95 % de varianza retenida, con el fin de garantizar la conservación de la información espectral relevante para el análisis del estrés hídrico.

Adicionalmente, se realiza un análisis estadístico descriptivo (media, varianza y desviación estándar) para evaluar la estabilidad espectral de las componentes seleccionadas y verificar la reducción efectiva de redundancia espectral.

Ingeniería de variables e índices espectrales

A partir de los datos preprocesados se calculan índices espectrales sensibles al contenido de agua, entre ellos el Normalized Difference Water Index (NDWI) [5].

Estos índices permiten resaltar diferencias fisiológicas entre áreas con distintos niveles de disponibilidad hídrica y constituyen variables de entrada para los modelos de aprendizaje profundo. Se realiza un análisis comparativo preliminar entre los valores de NDWI obtenidos y los rangos reportados en la literatura para validar coherencia espectral [5], [7].

Modelado con inteligencia artificial

El análisis del estrés hídrico se realiza mediante redes

neuronales convolucionales (CNN) adaptadas al tratamiento de datos hiperespectrales [6].

La arquitectura propuesta contempla:

- División del conjunto de datos en:
 - o 70 % entrenamiento
 - o 15 % validación
 - o 15 % prueba
- Función de pérdida: entropía cruzada categórica
- Optimizador: Adam
- Métrica principal de evaluación: precisión global
- Métricas complementarias: matriz de confusión, sensibilidad y especificidad

El entrenamiento se realiza bajo un esquema supervisado utilizando como referencia valores derivados de índices espectrales y conocimiento agronómico previo. Este enfoque permite evaluar la capacidad del modelo para identificar patrones espaciales asociados a distintos niveles de estrés hídrico [6].

Flujo metodológico

El proceso metodológico general sigue una estructura secuencial que abarca desde el diseño conceptual del sistema, la adquisición de datos satelitales, el procesamiento y análisis de la información, hasta la generación de productos finales orientados a la toma de decisiones agronómicas. Este flujo se representa mediante un esquema metodológico (Figura 4), el cual sintetiza las principales etapas del estudio y facilita la comprensión integral del enfoque propuesto.

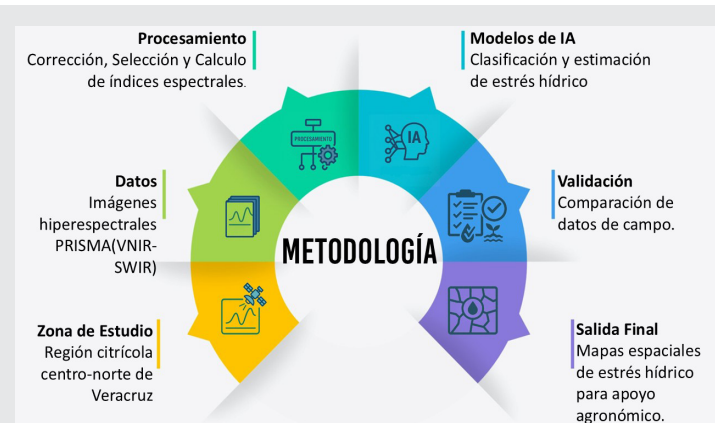


Figura 4. Flujo metodológico propuesto para el monitoreo del estrés hídrico en cultivos de cítricos a partir de imágenes hiperespectrales PRISMA e inteligencia artificial.

Fuente: Elaboración propia

Limitaciones y alcances del enfoque propuesto

El enfoque metodológico propuesto presenta alcances relevantes, así como ciertas limitaciones inherentes al uso de imágenes hiperespectrales satelitales para el monitoreo del estrés hídrico en cultivos agrícolas. En términos de alcance, el uso de datos provenientes del satélite PRISMA permite realizar un análisis a escala regional, lo cual resulta adecuado para cultivos extensivos como los cítricos y para regiones con alta heterogeneidad ambiental, como el centro-norte del estado de Ve-

racruz. La elevada resolución espectral en los rangos VNIR y SWIR posibilita la identificación de variaciones fisiológicas sutiles asociadas al contenido de agua en la vegetación, incluso antes de que los síntomas de estrés sean evidentes a nivel visual [1], [3].

No obstante, una de las principales limitaciones del enfoque radica en la resolución espacial del sensor PRISMA, la cual puede restringir el análisis detallado a nivel de parcelas pequeñas o sistemas agrícolas altamente fragmentados. Esta condición puede generar mezclas espectrales en áreas donde coexisten diferentes coberturas del suelo, lo que debe ser considerado al interpretar los resultados [7]. Sin embargo, esta limitación no compromete el objetivo central del estudio, ya que el interés principal se orienta al monitoreo del estrés hídrico a escala regional y a la identificación de patrones espaciales generales.

Asimismo, la dependencia de condiciones atmosféricas favorables y la disponibilidad temporal de escenas libres de nubosidad representan un desafío común en estudios basados en percepción remota satelital. A pesar de ello, la integración de índices espectrales sensibles al contenido de agua y modelos de inteligencia artificial contribuye a mitigar estas limitaciones, fortaleciendo la robustez del análisis y ampliando el potencial de aplicación del enfoque propuesto en el contexto de la agricultura de precisión [5], [6].

RESULTADOS

Se espera que el uso de imágenes hiperespectrales provenientes del satélite PRISMA permita identificar patrones espectrales asociados al estrés hídrico en cultivos de cítricos a escala regional, particularmente mediante el análisis de las bandas del rango SWIR, sensibles al contenido de agua en la vegetación (Figura 5) [1], [3]. Se anticipa que las diferencias en reflectancia espectral entre zonas con distinta disponibilidad hídrica sean estadísticamente significativas ($p < 0.05$), evidenciando variaciones fisiológicas coherentes con los procesos descritos en la literatura sobre estrés hídrico vegetal [7].

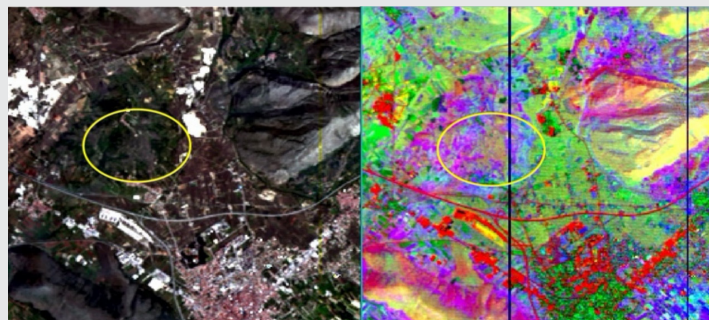


Figura 5. Comparación particular del PRISMA VNIR de *Alba Fucens* referida a la imagen RGB (izquierda) y PCA (derecha), donde se observan las diferencias estructurales del terreno y variaciones espectrales útiles para análisis avanzados.

Fuente: Recuperado de artículo [10].

En relación con los índices espectrales, se espera que el Normalized Difference Water Index (NDWI) presente diferencias cuantificables entre áreas clasificadas como bajo, medio y alto estrés hídrico. Se proyecta realizar un análisis estadístico comparativo mediante pruebas de diferencia de medias y análisis de varianza (ANOVA), con el fin de evaluar la coherencia de los valores obtenidos respecto a los rangos reportados en estudios previos [5]. Asimismo, se prevé calcular medidas de dispersión como desviación estándar y error estándar, las cuales permitirán representar la incertidumbre asociada a la clasificación espectral.

En cuanto al desempeño del modelo de inteligencia artificial, se espera que la red neuronal convolucional alcance una precisión global superior al 85 % en la clasificación de los niveles de estrés hídrico, con valores de sensibilidad y especificidad equilibrados entre clases. La evaluación se realizará mediante matriz de confusión, cálculo de F1-score y análisis de estabilidad del modelo a través del conjunto de validación [6]. Se prevé que la integración de información espectral completa (VNIR + SWIR) mejore el desempeño respecto a modelos basados únicamente en índices espectrales tradicionales.

Como producto final, se espera la generación de mapas temáticos de estrés hídrico con representación espacial de niveles de afectación, acompañados de métricas de incertidumbre. Estos mapas permitirán identificar zonas prioritarias para intervención agronómica, optimización del riego y gestión eficiente del recurso hídrico. Se anticipa que los resultados demuestren la viabilidad del uso de imágenes hiperespectrales PRISMA como alternativa metodológica superior frente a enfoques basados exclusivamente en sensores multispectrales convencionales [1], [5].

Finalmente, se espera que el análisis comparativo entre los resultados obtenidos y los reportados en la literatura científica permita validar la consistencia metodológica del enfoque propuesto, fortaleciendo su aplicabilidad en regiones agrícolas con alta heterogeneidad ambiental y variabilidad climática [3], [7].

CONCLUSIONES

El presente trabajo propone una metodología cuantitativa basada en imágenes hiperespectrales del satélite PRISMA y técnicas de inteligencia artificial para el monitoreo regional del estrés hídrico en cultivos de cítricos del centro-norte del estado de Veracruz. A partir del análisis desarrollado, se concluye que la percepción remota hiperespectral, particularmente en los rangos VNIR y SWIR, ofrece un alto potencial para detectar variaciones fisiológicas asociadas al contenido de agua en la vegetación antes de que los síntomas sean perceptibles visualmente [3], [7].

El uso de bandas en el rango SWIR representa un aporte tecnológico relevante, ya que estas longitudes de onda están directamente relacionadas con procesos de absorción del agua en los tejidos vegetales. Esta capacidad permite mejorar la discriminación espectral entre distintos niveles de estrés hídrico en comparación con enfoques basados únicamente en datos multiespectrales tradicionales [5]. En este sentido, la misión PRISMA constituye una plataforma adecuada para el análisis regional del estado hídrico en sistemas agrícolas heterogéneos [1].

Asimismo, la integración de modelos de aprendizaje profundo permite avanzar hacia esquemas de clasificación automatizada que combinan información espectral y espacial, incrementando la precisión en la identificación de patrones asociados al estrés hídrico [6]. Este enfoque contribuye al desarrollo de herramientas metodológicas reproducibles y escalables para aplicaciones en agricultura de precisión.

Desde una perspectiva regional, la metodología propuesta tiene implicaciones relevantes para la gestión eficiente del recurso hídrico en zonas citrícolas sometidas a variabilidad climática creciente. La generación de mapas temáticos de estrés hídrico con soporte cuantitativo puede facilitar la toma de decisiones agronómicas relacionadas con riego, priorización de intervención y optimización de recursos, fortaleciendo la sostenibilidad productiva.

Finalmente, este estudio aporta evidencia metodológica sobre la viabilidad del uso de datos hiperespectrales satelitales combinados con inteligencia artificial para el monitoreo agrícola regional. Como líneas futuras de investigación, se plantea la incorporación de validación directa en campo, análisis multitemporal y comparación con sensores multiespectrales, con el fin de consolidar un modelo robusto para la evaluación del estrés hídrico en cultivos perennes bajo escenarios de cambio climático.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI) por el apoyo brindado a través del programa de becas que hace posible el desarrollo de este proyecto. De igual manera, expreso mi reconocimiento al Dr. Irahan Otoniel José Guzmán por su orientación, confianza y acompañamiento académico.

BIBLIOGRAFÍA

[1] P. Guanter et al., "The PRISMA Mission: Hyperspectral Satellite for Earth Observation," *Remote Sensing of Environment*, vol. 262, p. 112499, 2021.

[2] D. Turner et al., "UAVs and satellite remote sensing for mapping agricultural water stress," *Agricultural Water Management*, vol. 216, pp. 26–38, 2019.

[3] E. M. Hunt and C. S. T. Daughtry, "What good are hyperspectral measurements for agricultural remote sensing?" *Remote Sensing*, vol. 5, no. 8, pp. 3947–3966, 2013.

[4] J. A. Richards and X. Jia, *Remote Sensing Digital Image Analysis: An Introduction*, 5th ed. Berlin, Germany: Springer, 2013.

[5] B. C. Gao, "NDWI—A normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space," *Remote Sensing of Environment*, vol. 58, no. 3, pp. 257–266, 1996.

[6] S. Feng, Y. Zhao, and X. Li, "Deep learning for crop stress classification using hyperspectral data," *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, vol. 194, pp. 24–40, 2022.

[7] J. Flexas et al., "Plant responses to drought stress: From physiology to remote sensing," *Plant Science*, vol. 181, no. 1, pp. 1–20, 2009.

[8] D. Lu et al., "Remote sensing of agricultural drought monitoring: A review," *Agricultural Water Management*, vol. 233, p. 106102, 2020.

[9] G. Camps-Valls et al., "Advances in hyperspectral image classification: Earth monitoring with statistical learning methods," *IEEE Signal Processing Magazine*, vol. 31, no. 1, pp. 45–54, 2014.

[10] Alicandro, M., Candigliota, E., Dominici, D., Immordino, F., Masin, F., Pascucci, N., ... & Zollini, S. (2022). Hyperspectral PRISMA and Sentinel-2 preliminary assessment comparison in Alba fucens and sinuessa archaeological sites (Italy). *Land*, 11(11), 2070.



