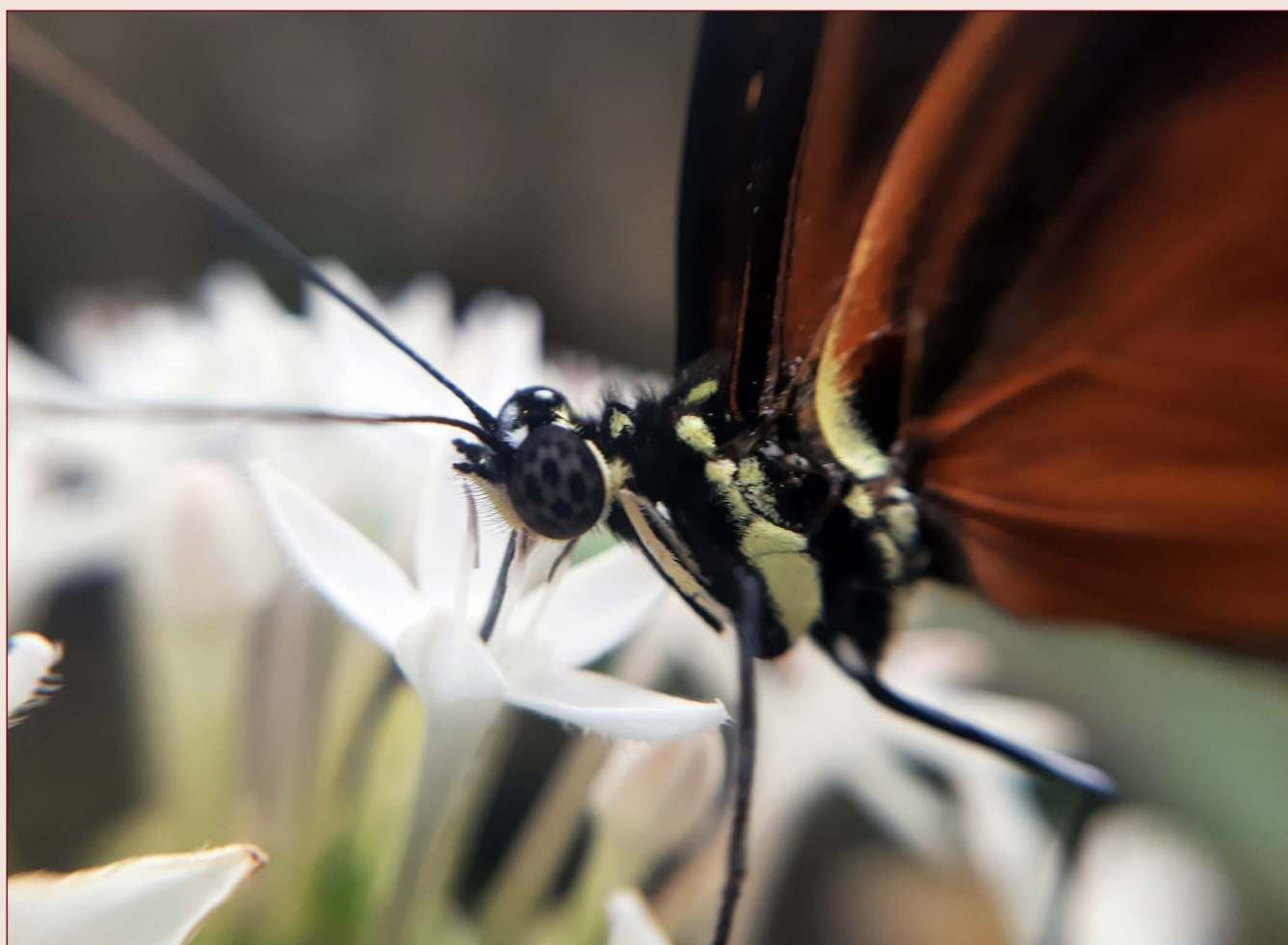


ISSN: 2007-7068

CN *Ciencia Nicolaita*

93



Abril de 2025

Revista Científica

Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo

Ciencia Nicolaita

ISSN: 2007-7068

Jesús Campos García

Coordinador de la Investigación Científica

José López Bucio

Editor

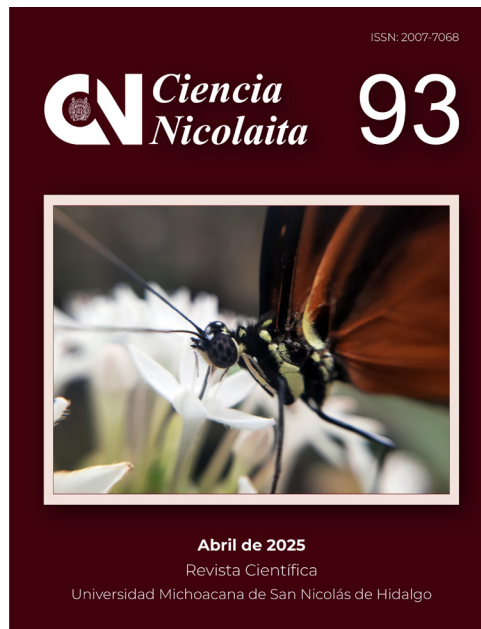
Comité Editorial

Luca Tessieri, Instituto de Física y Matemáticas; **Sabina Irene Lara Cabrera**, Facultad de Biología; **María de Lourdes González Arqueros**, CONAHCyT – Instituto de Investigaciones en Ciencias de la Tierra; **Jeannette Sofía Bayuelo Jiménez**, Instituto de Investigaciones Agropecuarias y Forestales; **Jesús Cirilo Trujillo Jiménez**, Facultad de Ingeniería Mecánica; **Elia Mercedes Alonso Guzmán**, Facultad de Ingeniería Civil; **Rosa Elva Norma del Rio Torres**, Instituto de Investigaciones Químico Biológicas; **Joel Edmundo López Meza**, Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia; **Héctor Eduardo Martínez Flores**, Facultad de Químico Farmacobiología; **Francisco Shidarta Guzmán Murillo**, Instituto de Física y Matemáticas; **José Antonio González Cervera**, Instituto de Física y Matemáticas; **José María Ponce Ortega**, Facultad de Ingeniería Química; **Ernesto García Pineda**, Instituto de Investigaciones Químico Biológicas.

Comité Editorial Externo

Daniele Colosi, Escuela Nacional de Estudios Superiores, Universidad Nacional Autónoma de México, Campus Morelia, México; **Carlos Alonso Maya Lastra**, Columbia University, Department of Ecology, Evolution and Environmental Biology, USA; **Rafael Ángel Reyna Hurtado**, Colegio de la Frontera Sur (ECOSUR), Campeche, México; **Zayre Ivonne González Acevedo**, Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada (CICESE), Baja California, México; **Ramón Marcos Soto Hernández**, Colegio de Postgraduados, Postgrado en Botánica, Estado de México; **María Esther Olvera Cortés**, Centro de Investigación Biomédica de Michoacán, Instituto Mexicano del Seguro Social, México; **Ignacio Alejandro Figueroa Vargas**, Instituto de Investigaciones en Materiales, Universidad Nacional Autónoma de México; **Enrique Acha Daza**, Profesor Emérito de la Universidad de Tampere, Finlandia; **Víctor Manuel Ambríz Díaz**, Instituto Tecnológico de Chihuahua; **Luis Fernando Guerrero Baca**, Universidad Autónoma Metropolitana, México.

Apoyo editorial y maquetación: Fidel Anguiano Rodríguez.



Ciencia Nicolaita

ISSN: 2007-7068

Revista Ciencia Nicolaita número 93, abril de 2025

<https://www.cic.cn.umich.mx>

Fotografía de la portada

Autor: Bióloga Itzel Salas Prado

Descripción: macho de la mariposa *Heliconius hecale* consumiendo néctar de las flores blancas (*Pentas* sp) en el mariposario Siwiní, Xalapa, Veracruz.

Directorio

i

Contenido

ii

Presentación

iv

Biología y Química

Explorando el metabolismo: tasas metabólicas asociadas al dimorfismo sexual en *Heliconius hecale* (Lepidoptera: Nymphalidae)

Itzel Salas Prado , Luis Mendoza Cuenca 

1

Strong dissuasive effect of a synthetic capsaicinoid against whitefly infestation in avocado trees

José López Hernández, José López Bucio , Jesús Salvador López Bucio 

10

Efecto hipolipemiente del extracto hexánico de flores de *Stenocereus queretaroensis* en ratas diabéticas

José C. Ayala Almonte, Ernestina Gutiérrez Vázquez, Gabriela Rodríguez García, Zurizadai Hernández Gallegos, Mario A. Gómez Hurtado, Rosa E. del Río, Asdrúbal Aguilera Méndez 

18

Biotecnología y Ciencias Agropecuarias

- Carmines Red from Cochineal (*Dactylopius coccus*), a natural dye: a review**
Gabriela Monserrat Ochoa Manzo, Héctor Eduardo Martínez Flores , José Octavio Rodiles López, Liberato Portillo 26

- Effect of antagonistic bacteria on *Dactylopius opuntiae* (Hemiptera: Dactylopiidae)**
Redouan Qessaoui, Chaima Elhallah, Salahddine Chafiki, Yassin Imlil, Rachid Bouharroud 35

Ingenierías

- Caracterización de las propiedades físicas del adobe de viviendas vernáculas en Santiago Amatlán, Oaxaca**
Miguel Adrián Hernández Rodríguez , Heidy Gómez Barranco , Rafael Alavéz Ramírez , Elia Mercedes Alonso Guzmán . 39

- Evaluación termodinámica de un sistema híbrido solar-combustible fósil en la generación de electricidad y agua caliente sanitaria**
Alejandra Belem Mendoza Maldonado, Luis Felipe Pasillas Villalobos, Víctor M. Ambriz-Díaz, Oscar Chávez, Israel Y. Rosas 47

- Análisis termodinámico de un sistema de cogeneración de electricidad y calor de agua caliente sanitaria utilizando un motor de combustión interna y un ciclo Rankine orgánico**
Luis Felipe Pasillas Villalobos, Alejandra Belem Mendoza Maldonado, Víctor M. Ambriz Díaz, Oscar Chávez, Israel Y. Rosas 58

- Evaluación de la erosión del suelo en la cuenca del Lago de Pátzcuaro mediante la ecuación universal de pérdida de suelo**
Jorge Luis Bedolla Cervantes, José Jaime Madrigal Barrera, Sonia Tatiana Sánchez Quispe  70

Miscelánea

- Glicerol renovable: retos y oportunidades para su valorización en México**
Jahaziel Alberto Sánchez Gómez, Fernando Israel Gómez Castro , Salvador Hernández 78

- Normas editoriales** 85

- Página legal y créditos** 88

Presentación

Ciencia Nicolaita No. 93, Abril 2025.

El número 93 de Ciencia Nicolaita presenta avances notables en varios tópicos de las ciencias naturales, la biotecnología, y la ingeniería del espacio habitable.

En múltiples especies de lepidópteros (mariposas) se observan diferencias inter e intraespecíficas en la morfología alar que incluyen aerodinámica, coloración y forma, y se ha sugerido que están asociadas a diversas presiones ecológicas, así como a diferencias fisiológicas intersexuales de las especies. Salas-Prado y Mendoza-Cuenca evaluaron las diferencias intersexuales en los costos metabólicos en *Heliconius hecale* y su relación con el diseño morfológico de vuelo. Sus resultados sugieren que el dimorfismo sexual en la forma de las alas representa una respuesta adaptativa que permite optimizar las tasas metabólicas.

La producción de aguacate (*Persea americana* Mill.) es importante para la economía de varios países, siendo México, el mayor productor del mundo. El fruto tiene una creciente demanda debido a su rico contenido en nutrientes, antioxidantes y vitaminas, incluyendo magnesio, potasio, ácido fólico, omega 3, luteína y fibras. Sin embargo, diferentes tipos de plagas y enfermedades afectan el desarrollo del cultivo. López-Hernández *et al.* exploraron la utilidad de una molécula sintética relacionada con la capsaicina (picor del chile) como una estrategia disuasiva ante el ataque de la mosquita blanca, un insecto succionador de savia. Los tratamientos permitieron combatir la plaga sin afectar polinizadores o el desarrollo del árbol durante la etapa de mayor incidencia, indicando su utilidad potencial en la agricultura.

La diabetes mellitus es un conjunto de trastornos metabólicos relacionados con altas concentraciones de glucosa en la sangre de manera persistente o crónica, que contribuyen con enfermedades cardiovasculares y discapacidad frecuente. El uso de plantas medicinales es una excelente alternativa debido a su eficacia y a los pocos efectos secundarios que presentan. En el trabajo de Ayala-Almonte *et al.* se aisló y caracterizó el compuesto ergosta-5,24(28)-dien-3 β -ol a partir de extractos de flores de *Stenocereus queretaroensis*, cuya aplicación en ratas diabéticas reduce el contenido de lípidos séricos y hepáticos. El uso terapéutico de dicho compuesto permitiría atenuar las complicaciones asociadas con la diabetes.

Los colorantes se encargan de añadir color a los alimentos para mejorar su

apariciencia, ya que esto juega un papel crucial en la elección y aceptación de un producto. El uso de colorantes artificiales ha generado controversia y preocupación con respecto a problemas de salud por su toxicidad. El carmín es un colorante natural muy utilizado en la alimentación que se obtiene a partir de la cochinilla hembra (*Dactylopius coccus*), un insecto que vive en los cladodios de cactáceas. Ochoa-Manzo *et al.* presentan una revisión sobre la biología del insecto, su infestación y desarrollo en el cactus, el proceso de extracción de tintes y los productos derivados que contienen ácido carmínico como colorante rojo natural. Las tecnologías que mejoran el rendimiento de extracción del carmín prometen un futuro más saludable y sostenible para la industria de los alimentos.

El control de la cochinilla silvestre *Dactylopius opuntiae* es importante para la producción de nopal, un alimento básico en diversas regiones del planeta. Bouharroud *et al.* evalúan el potencial de tres bacterias rizosféricas en el control de *D. opuntiae*, de las cuales dos aislados tuvieron un impacto notable en ninfas y hembras adultas. La aplicación de dichos aislados o su combinación representaría una alternativa al uso de insecticidas químicos, nocivos para polinizadores y otras especies ecológicamente relevantes.

El agotamiento de las reservas de petróleo y la contribución al calentamiento global asociada a la constante emisión de gases de efecto invernadero han abierto el camino para el uso de biocombustibles, como el biodiésel, en los sectores de transporte e industrial. El glicerol se puede obtener en los procesos de producción de biodiésel, a partir de aceites de palma africana, higuera y *Jatropha*, estimándose un potencial de producción de hasta 368 millones de litros para el año 2030. En el artículo de Sánchez-Gómez *et al.* se discuten algunos de los retos y oportunidades que ofrece la valorización del glicerol en México, un país que busca impulsar el uso de biocombustibles y desarrollar una industria química verde y sustentable.

Los combustibles fósiles, son las principales fuentes de energía primaria para la generación de electricidad. Dicha tecnología utiliza centrales basadas en generación de vapor y se requiere la optimización de tecnologías para eficientizar el rendimiento energético. Dos trabajos por investigadores del Instituto Tecnológico de Chihuahua, se enfocan en dicho reto mediante la implementación de diferentes sistemas para la generación de electricidad y agua caliente sanitaria, con resultados sumamente atractivos para satisfacer la demanda creciente de energía eléctrica para las viviendas.

La construcción con adobes ha tenido una importancia vital a lo largo de la historia y sigue desempeñando un papel fundamental, ya que un tercio de la población mundial habita en viviendas construidas con este material, un ejemplo son los edificios históricos en muchas localidades, cuyas técnicas de

preparación y construcción se están perdiendo. En el trabajo de Hernández-Rodríguez *et al.* se caracterizaron las propiedades físicas del adobe de viviendas vernáculas de la comunidad de Santiago Amatlán, Oaxaca, lo que facilitará su preservación y promoverá su uso adecuado en nuevas construcciones que pasen a formar parte del patrimonio cultural de la región.

La erosión del suelo es un proceso de deterioro natural o inducido por actividades humanas, en el que las partículas o capas más superficiales se pierden en un proceso irreversible que afecta un recurso ecológico y económico esencial. Bedolla-Cervantes *et al.* hacen aportes al estudio de la erosión hídrica en la cuenca del Lago de Pátzcuaro, que se caracteriza por una amplia gama de suelos, tipos de vegetación y actividades humanas debido a su topografía, clima y ubicación geográfica. Mediante la aplicación de la ecuación universal de pérdida de suelo y diversos análisis se identificaron áreas vulnerables, en las que se deberían focalizar los esfuerzos de conservación.

Trabajos como los que se presentan en este número sientan las bases científicas para la toma de decisiones informadas en términos de planificación territorial, promoción de prácticas agrícolas sostenibles, ahorro energético y protección de los recursos hídricos.

José López Bucio

Editor



Explorando el metabolismo: tasas metabólicas asociadas al dimorfismo sexual en *Heliconius hecale* (Lepidoptera: Nymphalidae)

Exploring the metabolism: metabolic rates related with sexual dimorphism in *Heliconius hecale* (Lepidoptera: Nymphalidae)

Itzel Salas Prado* , Luis Mendoza Cuenca 

Facultad de Biología, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Gral. Francisco J. Mújica, Col. Felicitas del Río C.P. 58040, Morelia, Michoacán. <https://orcid.org/0009-0008-0917-0723>

Historial

Manuscrito recibido: 9 de noviembre de 2024

Manuscrito aceptado: 5 de febrero de 2025

Manuscrito publicado: abril 2025

*Autor para correspondencia

Itzel Salas Prado

e-mail: 1907582e@umich.mx

ORCID: 0009-0008-0917-0723

Resumen

Las tasas metabólicas estiman el consumo energético de los organismos durante determinadas actividades y están moduladas por diversos factores como las condiciones ambientales y el diseño morfológico. En este trabajo evaluamos las diferencias intersexuales en los costos metabólicos en la especie *Heliconius hecale* y su relación con el diseño morfológico de vuelo. Los resultados sugieren que el dimorfismo sexual en la forma de las alas representa una respuesta adaptativa que permite optimizar las tasas metabólicas. El cambio observado en la distribución del mayor porcentaje del área en el ala anterior (i.e. segundo momento alar) hacia la parte distal del ala anterior en las hembras, asociado a una mayor masa corporal en relación con el área del ala (i.e. carga alar), resulta en una reducción de gastos metabólicos aún con el costo extra que representa producir y cargar los ovocitos.

Palabras clave: Tasas metabólicas, morfología alar, dimorfismo sexual, *Heliconius*

Abstract

Metabolic rates estimate energy consumption of organisms during specific activities and are modulated by various factors, such as environmental conditions and morphological design of individuals. In this study, we evaluate intersexual differences in metabolic costs in the species *Heliconius hecale* and their relationship with flight morphological design. The results suggest that sexual dimorphism in wing shape represents an adaptive response that optimizes the metabolic rates. The observed shift in the distribution of the highest percentage of the area in the forewing (i.e. second moment of wing area) towards the distal part of the forewing in females, associated with a higher body mass relative to wing area (i.e. wing loading), leads to a reduction in metabolic expenditures despite the additional cost of producing and carrying oocytes.

Keywords: Metabolic rates, wing morphology, sexual dimorphism, *Heliconius*

Introducción

La tasa metabólica es una referencia confiable de la cantidad de energía que gasta un organismo al realizar sus actividades fisiológicas (Woods *et al.*, 2010). La tasa metabólica basal es uno de los rasgos fisiológicos más estudiados y evalúa el costo energético mínimo necesario para mantener las funciones vitales (Lighton, 2008). En cambio, la tasa metabólica de actividad estima la demanda energética total que un individuo presenta al trabajar los músculos locomotores, como al volar (tasa metabólica de vuelo) o caminar, e incluye además las funciones vitales (ej. digestión) que, por lo tanto, conlle-

va un mayor consumo energético que las tasas basales o en reposo (Dudley, 2000; Niven y Scharlemann, 2005).

Las tasas metabólicas y la teoría metabólica son importantes en ecología y surgen como una representación del manejo de los recursos energéticos esenciales para la supervivencia y el desempeño de los organismos al realizar sus actividades, como la búsqueda de pareja, forrajeo, oviposición, y evasión de depredadores en los contextos ambientales particulares (Reinhold, 1999). Sin embargo, las tasas metabólicas cambian por la condición del organismo y múltiples rasgos como el tamaño corporal, edad, estado reproductivo, historial de alimen-

tación, comportamiento o temporada (Canzano *et al.*, 2006; Woods *et al.*, 2010; Niitepöld *et al.*, 2014).

En insectos voladores, la actividad muscular necesaria para el movimiento de las alas durante la locomoción es extremadamente costosa y aumenta de manera alométrica con el tamaño del cuerpo (Niven y Scharlemann, 2005). Por ejemplo, rasgos como la carga alar, que representa la masa corporal relativa al área alar, afectan el desempeño de vuelo y se ha observado que conforme aumenta la carga alar, aumenta la masa de los músculos torácicos e incrementa el costo del vuelo (Dudley, 1990). Además, una tasa metabólica más elevada permite generar la energía necesaria para mover sus alas rápidamente (Niven y Scharlemann, 2005; Canzano *et al.*, 2006).

Las alas no solo son herramientas de locomoción, también permiten la regulación de la temperatura del cuerpo (Tsai *et al.*, 2020) y la comunicación intraespecífica incluyendo el cortejo, la competencia y la elección de pareja, lo cual está directamente relacionado con el metabolismo. El tipo de vuelo, planeo o revoloteo, y el comportamiento de vuelo, cortejo acrobático, migración etc., están influenciados por presiones ecológicas como la depredación, condiciones climáticas, tipo de vegetación, selección sexual que incluye la búsqueda de pareja y cortejo, así como conductas particulares de cada sexo como la oviposición y el cortejo, que repercuten en el diseño de la morfología alar (Brakefield y French, 1999; Chazot *et al.*, 2016; Akand *et al.*, 2018; Le Roy *et al.*, 2019). A su vez, los análisis de biomecánica de vuelo en múltiples especies, particularmente en mariposas, sugieren que estas diferencias morfológicas modifican no solo el desempeño y eficiencia aerodinámica, sino los costos de vuelo de los individuos, aunque esto ha sido escasamente evaluado, particularmente en el contexto intraespecífico (LeRoy *et al.*, 2019).

El género *Heliconius* muestra una alta diversidad inter e intraespecífica de tamaño y forma corporal a lo largo del Neotrópico (Rosser *et al.*, 2012), y es uno de los géneros de mariposas en el que se ha estudiado ampliamente la biomecánica de vuelo. Por ejemplo, la mariposa cebra, *Heliconius charitonia* (Linnaeus, 1767) exhibe dimorfismo sexual, con las hembras presentando las alas delanteras más esbeltas cerca de la base, lo que facilita un vuelo más rápido (Mendoza-Cuenca y Macías-Ordoñez, 2005; Ramos-Pérez *et al.*, 2020), mientras que los machos muestran dos morfologías alares, asociadas a dos estrategias de apareamiento: machos de apareamiento pupal de tamaños corporales comparables con las hembras y machos patrulleros que son más pequeños (Mendoza-Cuenca y Macías-Ordoñez, 2005).

En las especies co-mímicas *Heliconius erato* (Lin-

naeus, 1758), *H. besckei* (Ménétriés, 1857) y *H. melpomene* (Linnaeus, 1758) se observa una gran similitud al comparar sus alas anteriores, lo que denota formas alares convergentes, y por tanto, conducta de vuelo mimética. Esta condición sugiere que la especie tóxica mostraría tasas metabólicas mayores. Además, la configuración de la banda roja en el ala anterior, que varía entre sexos, confiere un grado de dimorfismo sexual (Rossato *et al.*, 2018). En *Heliconius ismenius* se observa dimorfismo sexual en el tamaño corporal y la forma alar, con alas más anchas en hembras, adaptadas para un vuelo de bajo costo energético. En ese contexto y debido al alto costo de movimiento, se ha sugerido que las variaciones en el diseño morfológico presentes en el género *Heliconius* son respuestas adaptativas relacionadas con el desempeño y la eficiencia de vuelo, que permiten optimizar entre otros rasgos, las tasas metabólicas, equilibrando los gastos energéticos entre las actividades del organismo y su entorno (Ramos, 2018).

La elevada demanda energética del vuelo en los lepidópteros se satisface con la alimentación de néctar floral, alto en carbohidratos (Arrese y Soulages, 2010). En el caso de las especies del género *Heliconius*, los adultos también se alimentan de polen, como una reserva de emergencia (Niven y Scharlemann, 2005; Dasmahapatra *et al.*, 2012). Los aminoácidos presentes en el polen refuerzan los espermatóforos y óvulos, y se utilizan para la síntesis de defensas químicas (Estrada y Jiggins, 2002; Finkbeiner *et al.*, 2014). Son ejemplo de mimetismo mülleriano y anillos miméticos, donde especies tóxicas o no utilizan patrones de colores similares para disuadir a los depredadores (Srygley, 1999; Kronforst *et al.*, 2007; Rossato *et al.*, 2018).

En el presente trabajo, se analizó el efecto de las variaciones intersexuales en la morfología alar tanto en el desempeño aerodinámico de vuelo, como en el desempeño metabólico de la mariposa Neotropical *Heliconius hecale* (Fabricius, 1776). El objetivo fue entender como las variaciones en las conductas de vuelo de machos y hembras se asocian con el diseño morfológico de vuelo y sus consecuencias metabólicas en función del sexo, lo que nos acerca al conocimiento de las estrategias adaptativas del diseño alar en esta y otras especies del género *Heliconius*.

Materiales y métodos

Especie de estudio

Heliconius hecale, conocida como mariposa tigre cola larga, se distribuye en el norte del Neotrópico, desde

el sur de México hasta Brasil. Esta especie, de las más grandes del género (44-48 mm), exhibe una marcada coloración melánica con tonos de naranja brillante y una marca distintiva en forma de gancho o punta de flecha cercano al ángulo de curva (espacio Cu_1 y Cu_2) en la parte exterior del ala anterior (Young, 1975). Conocida por un vuelo intenso, con un ritmo de aleteo constante y de alto esfuerzo, tiende a congregarse en áreas donde los rayos del sol penetran y al anochecer se perchan cerca del dosel para reposar (Brown, 1976; Brown, 1981). Frecuentemente los huevos y estadios larvales se asocian con la planta hospedera *Passiflora vitifolia* Kunth en áreas de vegetación secundaria húmedas y ribereñas. El huevo, de 1.4 mm de alto, presenta un color amarillo claro que se torna naranja durante los cinco días previos a la eclosión. En el estadio larval 1 mide 4 mm y es de color naranja opaco, pasando por colores mas brillantes y claros conforme avanza su desarrollo, hasta alcanzar un cuerpo blanco tiza y una cápsula cefálica de color naranja claro en el quinto estadio larval. La pupa se distingue por un tono marrón con espinas en el tórax, abdomen y antenas, así como manchas doradas en el abdomen (Young, 1975).

Se trabajó con ejemplares de esta especie durante el mes de mayo del 2024 en el Mariposario Siwiní ubicado en el Jardín Botánico Javier Clavijero en Xalapa, Veracruz, México (19°30'N y 96°56'W; 1400 msnm). Los individuos se obtuvieron de un grupo de madres reproductoras y fueron criados de huevo a pupa en el mariposario Spyrogira en San José Costa Rica, de donde se trasladaron como pupas (72 pupas) al laboratorio de mariposas del Jardín Botánico Clavijero.

Al eclosionar los individuos adultos se liberaron dentro del Mariposario Siwiní, con flores nativas como fuente de alimentación, se observaron durante los primeros 10 - 15 días, y fueron sexados mediante observación de la genitalia externa del individuo (Ramos, 2018) y marcados con plumón de punta fina de color negro o plateado en la región ventral del ala anterior, en el ala derecha para las hembras y en la izquierda para los machos (Mendoza-Cuenca y Macías-Ordóñez, 2005; Ramos, 2018). Posteriormente, se pesaron todos los individuos vivos con una báscula portátil con una precisión de 0.001 g, se midieron las tasas metabólicas de ambos sexos y se sacrificaron en sobres de papel glassine por congelamiento con las alas en posición de vuelo. Los ejemplares se desecaron y se colocaron sobre un calibrador de color con estándar de tamaño (ColorChecker Passport, Calibrite) y se capturó una imagen digital de cada ejemplar (N = 23) utilizando una cámara CANON T3i de 18 mpx.

Tasas metabólicas

Para determinar las tasas metabólicas, se capturaron 14 hembras y 9 machos de *H. hecale*. Los especímenes se colocaron en una cámara cilíndrica (**Figura 1**), de 10 x 8.19 cm con capacidad de 526.81 ml, para medir la producción de CO_2 de los organismos mediante un respirómetro de flujo continuo, modelo Q-box RP1LP Low Range Respirometry Package (Qubit System Inc., Kingston ON, Canadá) y el software asociado Logger Pro, con un flujo constante de 300 ml/min.

Para asegurar que el CO_2 obtenido correspondiera exclusivamente al individuo, se instaló un tubo con cal sodada o “soda lime” ($CaHNaO_2$) antes de la cámara que contenía el insecto (Lighton, 2008; Ramos-Pérez *et al.*, 2020). La estimación de las tasas metabólicas se realizó entre las 18-21 horas, período de nula o menor actividad de los organismos y para asegurar que estos pudieron digerir el néctar y polen obtenido dentro del mariposario a partir de las flores nativas disponibles al momento de introducirlos a la cámara.

Se midieron 2 tasas metabólicas calculadas en ml/h de CO_2 producido por los individuos: 1) Tasa metabólica basal (TMB), y 2) Tasa metabólica en vuelo (TMV), en la primera se introdujeron 2-5 ejemplares al día individual y aleatoriamente en la cámara cubierta por tela oscura, situada en una habitación a temperatura ambiente y sin iluminación, para evitar el movimiento del individuo inducido por la luz y el estrés por los cambios térmicos. La medición de TMB fue de 11 minutos. Se descartaron los primeros 5 minutos para minimizar el error asociado al CO_2 externo que ingresa al abrir la cámara y la agitación inicial del individuo al introducirlo, teniendo 6 minutos de lectura de TMB (Niitepöld *et al.*, 2014;



Figura. 1. *Heliconius hecale* en vuelo dentro de la cámara del respirómetro.

Ramos, 2018). Como estimación para el metabolismo basal, se consideró el promedio del minuto más estable y de menor actividad.

La tasa metabólica en vuelo se cuantificó inmediatamente después de tomar la tasa metabólica basal y aun con el individuo en la cámara, se retiró la cubierta oscura y se iluminó con una lámpara led de 10W. La cámara se agitó sutil y constantemente durante 3 minutos para que la mariposa se mantuviera en vuelo, evitando que el organismo se posara en la base de la cámara, obteniendo picos de vuelo durante un minuto aproximadamente (Niitepõld *et al.*, 2014). El pico máximo de metabolismo en vuelo se estimó como el promedio del minuto más alto de vuelo.

Para determinar si existen relaciones entre ambas tasas se realizó un análisis de regresión lineal entre la TMB y la TMV para ambos sexos. Los datos metabólicos obtenidos se compararon entre sexos utilizando una prueba de Wilcoxon mediante el programa estadístico JMP.8 (SAS, Institute Inc).

Variables aerodinámicas

A partir de las imágenes digitales se obtuvo el área alar, largo del ala, longitud total del cuerpo y ancho del tórax mediante el programa ImageJ (N = 23). También se midió la masa total seca del cuerpo, pesos de la cabeza, tórax, abdomen y alas con una balanza analítica (Ohaus adventurer, precisión 0.001 g). Se calcularon los parámetros aerodinámicos de carga alar, relación de aspecto y proporción de músculos de vuelo siguiendo el método propuesto por Ramos (2018). El segundo momento de área, que estima la distribución de área a lo largo del eje del ala se estimó utilizando el software WingImageProcessor (<http://www.unc.edu/~therick/>). Utilizamos pruebas pareadas de t-student para comparar las diferencias intrasexuales en las variables aerodinámicas en

la condición metabólica de ambos sexos, se aplicaron correcciones de Bonferroni para corregir por múltiples comparaciones simultáneas. Se evaluó que las variables dependientes cumplieran los supuestos de independencia de las muestras, normalidad y homogeneidad de varianzas.

Análisis de la forma de las alas

Para comparar las diferencias intersexuales en la forma de las alas, se utilizaron las imágenes digitales y técnicas de morfometría geométrica. Se colocaron 14 marcadores en las imágenes en TPSdíg (Figura 2).

Siguiendo como referencia las venaciones Cu_a y Cu_b , se emplearon nueve semi-landmarks obtenidos con un abanico de Makefan. Se ubicaron landmarks en la base del ala, el ápice (extremo distal más alejado de la base), la curvatura del ala y las venas antes mencionadas, así como dos puntos en la escala milimétrica que permitieron estandarizar las mediciones y asegurar la comparabilidad entre los diferentes ejemplares (Moreno *et al.*, 2014; Rossato *et al.*, 2018). Las coordenadas procrustes se obtuvieron en el programa CoordGen8 y se compararon entre sexos utilizando un análisis de variables canónicas y posterior interpretación de la variación morfológica intersexual a través de análisis de placas delgadas en el programa CVA Gen8 (Sheets, 2014).

Resultados

Tasas metabólicas

El análisis de Wilcoxon, comparando las tasas metabólicas basal y en vuelo entre hembras y machos de *H. hecale*, mostró que no existen diferencias significativas entre sexos para ninguna de las tasas (Tabla 1). El análisis de regresión lineal entre tasas metabólicas señala una

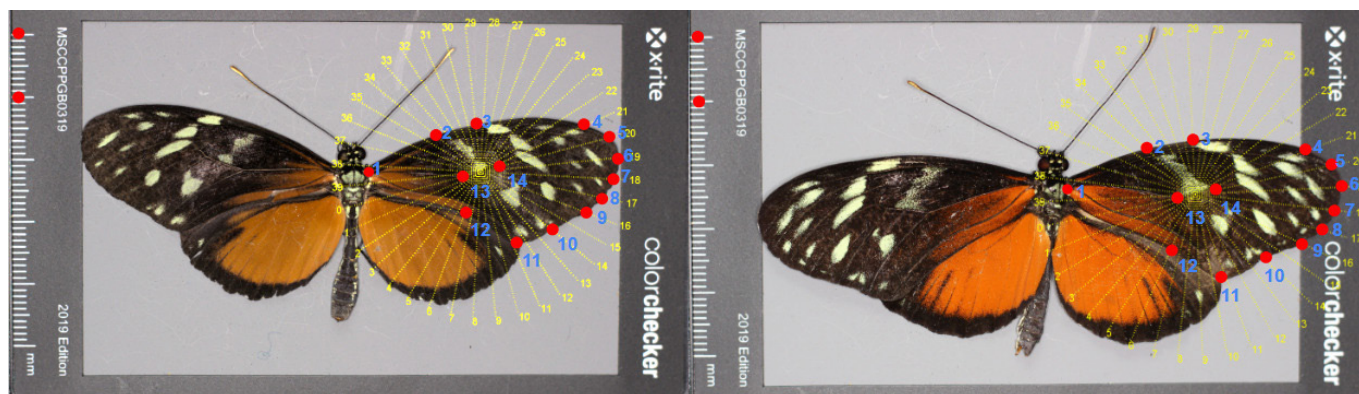


Figura 2. Landmarks y semi-landmarks utilizados para calcular coordenadas procrustes de *H. hecale* para hembras (izquierda) y machos (derecha).

Tabla 1. Tasas metabólicas (medias $\pm$ D.E.). Resultados de la prueba de Wilcoxon entre hembras y machos de *Heliconius hecale*.

Tasa metabólica	Hembras	Machos	Z	Valor de P
Basal (ml/h)	0.320 $\pm$ 0.210	0.415 $\pm$ 0.321	0.592	0.571
En vuelo (ml/h)	1.095 $\pm$ 0.414	1.228 $\pm$ 0.661	1.000	1.000

relación entre la tasa basal y la tasa metabólica en vuelo para hembras ($r^2 = 0.141$, $F = 0.185$, $p = 0.001$) y para machos ($r^2 = 0.141$, $F = 0.003$, $p = 0.048$).

Variables aerodinámicas

Las pruebas de t-student realizadas a las medias morfológicas mostraron diferencias significativas entre los sexos para las variables masa total seca, peso del abdomen y la carga alar, siendo las hembras las que presentaron mayores valores; mientras que los machos exhibieron cerca de la mitad del peso abdominal presente en hembras (**Tabla 2**). En cambio, no se encontraron diferencias entre los sexos para las variables peso total fresco, peso alar, área alar, longitud alar, longitud total del cuerpo, ancho del tórax, proporción de músculos de vuelo y radio de aspecto (**Tabla 2**). Respecto al análisis de las variables aerodinámicas, los análisis de pruebas de t-student solo mostraron diferencias significativas en la carga alar siendo las hembras nuevamente las que muestran los mayores valores (**Tabla 2**).

Morfología alar

El análisis de variables canónicas presenta diferencias en la forma alar entre machos y hembras (Axis 1: Lambda = 0.2398, $\chi^2 = 28.5600$, $df = 2$, $p = 6.2846e-07$). Las rejillas de deformación asociadas al análisis de placas

delgadas muestran que las hembras presentan alas con el momento de área (espacio donde se concentra la mayor distancia de esta superficie) más cercano al extremo distal (**Figura 3a, b**), esta morfología suele asociarse a la reducción en las fuerzas de arrastre provocadas por las puntas del ala. Por otro lado, los machos exhiben alas con la curvatura posterior más pronunciada, lo que produce menor presión en el dorso del ala y un menor costo energético (**Figura 3a, b**). Análisis de variables canónicas entre machos (triángulos y círculo azul) y hembras (puntos y círculo negro) denotan la diferencia entre sexos (**Figura 3c**).

Discusión

En múltiples especies de lepidópteros, y particularmente en la tribu Heliconiini, se observan diferencias inter e intraespecíficas en la morfología alar que incluyen aerodinámica, coloración y forma, y se ha sugerido que están asociadas a diversas presiones ecológicas, así como a diferencias fisiológicas intersexuales de las especies. En ese contexto, es posible que las diferencias en la morfología alar entre los sexos se vean reflejadas en diferencias en los costos metabólicos de los individuos. Sin embargo, nuestros resultados muestran que a pesar de las diferencias en el diseño de vuelo entre hembras y machos de la mariposa *Heliconius hecale*, no se detectaron diferencias intersexuales significativas en las tasas metabólicas en reposo, ni durante el vuelo, lo cual es consistente con lo reportado para otras especies del género *Heliconius* (Mendoza-Cuenca y Macías-Ordóñez, 2005; Ramos, 2018).

Al igual que en otras especies de mariposas en las que se ha evaluado la relación entre la morfología de

Tabla 2. Comparaciones entre sexos de *H. hecale* en medidas de variables morfológicas y aerodinámicas (media $\pm$ D.E.). *Indica diferencias intersexuales significativas en los resultados de la prueba de t-student.

Variables morfológicas	Hembras	Machos	valor de P
Peso total fresco (mg)	225.00 $\pm$ 33.00	204.00 $\pm$ 51.96	>0.05
Peso total seco (mg)	85.45 $\pm$ 13.47	70.82 $\pm$ 11.61	0.03*
Peso abdomen (mg)	32.67 $\pm$ 4.95	18.66 $\pm$ 4.22	0.006*
Área alar (mm ²)	1133.12 $\pm$ 77.73	1108.01 $\pm$ 122.59	>0.05
Longitud alar (mm)	43.20 $\pm$ 1.74	43.85 $\pm$ 1.22	>0.05
Longitud total del cuerpo (mm)	31.21 $\pm$ 2.42	32.11 $\pm$ 2.42	>0.05
Variables aerodinámicas	Hembras	Machos	valor de P
Carga alar (Nm ⁻²)	1.48 $\pm$ 0.21	1.25 $\pm$ 0.11	0.019*
Proporción de músculos de vuelo	0.285 $\pm$ 0.027	0.320 $\pm$ 0.044	>0.05
Radio de aspecto	3.67 $\pm$ 0.50	4.00 $\pm$ 0.30	>0.05

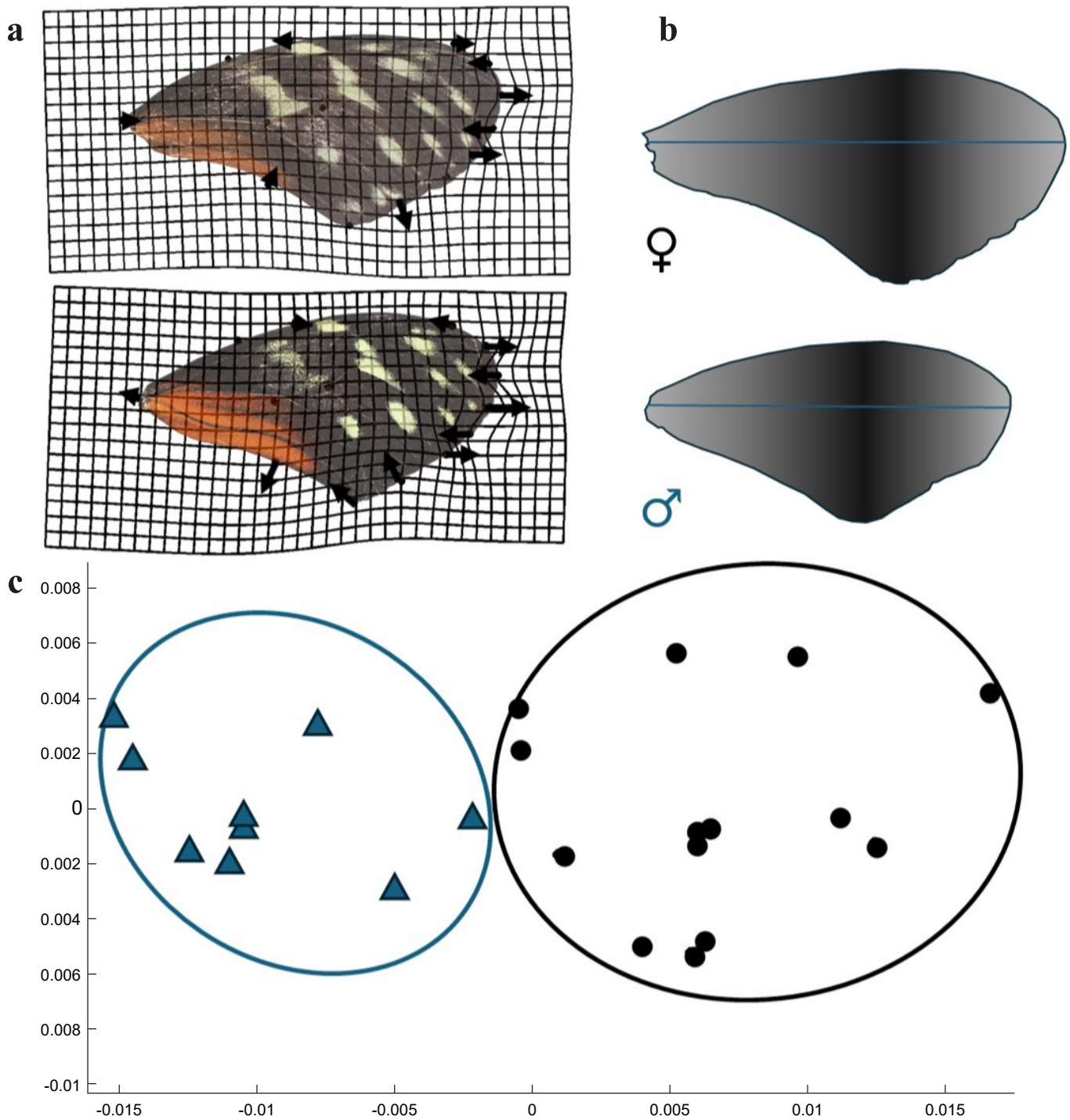


Figura 3. Análisis de morfometría geométrica de *Heliconius hecale*. **a)** Rejillas de deformación que muestran la variación morfológica alar entre machos (abajo) y hembras (arriba), las flechas negras señalan la orientación de la deformación. **b)** Momento del área en el ala anterior derecha, donde la escala de grises señala el área concentrada. **c)** Análisis de variables canónicas entre machos (triángulos y círculo azul) y hembras (puntos y círculo negro).

las alas y la cinemática de vuelo, como *Pararge aegeria* (Linnaeus, 1758), *Speyeria mormonia* (Boisduval, 1869) y *H. charitonia*, nuestros análisis de morfología muestran que las hembras de *H. hecale* presentan un segundo momento de área más cercano al extremo distal, es decir, con una reducción en la longitud del margen externo.

Este diseño morfológico se asocia a una mayor eficiencia en el vuelo en el caso de las hembras, ya que permiten mover el aire con mayor velocidad, generando una sustentación que facilita trayectorias rectas más estables con un menor costo energético. También incrementa la fuerza de despegue, lo que puede estar relacionado

a compensar el costo adicional que representa el peso de un abdomen con múltiples óvulos (Berwaerts *et al.*, 2002; Niitepõld y Boggs, 2015; Ramos-Pérez *et al.*, 2020). En términos de diseño, el borde externo del ala presenta el margen ligeramente redondeado e irregular que reduce los vórtices del aire generado en las puntas alares, esto facilita la evasión de depredadores y la búsqueda de sitios de oviposición (Dudley, 2000).

Por otra parte, los machos en *H. hecale* presentan alas delanteras con un borde anterior recto, el cual entra en contacto directo con el viento y las fuerzas de resistencia. Este diseño alar parece proporcionar una mayor estabilidad durante el despegue y el vuelo de planeo, brindando un despegue y vuelo más controlado (Srygley, 1999; Berwaerts *et al.*, 2002; Le Roy *et al.*, 2019), aunque podría reducir la sustentación, obligando a los machos a aletear con mayor frecuencia o a aumentar su velocidad de vuelo para compensar. Aunque este diseño alar también limita la capacidad de maniobras rápidas, ya que el ala no generaría fuerzas de sustentación adicionales al cambiar de dirección de manera abrupta (Dudley, 2000). Esta morfología difiere con la observada en especies como *Pararge aegeria*, *Heliconius charitonia* y *Heliconius ismenius*, en donde los machos presentan alas más alargadas, lo que les otorga una mayor capacidad de aceleración (Berwaerts *et al.*, 2002; Ramos, 2018), por lo que sería necesario explorar la relación entre la morfología alar y la cinemática de vuelo en el comportamiento de vuelo de los machos, para evaluar si el sistema de apareamiento de la especie no requiere que los machos realicen persecuciones acrobáticas hacia las hembras, o si está asociado a que es una especie no-palatable, por lo que no requiere cambios abruptos de dirección de vuelo para escapar de los depredadores.

Las hembras exhibieron una carga alar mayor a la de los machos, debido al peso extra del abdomen cargado de ovocitos, sin necesidad de un aumento proporcional en la inversión en músculos de vuelo, mientras que los machos presentan una morfología alar más adecuada para vuelos en planeo, lo cual facilita la búsqueda de pareja y alimentación (Mendoza-Cuenca y Macías-Ordóñez, 2009; Ramos, 2018; Darveau, 2024).

Nuestros resultados sustentan que la morfología alar de *Heliconius hecale* podría reflejar un diseño adaptativo asociado principalmente con presiones de selección sexual debido a las características del sistema de apareamiento de *H. hecale* en que los machos buscan activamente a las hembras y cortejan a través de vuelo estático, aunado a los requerimientos fisiológicos de los sexos (ej. producción de óvulos), optimizando el diseño de vuelo de cada sexo sin incrementar los cos-

tos metabólicos. A pesar de la ausencia de dimorfismo en los tamaños relativos de los sexos como la longitud alar, estudios previos en el género *Heliconius*, sugieren que la alimentación que incluye polen proporciona a las hembras la energía metabólica necesaria para satisfacer sus mayores requerimientos. Estas diferencias intraespecíficas subrayan la importancia de la selección sexual y natural en la evolución del diseño de vuelo en los lepidópteros, manteniendo un equilibrio entre las demandas fisiológicas y ecológicas sin comprometer la eficiencia energética de los individuos.

Adicionalmente, y de acuerdo con lo reportado previamente en la literatura, se observa una correlación entre la tasa metabólica basal (TMB) y la tasa metabólica durante el vuelo (TMV) (Dudley, 2000). Esto sugiere que, dado el comportamiento de vuelo de la especie con un ritmo de aleteo constante y de alto esfuerzo, los individuos dependen de una maquinaria metabólica altamente eficiente para mantener la funcionalidad tanto en reposo como en actividad (Niitepõld y Boggs, 2015; Darveau, 2024). En consecuencia, las presiones selectivas que actúan sobre la tasa metabólica basal parecen influir en la eficiencia durante el vuelo, de manera que cualquier modificación en el comportamiento de vuelo repercute en la tasa basal.

La evidencia sobre las tasas metabólicas de *Heliconius hecale* sustentan que las diferencias en la relación entre la proporción de aspecto tales como las diferencias en el diseño de las alas y la carga alar de hembras y machos podría representar diseños adaptativos que equilibran el costo de vuelo entre los sexos. Es de suma importancia corroborar las predicciones de la aerodinámica de vuelo comparando con observaciones directas en campo de la velocidad y frecuencia de aleteo de cada sexo, para ratificar los resultados de este estudio. También se hace necesario extender estos estudios a la observación directa de las frecuencias y los tipos de vuelo que realizan las especies durante el forrajeo y la conducta reproductiva. En ese contexto, al ser *H. hecale* una especie con apareamiento de tipo adulto, es necesario cuantificar el costo en tiempo y energía de los vuelos de cortejo de los machos para poder determinar si está relacionado y cuál es su influencia en el diseño morfológico, por ello, se requiere una comparación de estas variables para una mejor comprensión de los trade-offs obtenidos para alcanzar un mejor desempeño de vuelo y metabólico en lepidópteros.

Agradecimientos

A Yesica Reyes y Andros Hernández por su apoyo en el

uso del respirómetro y en el trabajo de campo en Xalapa. Al mariposario Spyrogira en San José, Costa Rica por suministrar las pupas con las que se llevó a cabo la investigación. Al Biol. Octavio Rivera Hernández responsable del mariposario Siwiní del INECOL por su apoyo para el cuidado de las mariposas durante este trabajo, así como al Dr. Milton Díaz y al Jardín Botánico Francisco Javier Clavijero por permitir la estancia académica de Itzel Salas durante el desarrollo de este trabajo.

Referencias

- Akand S, Bashar M, Rahman S, Khan H (2018). Morphometric variation in the species of two subfamilies of lycaenid butterflies (Lepidoptera: Lycaenidae) of Bangladesh. *Journal of Biodiversity Conservation and Bioresource Management* 3(1):9-16. doi:10.3329/jbcbm.v3i1.36756
- Arrese EL, Soulages JL (2010). Insect fat body: Energy, metabolism, and regulation. *Annual Review of Entomology* 55(1):207-225. doi:10.1146/annurev-ento-112408-085356
- Berwaerts K, Van Dyck H, Aerts P (2002). Does flight morphology relate to flight performance? An experimental test with the butterfly *Pararge aegeria*. *Functional Ecology* 16(4):484-491. doi:10.1046/j.1365-2435.2002.00650.x
- Brown KS (1976). An illustrated key to the silvaniform *Heliconius* (Lepidoptera: Nymphalidae) with descriptions of new subspecies. *Transactions of the American Entomological Society* 102(3):373-484.
- Brown KS (1981). The biology of *Heliconius* and related genera. *Annual Review of Entomology* 26(1):427-457. doi:10.1146/annurev.en.26.010181.002235
- Canzano AA, Krockenberger AA, Jones RE, Seymour JE (2006). Rates of metabolism in diapausing and reproductively active tropical butterflies, *Euploea core* and *Euploea sylvester* (Lepidoptera: Nymphalidae). *Physiological Entomology* 31(2):184-189. doi:10.1111/j.1365-3032.2006.00506.x
- Chazot N, Panara S, Zilbermann N, Blandin P, Poul YL, Cornette R, Elias M, Debat V (2016). Morpho morphometrics: Shared ancestry and selection drive the evolution of wing size and shape in Morpho butterflies. *Evolution* 70(1):181-194. doi:10.1111/evo.12842
- Darveau C (2024). Insect flight energetics and the evolution of size, form and function. *Integrative and Comparative Biology* 64(2):586-597. doi:10.1093/icb/icae028
- Dasmahapatra KK, Walters JR, Briscoe AD, Davey JW, Whibley A, Nadeau NJ, Zimin AV, Hughes DST, Ferguson LC, Martin SH, Salazar C, Lewis JJ, Adler S, Ahn S, Baker DA, Baxter SW, Chamberlain NL, Chauhan R, Counterman BA, Jiggins CD (2012). Butterfly genome reveals promiscuous exchange of mimicry adaptations among species. *Nature* 487(7405):94-98. doi:10.1038/nature11041
- Dudley R (2000). The biomechanics of insect flight: Form, function, evolution. *Princeton University Press*, 496 pp. ISBN: 9780691094915
- Estrada C, Jiggins CD (2002). Patterns of pollen feeding and habitat preference among *Heliconius* species. *Ecological Entomology* 27(4):448-456. doi:10.1046/j.1365-2311.2002.00434.x
- Finkbeiner SD, Briscoe AD, Reed RD (2014). Warning signals are seductive: Relative contributions of color and pattern to predator avoidance and mate attraction in *Heliconius* butterflies. *Evolution* 68(12):3410-3420. doi:10.1111/evo.12524
- Kronforst MR, Gilbert LE (2007). The population genetics of mimetic diversity in *Heliconius* butterflies. *Proceedings of The Royal Society B Biological Sciences* 275(1634):493-500. doi:10.1098/rspb.2007.1378
- Le Roy C, Debat V, Llaurens V (2019). Adaptive evolution of butterfly wing shape: from morphology to behavior. *Biological Reviews/Philosophical Society* 94(4):1261-1281. doi:10.1111/brv.12500
- Lighton JRB (2008). Measuring metabolic rates: A manual for scientists. *Oxford University Press*, 217 pp. ISBN: 9780191868672.
- Mendoza-Cuenca L, Macías-Ordóñez R (2005). Foraging polymorphism in *Heliconius charitonia* (Lepidoptera: Nymphalidae): morphological constraints and behavioural compensation. *Journal of Tropical Ecology*, 21(4):407-415. doi:10.1017/s0266467405002385
- Mendoza-Cuenca L, Macías-Ordóñez R (2009). Female asynchrony may drive disruptive sexual selection on male mating phenotypes in a *Heliconius* butterfly. *Behavioral Ecology* 21(1):144-152. doi:10.1093/beheco/arp163
- Moreno-Barajas R, Rodríguez-Romero FJ, Velázquez-Rodríguez AS, Sánchez-Nava P (2014). Análisis ecomorfológicos y estudios de caso en México. *Universidad Autónoma del Estado de México* 154 pp. ISBN: 9786074225006.
- Niitepõld K, Boggs CL (2015). Effects of increased flight on the energetics and life history of the butterfly *Speyeria mormonia*. *PLoS ONE* 10(10): e0140104. doi:10.1371/journal.pone.0140104
- Niitepõld K, Perez A, Boggs CL, (2014). Aging, life span, and energetics under adult dietary restriction in Lepidoptera. *Physiological and Biochemical Zoology* 87(5), 684-694. doi:10.1086/677570
- Niven JE, Scharlemann JP (2005). Do insect metabolic rates at rest and during flight scale with body mass? *Biology Letters* 1(3):346-349. doi:10.1098/rsbl.2005.0311
- Ramos PVI (2018). Variación morfológica asociada al desempeño metabólico de vuelo de *Heliconius charitonia*. Tesis de Maestría, *Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo*, Pp 39.

- Ramos-Pérez VI, Castellanos I, Robinson-Fuentes VA, Macías-Ordóñez R, Mendoza-Cuenca L (2020). Sex-related interannual plasticity in wing morphological design in *Heliconius charithonia* enhances flight metabolic performance. *PLoS ONE* 15(10):e0239620. doi:10.1371/journal.pone.0239620
- Reinhold K (1999). Energetically costly behaviour and the evolution of resting metabolic rate in insects. *Functional Ecology* 13(2):217-224. doi:10.1046/j.1365-2435.1999.00300.x
- Rossato DO, Boligon D, Fornel R, Kronforst MR, Gonçalves GL, Moreira GRP (2018). Subtle variation in size and shape of the whole forewing and the red band among co-mimics revealed by geometric morphometric analysis in *Heliconius* butterflies. *Ecology and Evolution* 8(6):3280-3295. doi:10.1002/ece3.3916
- Rosser N, Phillimore AB., Huertas B, Willmott KR, Mallet J (2012). Testing historical explanations for gradients in species richness in heliconiine butterflies of tropical America. *Biological Journal of The Linnean Society* 105(3):479-497. doi:10.1111/j.1095-8312.2011.01814.x
- Sheets HD (2014). Integrated morphometrics package (IMP) 8 [Software de computadora] <https://www.animal-behaviour.de/imp/> [consultado el 20 de octubre del 2024]
- Srygley RB (1999). Locomotor mimicry in *Heliconius* butterflies: contrast analyses of flight morphology and kinematics. *Philosophical Transactions of The Royal Society B Biological Sciences* 354(1380):203-214. doi:10.1098/rstb.1999.0372
- Tsai C, Childers RA, Shi NN, Ren C, Pelaez JN, Bernard GD, Pierce NE, Yu N (2020). Physical and behavioral adaptations to prevent overheating of the living wings of butterflies. *Nature Communications* 11(1). doi:10.1038/s41467-020-14408-8
- Woods WA, Wood CAL, Ebersole J, Stevenson RD (2010). Metabolic rate variation over adult lifetime in the butterfly *Vanessa cardui* (Nymphalidae: Nymphalinae): aging, feeding, and repeatability. *Physiological and Biochemical Zoology* 83(5):858-868. doi:10.1086/656216
- Young AM (1975). Observations on the life cycle of *Heliconius hecale zuleika* (Hewitson) in Costa Rica. *The Pan-Pacific Entomologist* 51(1):76-85.



Strong dissuasive effect of a synthetic capsaicinoid against whitefly infestation in avocado trees

José López Hernández¹, José López Bucio¹ , Jesús Salvador López Bucio^{2*} 

¹ Instituto de Investigaciones Químico-Biológicas, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Edificio B3, Ciudad Universitaria; 58030, Morelia, Michoacán, México.

² CONACYT, Instituto de Investigaciones Químico-Biológicas, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Edificio B3, Ciudad Universitaria. C. P. 58030, Morelia, Michoacán, México.

Historial

Manuscrito recibido: 29 de enero de 2025

Manuscrito aceptado: 20 de marzo de 2025

Manuscrito publicado: abril 2025

*Autor para correspondencia

Jesús Salvador López Bucio

e-mail: salvador.bucio@umich.mx

ORCID: 0000-0002-6173-8645

Abstract

Whitefly infestation is a major threat to horticultural crops. The control of these sap-sucking insects could be performed by application of insecticides, which may be toxic to untarget species such as honeybees and other beneficial insects. Safety of consumers is a priority and urges the development of alternatives to control pathogens and pests, thus identification of novel natural and/or synthetic products to control insect pests not harmful for humans or pollinators is an urgent need. The persistent seasonal, yearly occurrence of whitefly infestations, offered the opportunity to test promising biostimulant, non toxic molecules as dissuasive products. In this report, we show that whitefly infestation in avocado trees in the field causes the spread of chlorotic halos, blade distortion and wilt of leaves. Through serial aspersions of *N*-vanillyl-octanamide (ABX-I), a synthetic capsaicinoid to the avocado trees, a clear repellent effect was observed against adult whiteflies that approached the trees at sunny hours but did not feed on leaves. The number of whiteflies resting on leaves decreased in the following days after capsaicinoid application. These data reveal the possibility to control whitefly pest via application of a capsaicinoid-related compound.

Keywords: whitefly, *N*-vanillyl-octanamide, capsaicinoids, avocado, insecticides.

Introduction

The production of avocado (*Persea americana* Mill.) is important for the economy of several countries, being México the largest producer of the world. The fruit has a growing demand owing its rich content of nutrients, antioxidants and vitamins, including magnesium, potassium, folic acid, omega 3, lutein and fibre (Lu *et al.*, 2009; Dreher and Davenport, 2013; Di Stefano *et al.*, 2017; Flores *et al.*, 2019). The Hass variety is the preferred by the consumer and the most widely cultivated. However, it has a number of destructive pests that halt growth of the tree, particularly during the first years after planting and reduce fruit quality and yield in adult trees (Walling, 2008; Guarnaccia *et al.*, 2016).

Whiteflies are insects that cause drastic losses to crops, having more than 1500 species already described, which associate with vascular plants, including angiosperms and gymnosperms. The insects feed on leaves for prolonged periods, extract nutrients from the phloem and may spread the growth of viruses and fungal

pathogens (Martin, 1987; Martin *et al.*, 2000; Jones, 2003). Additionally, through the excretion of honeydew by whiteflies, the growth of sooty mold on leaves is induced and photosynthesis can be inhibited (Sani *et al.*, 2020). Hosts of high economical value susceptible to whitefly damage are citrus, avocado, squash, potato, cucumber, grape and tomato amongst nearly other 250 horticultural varieties and fruit trees (Walling, 2008; Malumphy *et al.*, 2009).

The infestation success of whiteflies is related to an imbalance of jasmonic acid-inducible defences that protect plants against insects, and such response is compromised not only in infested plants, but also in their neighbours enabling rapid spread of the pest (Zarate *et al.*, 2007; Zhang *et al.*, 2013; 2019). The monoterpenes β -myrcene and p -cymene as well as the sesquiterpene β -caryophyllene are released by tomato plants after initial infestation by the whitefly *Bemisia tabaci* (Gennadius) MAEN1, and application of β -myrcene or β -caryophyllene decreased JA levels, indicating that

these volatiles mediate the sensitivity of plants to these devastating insects (Zhang *et al.*, 2019). Other stressing factors such as drought, nutrient scarcity, hail falls and cold temperatures may further aggravate the stress imposed by whiteflies. In this sense, ABA signaling and glucosinolate accumulation play critical roles in plant resistance to the cabbage whitefly *Aleyrodes proletella* (Broekgaarden *et al.*, 2018).

Application of insecticides is a widespread strategy to control insect infestation in the field, but it has to be done in a regular manner and may lead to undesirable mortality of pollinators and other beneficial insects for ecosystem balance (Potts *et al.*, 2010; Sun *et al.*, 2018; Smith *et al.*, 2019). Different insecticides are used to control whiteflies, including neonicotinoids, pymetrozene, methamidophos, malathion, pyrethroids, endosulfan, pyriproxyfen and buprofezin. However, all of them have effects on non-target organisms and also contaminate the environment. In addition, whitefly biotypes resistant to these insecticides have emerged (Atansly *et al.*, 2016; Sani *et al.*, 2020). This has led to the development of alternatives that include biological control using entomopathogenic fungi that infect and kill whiteflies (Sani *et al.*, 2020). It is also necessary to find compounds with protective effects on crops against pests without adverse effects to beneficial insects or to the environment. In this scenario, the identification of natural, plant-derived metabolites offered promising compounds to control insect pests, with less or null deleterious effects to untarget species (Cantrell *et al.*, 2012; Yan *et al.*, 2018; Hernández-Carlos and Gamboa-Angulo, 2019).

Capsaicin is the bioactive molecule responsible of the pungent taste of hot chili peppers (Thiele *et al.*, 2008; Lu *et al.*, 2017). Capsaicin is not only a human edible compound with multiple potential benefits to health (Hayman and Kam, 2008), it is thought to be an environmentally friendly molecule and an interesting alternative to pesticides (Vázquez-Fuentes *et al.*, 2021). Indeed, it is increasingly being used as an insect repellent because its fast-acting and strong irritant effects. Capsaicin itself, or synthetic-derived capsaicinoids, may be applied to plant foliage to repel insect pests (Claros-Cuadrado *et al.*, 2019; Li *et al.*, 2019), but experimental proof of its bioactivity against whitefly infestation under field conditions remains to be gathered.

In this report, we show that whitefly infestation in avocado trees in the field correlates with the spread of chlorotic halos, and blade distortion of leaves. Application of *N*-vanillyl-octanamide, also termed ABX-I, a synthetic capsaicinoid, strongly reduced the number of winged adults resting on leaves at early morning and re-

pels feeding when the whiteflies are most active during the sunny day hours. Our data provide the foundation for the use of capsaicinoids to protect plants from whitefly pests.

Materials and methods

Preparation and application of *N*-vanillyl-octanamide (ABX-I)

N-vanillyl-octanamide (ABX-I) was kindly provided by Applied Biotech SA de CV, México. The purity of the compound is >95%, confirmed by HPLC and RMN as described in Castillo and coworkers (2007). 300 mM ABX-I stock was prepared dissolving a given amount of the compound in a water:polysorbate 20 (7:3 v/v proportion), the final volume was adjusted to 20 liters with water. Applications were performed spraying the trees with the ABX-I solution using a sprayer backpack ensuring that the overall leaf and stem surfaces were gently covered.

In 2019 two monthly applications in March and April were done to 40 trees at 10 h in the morning when the whiteflies flew around and feed on leaves of trees from a newly established avocado orchard, located at 19° 29' 43.9" N, 101° 43' 33.1" W. These applications allowed to empirically note the dissuasive effect on the insects. In year 2020, ABX-I was applied in March, April and May at early morning (7 h in the morning) to 40 trees, when the insects were still resting on leaves. In 2021, comparable applications to 2020 were performed, which aided to empirically confirm the dissuasive effect of ABX-I and the reduction of leaf chlorosis symptoms.

Determination of whitefly infestation

Visual examination was done in the following four days after ABX-I application and quantitative measurements of infestation was done the next day after application by counting the insects lying on at least 10 leaves from previously selected and marked tree branches. Data recorded are from 10 independent trees selected from a section covering 40 trees of the orchard under high infestation.

Statistical analysis

One-way ANOVA followed by Tukey's post hoc or Student t-test were performed to determine significant differences ($P < 0.05$) using GraphPad prism 5 software.

Whitefly sampling and imaging

Whiteflies were collected at 7 h early morning from infested avocado trees growing in the field during the

period 25 March-16 April 2020. The insects resting on leaves were carefully transported to the laboratory inside transparent plastic containers with lids, and small holes were done to the lids to enable aeration. 10 individuals were fixed in a solution of ethanol 70% and then mounted on slides and photographed using a dissecting microscope or a microscope with Nomarsky optics (Leica DM500B), and representative images were taken.

Results

Whitefly infestation in avocado

During 2019, one year after planting the avocado trees, whitefly colonies were found resting on the trees at early morning and start to fly as sunlight and temperature increased. Two ABX-I monthly applications in March and April were done to 40 trees at 10 h in the morning when the whiteflies were flying around the leaves of trees and feeding on leaves. These applications allowed us to empirically note the dissuasive effect of ABX-I to the insects upon inspection of the whitefly population resting on the same trees prior and one day after application of ABX-I (Figure 1 a-f).

At the beginning of April 2020, winged adults started to be observed again, which suggests that the spread of the pest is season-dependent. The insects were noticeably observed flying during the sunny hours, and approaching the leaves of trees to feed on them, and resting at night and early morning on leaf undersides (Figure 2 a-c).

Some winged adults were collected and observed under Nomarsky optics microscopy. Lateral, ventral and dorsal views of the insects evidenced roughly 2 mm yellowish bodies with four whitish wings, in which the greater, anterior wings were decorated with black bands and/or spots (Figure 3 a-d). Examination of the head revealed a large stylet (Figure 3a), a needle-like structure used to suck sap from the vascular tissues of leaves.

Comparison of the obtained images with previous descriptions of whiteflies did not allow us to define the taxonomy of the insects, which require further detailed microscopic examination and/or molecular typification.

The spread of leaf chlorosis in avocado trees correlates with the feeding by whiteflies

The leaves in which the flies were detected, developed interveinal chlorosis and blade distortion from 8-10 days later (Figure 4a, b). Some of the damaged leaves failed, causing defoliation gaps in the tree. These data

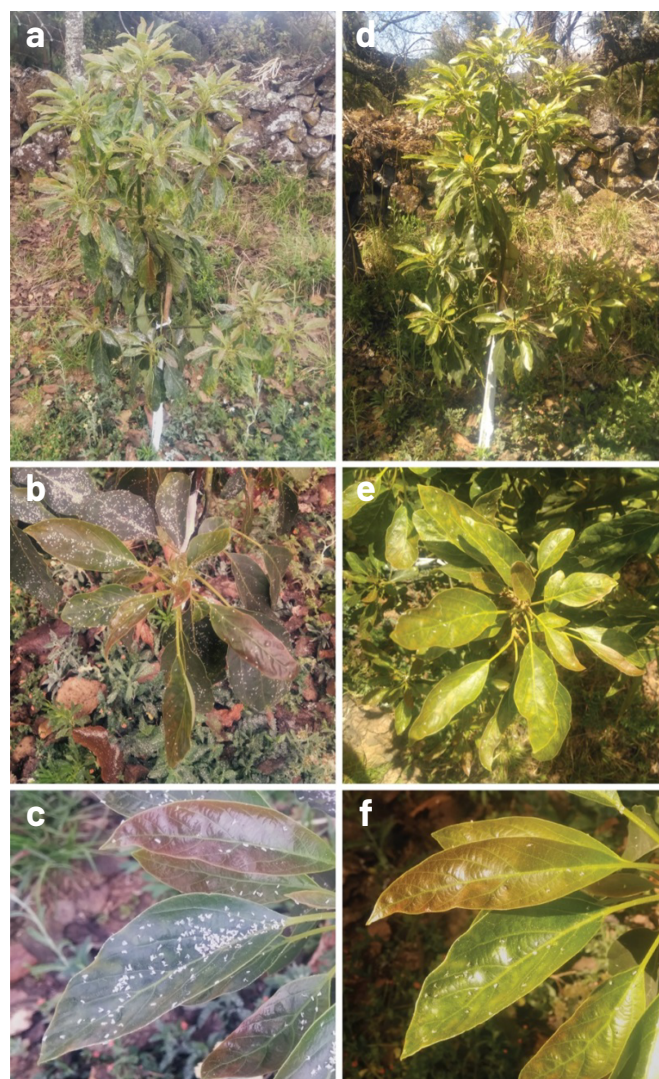


Figure 1. Whitefly infestation of avocado trees in 2019 spring. Photographs of a representative tree in a highly infested zone of the orchard showing the whitefly populations resting on its leaves before (a, b, c) and after one day of ABX-I application (d, e, f). The photographs were taken at 7 h, early morning. For reference, the height of the tree in a and d was 1.14 m.

collectively suggest that the insect population and time of infestation coincided with leaf damage, although certainly, we cannot at this stage establish a causal relation.

ABX-I capsaicinoid compound decreases whitefly infestation

Capsaicinoids are natural bioactive compounds that may repel insects or kill them (Claros-Cuadrado *et al.*, 2019; Li *et al.*, 2019). *N*-vanillyl-octanamide can be produced by synthetic means and was named ABX-I (Castillo *et al.*, 2007). It differs from capsaicin by an octanamide group instead of 8-methyl-nonenamide. To further examine the bioactivity of ABX-I already observed during the



Figure 2. Whitefly infestation of avocado trees in 2020 spring. **a)** Phenotype of a 2.15 m avocado tree growing in the field at the beginning of spring season. **b)** A newly developed tree branch showing the leaves at progressive developmental stages marked with numbers. **c)** Close up of **(b)** to highlight the whiteflies resting on the abaxial side of leaves. All images were taken between 7-8 h in the morning, at a time where the insects were resting behind leaf blades. Scale bars **a:** 0.5 m; **b, c:** 10 cm.

previous year (2019), and to gather quantitative data of the antagonistic effects of ABX-I on the pest, in 2020 40 trees in a highly infested section of the orchard were thoroughly sprayed with a solution of 300 μ M ABX-I, ensuring that leaves and stems were gently covered. A representative tree was chosen, showing the whitefly infestation prior and after ABX-I application. After each application, it was observed a clear repellent effect that lasted for several hours against the whiteflies, the insects approached the trees but did not feed on leaves. The next day, the same ABX-I-treated trees and leaves were examined and photographed early in the morning, showing the absence of the whiteflies (**Figure 5a, b**).

To determine the magnitude of the infestation prior to ABX-I application, the number of adult whiteflies was quantified in ten developing leaves within a single

branch with their position on the branch marked with rising numbers as in **Figure 2b** and **2c**, from earlier stages indicating small leaves to well developed laminas, measuring 10-15 cm in length (stages 6-10). The number of insects increased from roughly 15 in stage 1 to roughly 130 in stage 10 leaves (**Figure 6a**). The average number of whiteflies per avocado branch was of 70 individuals (**Figure 6b**). Noteworthy, after ABX-I applications, the number of whiteflies decreased in leaves at all developmental stages and their average number per branch was of 10. An analysis of persistence of the insects on the branch indicated that the capsaicinoid effectively controlled the whitefly pest at the following 3 days after application, with only 12% of insect persistence (**Figure 6c**).

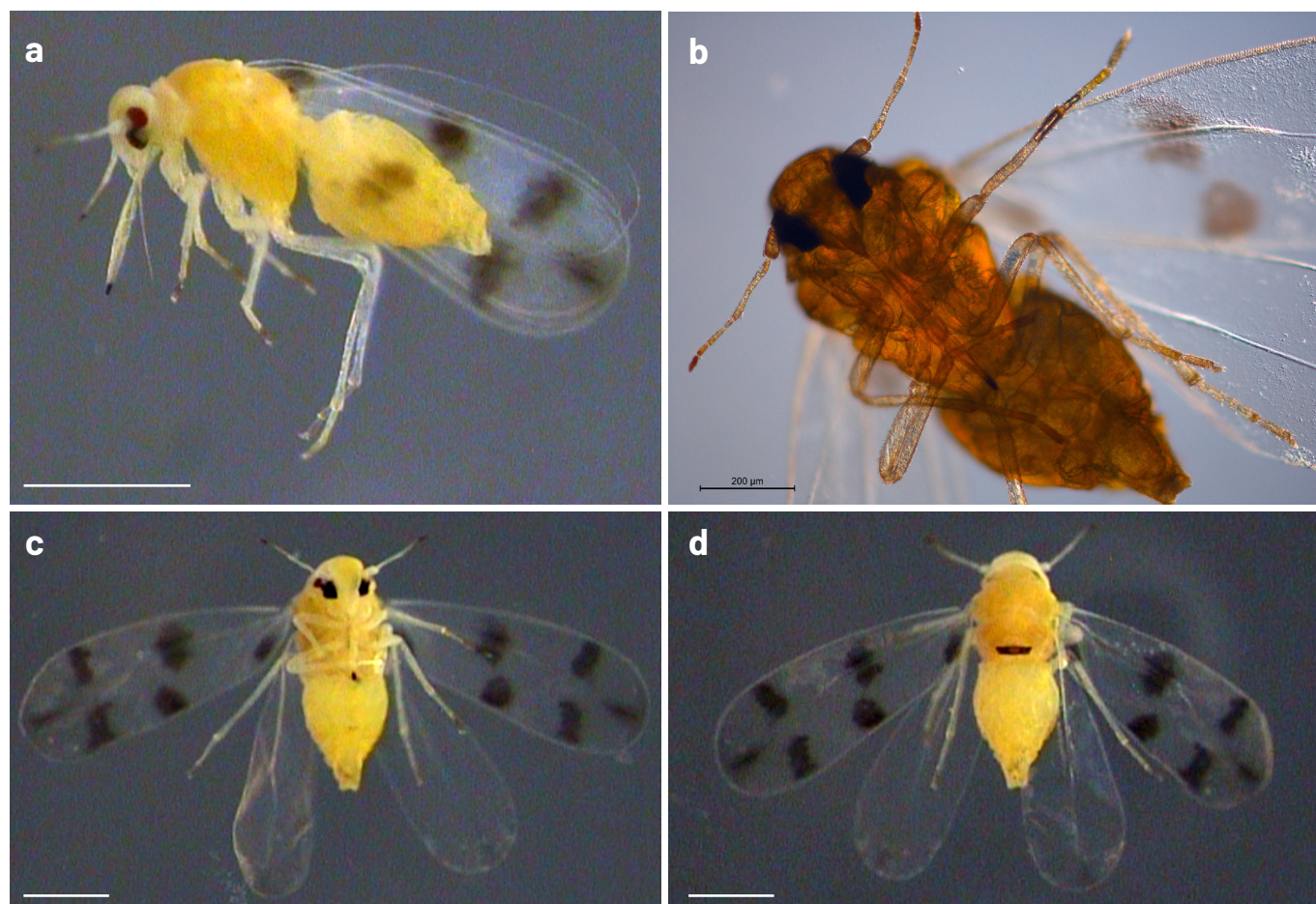


Figure 3. Adult phenotypes of whiteflies captured on leaves of avocado trees. **a)** Lateral, **b-c)** Ventral, **d)** Dorsal views of winged adults showing four wings, the anterior wings were decorated with black bands or spots. Scale bars: 1 mm.



Figure 4. Intervetinal chlorosis in leaves as a major symptom of whitefly damage. **a)** Several branches of a tree showing the intervetinal chlorosis on leaves. **b)** A single leaf showing the patchy appearance. Scale bars: 10 cm.

Discussion

In this report, we documented the seasonal whitefly visits in an avocado orchard in the field of Michoacán state, México. Weekly visual inspection to the orchard in three subsequent years after planting (2019-2021) evidenced

the appearance of winged adults by the end of March to beginning of April and the population decreased with the first rains by June. This indicates that the pest may be seasonal and occurred by the spring.

Different whitefly genders from *Aleyrodidae* family

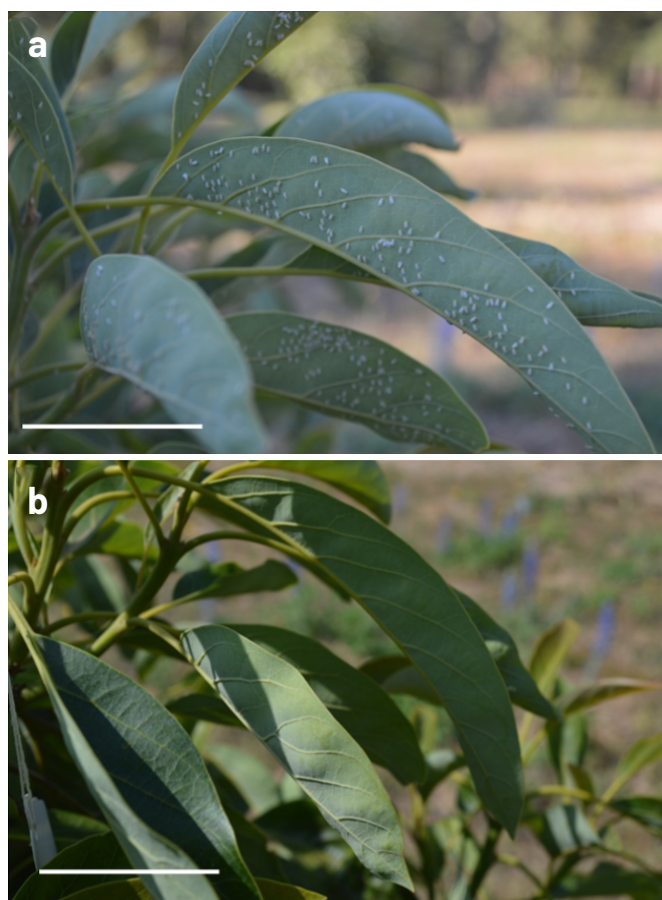


Figure 5. Representative images of whiteflies resting on avocado leaves before and after application of ABX-I. **a)** Photograph of adult whiteflies resting behind leaves at early morning prior to ABX-I application. **b)** Photograph of the same leaves after three serial applications of ABX-I. Note the decrease in the number of flies resting on leaves following capsaicinoid treatment. Scale bars in **a**= 7.5 cm, in **b**= 5 cm.

have been suggested as potential threats to avocado in different countries including México (Varón-Devia *et al.*, 2016). However, there is no evidence regarding the species infesting avocado orchards in Michoacán state, nor consequences of such infestation or specific control strategies. Current research identified some whitefly species from avocado orchards in the state of Morelos, México, including *Tetraleurodes perseae*, *Trialeurodes vaporariorum* and *Paraleyrodes minei* (García-Palacios *et al.*, 2016; García-Palacios *et al.*, 2020). *Tetraleurodes perseae* was found in highlands orchards, where the population increases as temperature raises, between February and April (García-Palacios *et al.*, 2016). Thus, the whiteflies spreads observed in our study are consistent with these previous reports and may be due to the rise of temperature at spring.

The insects started to be active when the first rays of the sun appeared and activity was highest at sunny

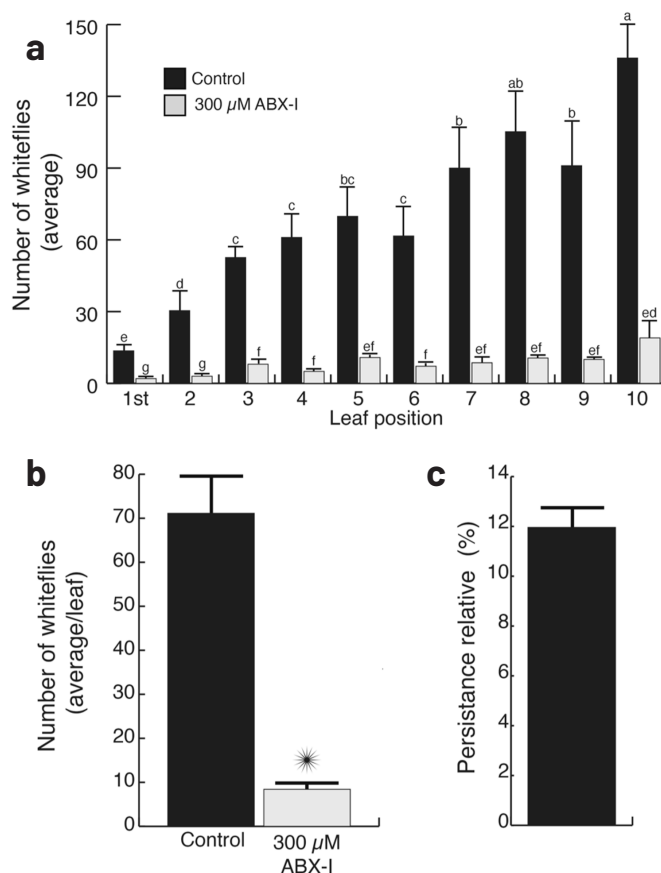


Figure 6. Quantification of the number of whiteflies on avocado leaves before and after application of *N*-vanillyl-octanamide (ABX-I). **a)** Average number of winged whiteflies resting on avocado leaves at early morning (7 h) prior to ABX-I application (black bars) or after application of ABX-I (light brown bars). **b)** Whitefly average from 10 leaves, **c)** Percentage of persistence of whiteflies after ABX-I application relative to number of whiteflies before ABX-I application. Bars in graphs show the means $\pm$ standard error, $n=10$. Different letters in **a)** indicate statistical differences as obtained by ANOVA Tukey's post hoc analysis ($P < 0.05$). Asterisc in **b)** indicate statistical differences determined through a Student t-test ($P < 0.01$).

hours, between 10-12 h in the morning, then approached the trees to feed on leaves, which correlated with appearance of chlorosis, and leaf malformations at late days. The symptoms could be related to the feeding behaviour of the insects, which extract phloem sap using their stylet and compromise the nutritional status of leaf tissues. According to this assumption, leaf symptoms in most trees could be reversed by application of organic amendments or fertilizers during the rainy season of 2019-2021, which suggests the reversibility of the damage.

Another interesting observation was that the winged adults rested on the undersides of leaves at night and early morning, and thus the chemical control would be better if the product is applied at early morning rather than at sunny hours. Due to their flying behavior, pesticide applications at sunny hours would be ineffective for

whiteflies in avocado, since the insects can scape and move to distant trees or to wild plants. Moreover, at this time most pollinators such as honeybees were observed to feed on flowers of wild plants or flowers from avocado trees, and the application of insecticides or other bioactive molecules is thus not recommended. The application of ABX-I at early morning is highly recommended, when the whiteflies still rest behind avocado leaves and no pollinators were still active on the orchard.

For seasonal pests, plant protection may occur by the use of repellent substances that avoid insect feeding on leaves, and in consequence, halt population increases. Temporary suppression of whiteflies may be achieved either by application of insecticides or via alternative products. Capsaicin is the main bioactive component of hot chili peppers and is thought to play an adaptive and ecological role for the producing plants (Thiele *et al.*, 2008; Lu *et al.*, 2017). Capsaicin and few related molecules have been applied with success to control insect pests without toxic effects for pollinators or humans (Claros-Cuadrado *et al.*, 2019; Li *et al.*, 2019).

ABX-I inhibited growth of phytopathogens *Colletotrichum gloeosporioides*, *Botrytis cinerea*, *Colletotrichum acutatum*, *Fusarium* sp., and *Rhizoctonia solani* AG2 in vitro and spray application to tomato or avocado plants did not compromise growth and development, which uncovers its potential for the control of fungal diseases (Vázquez-Fuentes *et al.*, 2021). Here, we provide evidence that the compound dissuades whiteflies and also confers protection to avocado trees in the field. Whiteflies are known to feed on many different, wild and cultivated hosts and therefore, the protective function of ABX-I could be extended to other vegetables and crop species.

When controlling the whitefly pest, it should be kept in mind the extraordinary complexity of the insect-plant communication that determines host sensitivity. Monoterpene and sesquiterpene volatiles are emitted by plants that are attacked by whiteflies, which turn off the jasmonic acid-dependent defenses in their neighbours (Zarate *et al.*, 2007; Zhang *et al.*, 2013; 2019). It is at present unknown if the application of capsaicinoids actually disrupt such chemical communication, but it is an interesting possibility.

Conclusion

This report showed the potential of a synthetic, biostimulant capsaicinoid, ABX-I for the control of seasonal occurrence of whitefly pest in avocado trees. The leaf damage and chlorosis is reversible upon

nutritional management and the number of whiteflies feeding on leaves could be decreased via a highly repellent effect upon application of the capsaicinoid, which opens the door for the use of capsaicin-related compounds to protect horticultural and fruit trees from the attacking insects.

Acknowledgements

The authors appreciate the kind donation of ABX-I by Applied Biotech SA de CV, Cuernavaca, México.

References

- Broekgaarden C, Pelgrom KTB, Bucher J, van Dam NM, Grosser K, Pieterse CMJ, *et al.* (2018). Combining QTL mapping with transcriptome and metabolome profiling reveals a possible role for ABA signaling in resistance against the cabbage whitefly in cabbage. *PLoS ONE* 13(11):e0206103. doi:10.1371/journal.pone.0206103.
- Cantrell CL, Dayan FE, Duke SO (2012). Natural products as sources for new pesticides. *J. Nat. Prod.* 75:1231-1242.
- Castillo E, Torres-Gavilán A, Severiano P, Navarro A, López-Munguía A (2007). Lipase-Catalyzed synthesis of pungent capsaicin analogues. *Food Chem.* 100:1202-1208.
- Claros-Cuadrado JL, Pinillos EO, Tito R, Seguil-Mirónes C, Gamarramendoza N (2019). Insecticidal properties of capsaicinoids and glucosinolates extracted from *Capsicum chinense* and *Tropaeolum tuberosum*. *Insects* 10:132.
- Di Stefano V, Avellone G, Bongiorno D, Indelicato S, Massenti R, Lo Bianco R (2017). Quantitative evaluation of the phenolic profile in fruits of six avocado (*Persea americana*) cultivars by ultra-high-performance liquid chromatography-heated electrospray-mass spectrometry. *Int. J. Food Prop.* 20:1302-1312.
- Dreher ML, Davenport A (2013). Hass Avocado composition and potential health effects. *Crit. Rev. Food Sci. Nutr.* 5:738-750.
- Flores M, Saravia C, Vergara CE, Avila F, Valdés H, Ortiz-Viedma J (2019). Avocado oil: characteristics, properties, and applications. *Molecules.* 24(11):2172. doi:10.3390/molecules24112172
- Guarnaccia V, Vitale A, Cirvilleri G, Aiello D, Susca A, Epifani F, Perrone G, Polizzi G (2016). Characterisation and pathogenicity of fungal species associated with branch cankers and stem-end rot of avocado in Italy. *Eur. J. Plant Pathol.* 146:963-976.
- García-Palacios D, Bautista-Martínez N, Lagunes-Tejeda Á, Carrillo-Sánchez JL, Nieto-Ángel D, García-Gutiérrez C (2016). Population fluctuation and altitudinal distribution of *Tetraleurodes perseae* (Nakahara) (Hemiptera: Aleyrodidae) in Avocado (Lauraceae) in Morelos, Mexico. *J. Insect Sci.* 16(1):102.
- García-Palacios D, Martínez-Bautista N, Sánchez-Roldán MM, Rojas-Soto L, García-Ávila CJ (2020). Morphological and molecular identification of whiteflies associated with Avocado at Morelos, Mexico. *Southwest. Entomol.* 45(1):109-122. doi:10.3958/059.045.0112.

- Hayman, M, Kam P (2008). Capsaicin: A review of its pharmacology and clinical applications. *Curr. Anaesth. Crit. Care* 19:338-343.
- Hernández-Carlos B, Gamboa-Angulo M (2019). Insecticidal and nematicidal contributions of Mexican flora in the search for safer biopesticides. *Molecules* 24(5): 897. doi:10.3390/molecules24050897
- Jones DR (2003). Plant viruses transmitted by whiteflies. *Eur. J. Plant Pathol.* 109:195–219.
- Li B, Yang M, Shi R, Ye M (2019). Insecticidal activity of natural capsaicinoids against several agricultural insects. *Nat. Prod. Commun.* 14 (7):1934578X19862695. doi:10.1177/1934578X19862695.
- Lu QY, Zhang Y, Wang Y, Wang D, Lee RP, Gao K, Byrns R, Heber D (2009). California Hass avocado: profiling of carotenoids, tocopherol, fatty acid, and fat content during maturation and from different growing areas. *J. Agric. Food Chem.* 57:10408-10413.
- Lu M, Ho CT, Huang Q (2017). Extraction, bioavailability, and bioefficacy of capsaicinoids. *J. Food Drug. Anal.* 25:27-36.
- Malumphy C, Ostrauskas H, Pye D (2009). A faunistic review of the whiteflies (Hemiptera, Aleyrodidae) of Lithuania. *Act. Zoologica Lit.* 19:49–57.
- Martin JH (1987). An identification guide to common whitefly pest species of the world (Homopt Aleyrodidae). *Int. J. Pest Manag.* 33:298-322.
- Martin JH, Misfud D, Rapisarda C (2000). The whiteflies (Hemiptera: Aleyrodidae) of Europe and the Mediterranean. *Bull. Entomol. Res.* 90:407–448.
- Potts SG, Biesmeijer JC, Kremen C, Neumann P, Schweiger O, Kunin WE (2010). Global pollinator declines: trends, impacts and drivers. *Trends Ecol. Evol.* 25:345–353.
- Sani I, Ismail SI, Abdullah S, Jalinas J, Jamian S, Saad N (2020). A review of the biology and control of whitefly, *Bemisia tabaci* (Hemiptera: Aleyrodidae), with special reference to biological control using entomopathogenic fungi. *Insects* 11(9):619. doi:10.3390/insects11090619.
- Smith HA, Nagle CA, MacVean CM, Vallad G.E., Van Santen E, Hutton SF (2019). Comparing host plant resistance, repellent mulches, and plant insecticides for management of *Bemisia tabaci* MEAM1 (Hemiptera: Aleyrodidae) and tomato Yellow Leaf Curl Virus. *J. Econ. Entomol.* 112:236-243.
- Stansly PA, Smith HA, Seal DR, McAvoy E, Polston JE, Gilreath PR, Schuster DJ (2016). Management of whiteflies, whitefly-vectored plant virus, and insecticide resistance for vegetable production in southern Florida. *EDIS* 2007(17). doi:10.32473/edis-in695-2007.
- Sun S, Sidhu V, Rong Y, Zheng Y (2018) Pesticide pollution in agricultural soils and sustainable remediation methods: a review. *Curr. Pollution Rep.* 4(3):240-250. doi:10.1007/s40726-018-0092-x.
- Thiele R, Mueller-Seitz E, Petz M (2008). Chili pepper fruits: presumed precursors of fatty acids characteristic for capsaicinoids. *J. Agric. Food Chem.* 56:4219-4224.
- Varón-Devia EH, Caicedo-Riascos LS, Quiroga LF (2016). Generalidades de la mosca blanca del aguacate. In Manejo de mosca blanca (*Paraleyrodes* sp.) en aguacate (*Persea americana* Mill.), pp. 19-33. Mosquera, Colombia. Corpoica.
- Vázquez-Fuentes S, Pelagio-Flores R, López-Bucio, J. *et al.* (2021). *N*-vanillyl-octanamide represses growth of fungal phytopathogens in vitro and confers postharvest protection in tomato and avocado fruits against fungal-induced decay. *Protoplasma* 258:729-741.
- Walling LL (2008). Avoiding effective defenses: Strategies employed by phloem feeding insects. *Plant Physiol.* 146:859–866.
- Yan Y, Liu Q, Jacobsen SE, Tang Y (2018). The impact and prospect of natural product discovery in agriculture: New technologies to explore the diversity of secondary metabolites in plants and microorganisms for applications in agriculture. *EMBO Rep.* 19(11):e46824. doi:10.15252/embr.201846824.
- Zarate SI, Kempema LA, Walling LL (2007). Silverleaf whitefly induces salicylic acid defenses and suppresses effectual jasmonic acid defenses. *Plant Physiol.* 143:866–875.
- Zhang PJ, Li WD, Huang F, Zhang JM, Xu FC, Lu YB (2013). Feeding by whiteflies suppresses downstream jasmonic acid signaling by eliciting salicylic acid signaling. *J. Chem. Ecol.* 39(5):612-619. doi:10.1007/s10886-013-0283-2.
- Zhang PJ, Wei JN, Zhao C, Zhang YF, Li CY, Liu S, Dickee M, Yu XP, Turlings T (2019). Airborne host-plant manipulation by whiteflies via an inducible blend of plant volatiles. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 116:7387–7396.



Efecto hipolipemiante del extracto hexánico de flores de *Stenocereus queretaroensis* en ratas diabéticas

Hypolipidemic effect of hexanic extract from *Stenocereus queretaroensis* flowers in diabetic rats

José C. Ayala Almonte¹, Ernestina Gutiérrez Vázquez², Gabriela Rodríguez García¹, Zurizadai Hernández Gallegos¹, Mario A. Gómez Hurtado¹, Rosa E. del Río¹, Asdrúbal Aguilera Méndez^{1*} 

¹ Instituto de Investigaciones Químico Biológicas, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Morelia, Michoacán, 58030, México.

² Instituto de Investigaciones Agropecuarias y Forestales, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Tarímbaro, Michoacán, 58880, México.

Historial

Manuscrito recibido: 4 de septiembre de 2024

Manuscrito aceptado: 11 de febrero de 2025

Manuscrito publicado: abril 2025

*Autor para correspondencia

Asdrúbal Aguilera Méndez

e-mail: amendez@umich.mx.

ORCID: 0000-0003-0326-2068

Resumen

La diabetes está asociada con dislipidemia, lo que aumenta el riesgo de enfermedades cardiovasculares, que son la principal causa de muerte en el mundo. El uso de plantas medicinales es una excelente alternativa debido a su eficacia y a los pocos efectos secundarios que presentan. En este estudio, se exploró el efecto hipolipemiante del extracto hexánico de *Stenocereus queretaroensis* en ratas diabéticas. Se aisló y caracterizó el compuesto mayoritario, Ergosta-5,24(28)-dien-3 β -ol, mediante cromatografía en columna y resonancia magnética nuclear, respectivamente. Se observó una reducción en los lípidos séricos y hepáticos en el grupo tratado con el extracto, lo que sugiere un efecto hipolipemiante en ratas diabéticas y su posible uso terapéutico en las complicaciones lipídicas asociadas con la diabetes.

Palabras clave: *Stenocereus queretaroensis*, hipolipidémico, dislipidemias, triacilglicéridos.

Abstract

Diabetes is associated with dyslipidemia, which increases the risk of cardiovascular diseases, the leading cause of death worldwide. The use of medicinal plants is an excellent alternative due to their efficacy and minimal side effects. In this study, the hypolipidemic effect of the hexane extract of *Stenocereus queretaroensis* was investigated in diabetic rats. The major compound, Ergosta-5,24(28)-dien-3 β -ol, was isolated and characterized by column chromatography and nuclear magnetic resonance, respectively. A decrease in serum and hepatic lipids was observed in the group treated with the extract, suggesting a hypolipidemic effect in diabetic rats and its potential therapeutic use in lipid-related complications associated with diabetes.

Keywords: *Stenocereus queretaroensis*, hypolipidemic, dyslipidemias, triacylglycerols.

Introducción

Las dislipidemias son trastornos causados por niveles anormales de colesterol y triacilglicéridos (TG) en sangre, y son factores de riesgo para enfermedades cardiovasculares (Moreira *et al.*, 2022). Son la principal causa de morbilidad en pacientes diabéticos, con una mortalidad asociada que puede alcanzar hasta el 80% (Vega *et al.*, 2011). La diabetes mellitus (DM) comprende un grupo de síndromes con etiopatogenia multifactorial (OMS, 2016), caracterizados por hiperglucemia crónica y alteraciones en el metabolismo lipídico y pro-

teico. Estas alteraciones se deben a un déficit relativo o absoluto de insulina, y en la diabetes tipo 2, a disfunciones en su mecanismo de acción (Salazar-Vilchez *et al.*, 2021). La dislipidemia diabética se manifiesta por niveles elevados de TG en ayunas y posprandiales, colesterol HDL bajo, colesterol LDL elevado y predominio de lipoproteínas VLDL (Wu, 2014). La deficiencia de insulina provoca un aumento en la hidrólisis de triacilglicéridos (TG) en el tejido adiposo, lo que libera ácidos grasos a la circulación y promueve la síntesis y exportación de triglicéridos en el hígado (Goldberg, 2006).

El uso de plantas medicinales se ha documentado en diversas culturas antiguas y contemporáneas. Las evidencias de su utilización incluyen los textos de Babilonia, los papiros de Egipto y grabados americanos (Monge, 2003). La literatura reporta que varias especies de plantas se emplean como coadyuvantes en el tratamiento de la diabetes mellitus y en la mitigación de sus síntomas, incluyendo alteraciones en las concentraciones de triacilglicéridos séricos y hepáticos. Por lo que, se han desarrollado diversos estudios para probar el efecto de plantas medicinales con base en datos empíricos (Santos *et al.*, 2012). Dentro de estas se encuentra la familia Cactaceae destacando el género *Stenocereus* por su uso en la medicina tradicional, para el tratamiento de diferentes padecimientos, entre ellos la DM (Cervantes Arista *et al.*, 2020).

La familia Cactaceae incluye un grupo diverso de plantas suculentas originarias de América, que se han difundido globalmente, principalmente con fines ornamentales (Fontenele *et al.*, 2021). Esta familia, perteneciente al orden Caryophyllales, consta de 125 géneros y aproximadamente 1900 especies. En México se encuentra la mayor diversidad de cactáceas, ya que cuenta con alrededor del 60% de su superficie con zonas secas, áridas y semiáridas (Salazar *et al.*, 2020). Entre las cactáceas más destacadas en México se encuentran los cactus columnares (*Stenocereus* sp.), los cactus candeliformes (*Browningia* sp.) y algunas especies trepadoras (*Heliocereus* sp.) (Jiménez-Sierra, 2011).

Las plantas de *Stenocereus queretaroensis* producen como frutos a las pitayas y reciben este nombre la mayor parte de los frutos de los géneros agrupados dentro de la subtribu *Stenocereinae*, principalmente las especies del género *Stenocereus* (Rebollar *et al.*, 2002). En este estudio se aisló y caracterizó el componente mayoritario Ergosta-5,24(28)-dien-3 β -ol de un extracto hexánico y se evaluó el efecto hipolipídico del extracto hexánico de *S. queretaroensis* en un modelo de ratas diabéticas.

Materiales y métodos

Preparación del extracto hexánico de flores de *Stenocereus queretaroensis*

Las muestras de *S. queretaroensis* fueron recolectadas en la unidad de producción “El Minguelito” en Amacueca, Jalisco. Se maceró un lote de 2.5 kg de flores secas a temperatura ambiente durante tres días, empleando como disolvente mezclas de hexanos. Transcurrido este tiempo se filtró y se concentró con un rotavapor a 70 °C, obteniéndose un total de 50 g de una miel pastosa de

color amarillo.

Obtención del compuesto mayoritario

Se sometió un lote de 1 g del extracto hexánico total a cromatografía en columna abierta de 5 cm de diámetro utilizando 25 cm de gel de sílice, el extracto se disolvió en diclorometano, se impregnó con gel de sílice como fase estacionaria y mezclas de hexanos-acetato de etilo como fase móvil, colectándose fracciones de 10 mL. Con una polaridad de 9:1 (hexanos-acetato de etilo) se obtuvieron las fracciones 33-35, en las cuales se encontraron cristales incoloros con un punto de fusión (p.f.) de 131 °C. Los espectros de resonancia magnética nuclear (RMN) de ¹H a 400 MHz y 100 MHz para ¹³C, se determinaron en un aparato Varian Mercury Plus 400, utilizando TMS como referencia interna. Los espectros fueron procesados en el programa MestReNova.

El compuesto mayoritario se caracterizó por resonancia magnética nuclear de ¹H (400 MHz, CDCl₃): δ 5.35 (d, J = 4.9 Hz, H-6), 4.68 (s, H-28), 4.66 (s, H-28'), 3.53 (m, H-3), 1.02 (d, J = 6.8 Hz, CH₃-26), 1.03 (d, J = 6.8 Hz, CH₃-27), 1.00 (s, CH₃-19), 0.95 (d, J = 6.6 Hz, CH₃-21), 0.68 (s, CH₃-18). RMN de ¹³C (100 MHz, CDCl₃): δ 156.86 (C-24), 140.72 (C-5), 121.68 (C-6), 105.90 (C-28), 71.78 (C-3), 55.92 (C-14), 53.69 (C-9), 50.03 (C-17), 41.98 (C-13), 40.11 (C-16), 38.59 (C-4), 37.15 (C-22), 35.77 (C-10), 35.74 (C-8), 32.17 (C-7), 31.87 (C-1), 31.62 (C-20), 29.76 (C-2), 24.17 (C-15), 22.33 (C-23), 21.87 (C-26), 22.00 (C-27), 21.90 (C-25), 21.90 (C-12), 20.99 (C-11), 19.40 (C-19), 18.71 (C-21), 11.86 (C-18) correspondiente al Ergosta-5,24(28)-dien-3 β -ol (Suttiarporn *et al.*, 2015).

Animales de experimentación

Se utilizaron ratas hembra de la cepa Wistar, seleccionadas al azar con un peso promedio de 200 g ($\pm$ 10 g), provenientes del bioterio del Instituto de Investigaciones Químico Biológicas de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Todos los procedimientos se llevaron a cabo siguiendo los protocolos de cuidado y manejo de animales de experimentación bajo los criterios de la Norma Oficial Mexicana (NOM-062-ZOO-1999). Los animales se mantuvieron en condiciones de temperatura (25 $\pm$ 2 °C) y ciclos de luz/oscuridad (12-12 h), con agua purificada para beber y alimento *ad libitum* con una dieta estándar para roedores Nutricubos (Purina).

Diseño experimental

La inducción de la diabetes se realizó con previo ayuno de 16 horas, mediante una inyección de estreptozotocina

(STZ) vía intraperitoneal (I.P.) a una dosis de 40 mg/kg de peso, disuelta en buffer de citrato (pH 4.5). Se tuvieron 6 grupos de 6 ratas cada uno distribuidas al azar (**Tabla 1**). El grupo control fue administrado únicamente con el vehículo (buffer de citrato). A los 10 días después de la inyección de la STZ, se les midió la glucemia para confirmar la diabetes cuando presentaron niveles de glucemia en ayuna >200 mg/dL. El extracto hexánico se sometió a una evaporación total del disolvente y se disolvió en aceite vegetal, se prepararon a diferentes concentraciones para administrar dosis de 50, 100 y 200 mg/kg de peso, se administró diariamente durante 28 días por vía intraperitoneal.

Determinación de los triacilglicéridos séricos y hepáticos

La concentración de TG séricos se determinó concluidos los 28 días de tratamiento. Las muestras sanguíneas fueron colocadas en tubos cónicos de 1.5 mL durante 20 min, posteriormente se centrifugaron a 7,500 revoluciones por minuto (rpm) durante 10 min para obtener el suero y realizar la cuantificación de TG séricos de acuerdo con el *kit* para la cuantificación colorimétrica de TG, la cual se basa en que los TG incubados con lipoproteína lipasa liberan glicerol, que se fosforila a glicerol-3-fosfato y luego se convierte a dihidroxiacetona fosfato y H_2O_2 que reacciona con 4-aminofenazona (4-AF) y *p*-clorofenol dando un color rojo proporcional a la concentración de TG presente en la muestra (Spinreact, España). Los TG hepáticos se determinaron mediante el protocolo reportado por (Aguilera-Méndez y Fernández-Mejía, 2012) realizando algunas modificaciones. Brevemente, se pesaron 50 mg de tejido y se le añadió cbp 1 mL de solución PBS (Buffer fosfato salino, pH 7.4) con tritón-X100 al 5%, se colocaron en baño ultrasónico a 60 °C durante 5 min y se enfriaron a temperatura ambiente. Finalmente, las muestras se centrifugaron a 14,000 rpm durante 15 min y se tomó el sobrenadante para determinar la concentración de TG de acuerdo con el kit

para la cuantificación colorimétrica de TG (Spinreact, España).

Análisis estadístico

Los datos se analizaron con el programa GraphPad Prism®5.0. Los resultados se expresaron como la media $\pm$ el error estándar de 6 ratas. Para determinar diferencias estadísticamente significativas ($P < 0.05$) se realizaron análisis de varianza de una vía, seguida de la prueba Post-hoc de Tukey de rango múltiple.

Resultados

Análisis del extracto hexánico por RMN de 1H

Las plantas de *Stenocereus queretaroensis* producen ramificaciones en forma de columna, con flores de color blanco al inicio de la floración (**Figura 1**).

El extracto hexánico total de la flor de *Stenocereus queretaroensis* se analizó por resonancia magnética nuclear de hidrógeno (**Figura 2**). Se observaron señales de protones vinílicos de 5.40 a 4.60 ppm, en 3.53 ppm se observó una señal base de heteroátomos,



Figura 1. Plantas de *S. queretaroensis* en etapa de floración (Foto Ernestina Gutiérrez).

Tabla 1. Grupos y tratamientos.

Grupos	Tratamientos	n	Dosis (mg/kg)
Control	Vehículo	6	n/a
Diabético	Vehículo	6	n/a
Normoglucémico	Extracto hexánico <i>S. queretaroensis</i>	6	200
Diabético	Extracto hexánico <i>S. queretaroensis</i>	6	50
Diabético	Extracto hexánico <i>S. queretaroensis</i>	6	100
Diabético	Extracto hexánico <i>S. queretaroensis</i>	6	200

n= número de sujetos de experimentación usados.

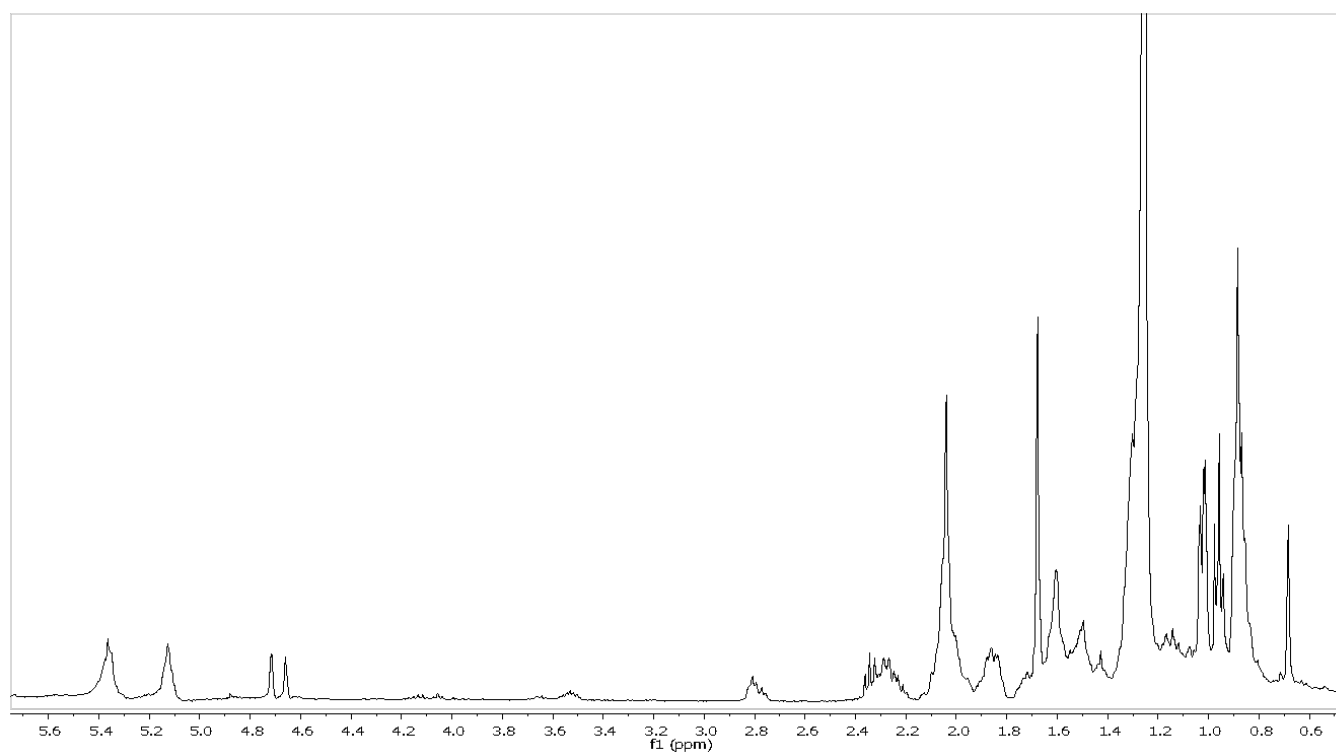


Figura 2. Espectro de RMN de ^1H a 400 MHz del extracto hexánico de *S. queretaroensis*.

en la región de 1.1 a 0.6 ppm se observaron señales de metilos correspondientes a un compuesto de estructura triterpénica.

Purificación del extracto hexánico por cromatografías e identificación por RMN de ^1H y de ^{13}C

La purificación se realizó mediante cromatografías sucesivas. De las fracciones eluidas de hexanos: acetato de etilo (9:1) se obtuvo un sólido blanco con p.f. de 131 °C. En el espectro de RMN de ^1H (**Figura 3**) se observó una señal doble en 5.35 ppm con una $J = 4.9$ Hz correspondiente al hidrógeno 6, en 4.68 ppm y 4.66 ppm se observaron dos señales simples correspondiente a los hidrógenos vinílicos 28 y 28' y en 3.53 ppm se observó una señal múltiple correspondiente al hidrógeno 3 base de alcohol. En la región de los metilos se observó una señal doble en 1.02 ppm con una $J = 6.8$ Hz correspondiente al metilo 26 y en 1.03 ppm se encontró otra señal doble con una $J = 6.8$ Hz correspondiente al metilo 27; en 1.00 ppm se observó una señal simple correspondiente al metilo 19. En 0.95 ppm se observó una señal doble con una $J = 6.6$ Hz correspondiente al metilo 21. Por último, en 0.68 ppm se observó una señal simple correspondiente al metilo 18.

En el espectro de RMN de ^{13}C (**Figura 4**), se

observaron los carbonos cuaternarios del doble enlace en 156.86 ppm (C-24) y 140.72 ppm (C-5), las señales de los carbonos del doble enlace, los (C-6) y (C-28) se observaron en 121.68 ppm y 105.90 ppm, respectivamente. En 71.78 ppm se observó la señal del (C-3) base de alcohol y el resto de las señales se encuentra entre 60 a 10 ppm, se observaron un total de 27 señales lo que indicó que hay una sobre posición de señales en 31.87 ppm. Estos datos fueron comparados con la literatura (Suttiarporn *et al.*, 2015, Ahmad *et al.*, 1995 y Giner *et al.*, 2002) presentando una concordancia con el Ergosta 5,24(28)-dien-3 β -ol o 24-metilencolesterol.

Cuantificación de triacilglicéridos séricos y hepáticos

Se observó una disminución de los TG séricos en los grupos diabéticos tratados con las diferentes dosis (50, 100 y 200 mg/kg) del extracto hexánico, en comparación con el grupo diabético. La dosis de 200 mg/kg presentó el efecto hipolipemiente más pronunciado (**Figura 5**).

Con respecto a los TG hepáticos, se observó un comportamiento similar al de los TG séricos, siendo la dosis de 200 mg la de mayor efecto. Sin embargo, en la dosis de 200 mg en el grupo normoglucémico se observa un ligero aumento en el contenido de TG hepáticos con respecto al control no diabético (**Figura 6**).

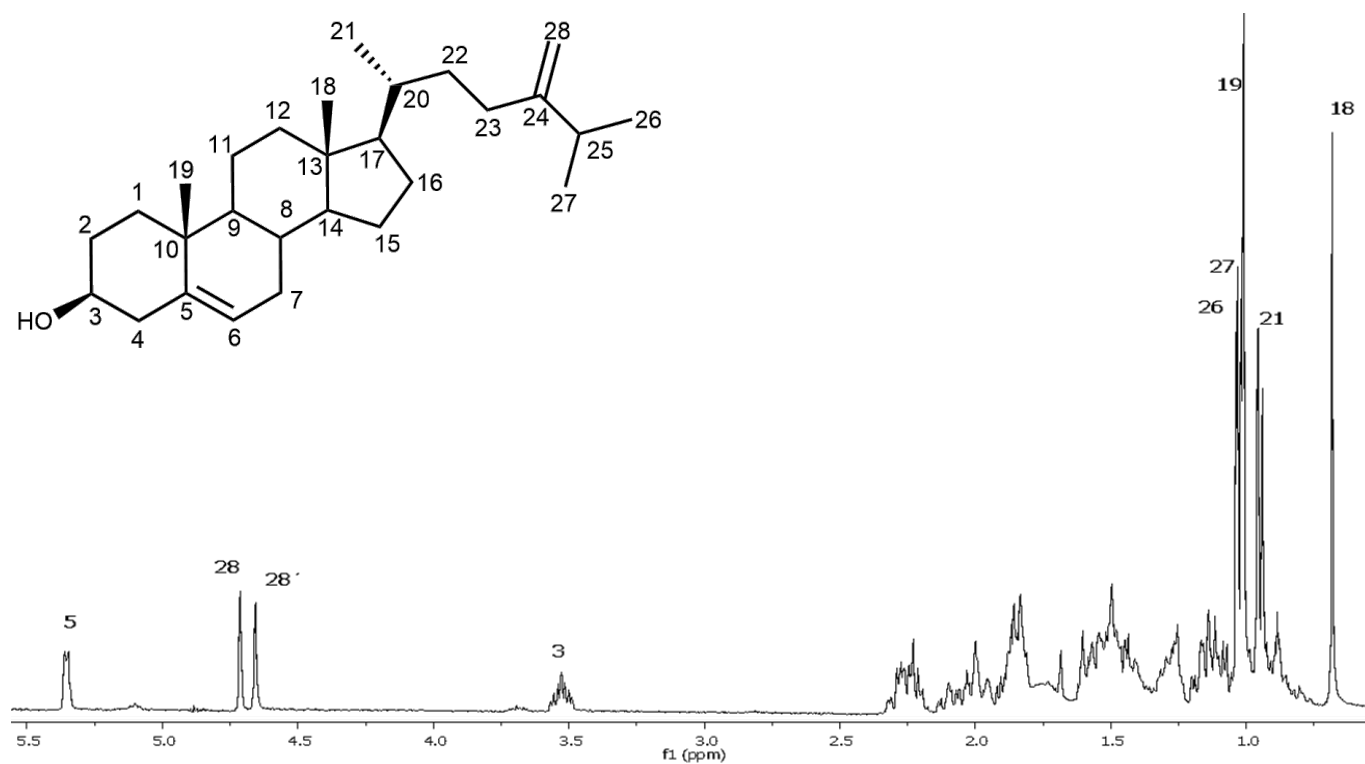


Figura 3. Espectro de RMN de ^1H a 400 MHz del Ergosta-5,24(28)-dien-3 β -ol.

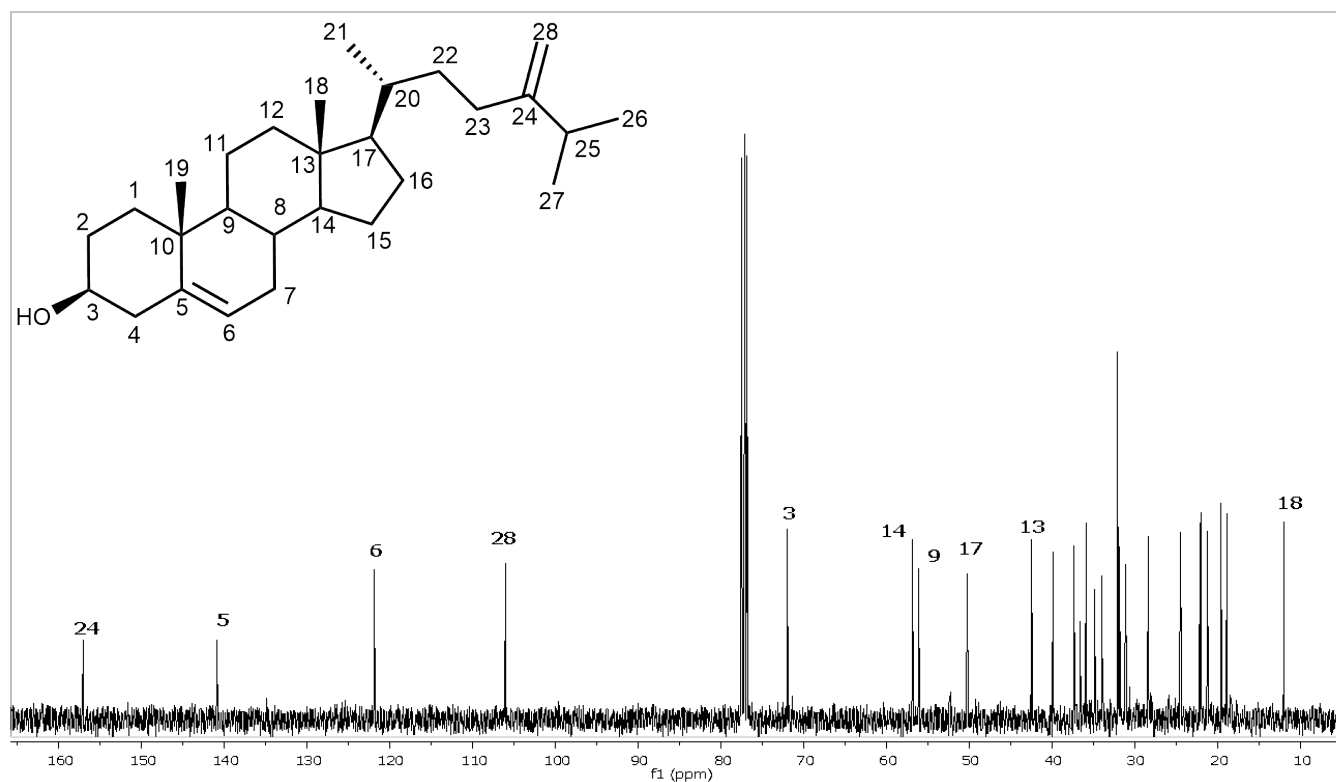


Figura 4. Espectro de RMN de ^{13}C a 100 MHz del Ergosta-5,24(28)-dien-3 β -ol.

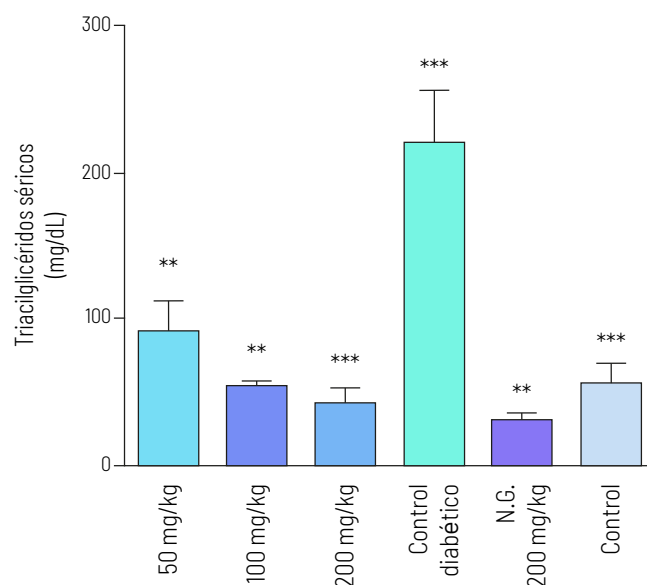


Figura 5. Concentración de TG séricos en ratas tratadas durante 28 días con el extracto hexánico de flores de *S. queretaroensis*. *** $P \leq 0.005$ vs grupo control, grupo diabético y grupo diabético + dosis de 200 mg/Kg, ** $P \leq 0.005$ vs grupo diabético + dosis de 50 mg/Kg, grupo diabético + dosis de 100 mg/Kg y grupo normoglucémico (NG) (200 mg/Kg). ANOVA seguida de una prueba Tukey.

Discusión

Los datos de la Federación Internacional de la Diabetes (FID) indican que el 10.5% de la población adulta entre 20 y 79 años padece diabetes. Se proyecta que para 2045, alrededor de 783 millones de personas vivirán con esta enfermedad, lo que supone un aumento del 46%. Los países más afectados son China, India, Estados Unidos, Brasil, Rusia y México (FID, 2021). La patología diabética está asociada con niveles altos de TG en sangre e hígado y con enfermedades cardiovasculares (Garg y Grundy, 1990; Bierman, 1992; Cuevas, 2016). Varios pacientes con DM utilizan alternativas terapéuticas como el uso de plantas medicinales como una terapia coadyuvante a la prevención, tratamiento y curación de esta enfermedad (Gallego-Muñoz y Ferreira-Alfaya, 2015; Guimarães *et al.*, 2021).

En el presente estudio se evaluó el efecto del extracto hexánico de flores de *S. queretaroensis* sobre un modelo murino de diabetes y se observó que el extracto presenta un efecto hipotrigliceridémico sérico y hepático. Este estudio demostró la presencia de terpenoides como el Ergosta-5,24(28)-dien-3 β -ol, cuya presencia podría estar relacionada con el efecto hipolipemiante observado en los grupos tratados en la presente investigación.

En estudios biológicos preclínicos en ratas se observó que la pulpa liofilizada del fruto pitaya de *Stenocereus stellatus* disminuyó los niveles de glucosa en sangre.

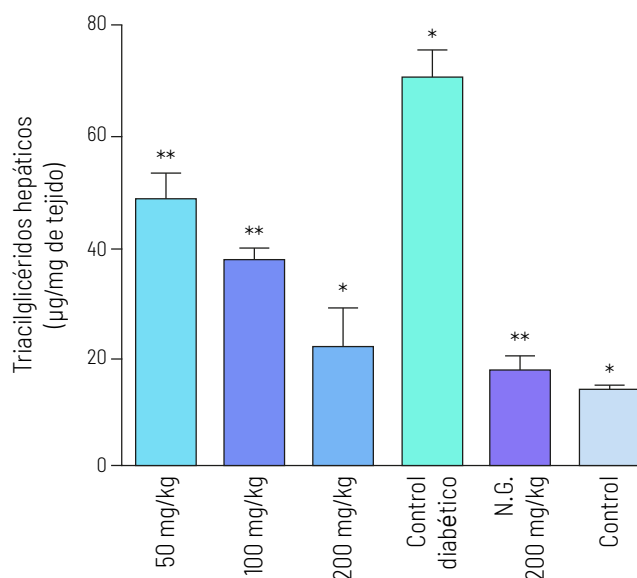


Figura 6. Cuantificación de TG hepáticos en ratas tratadas durante 28 días con el extracto hexánico de flores de *S. queretaroensis*. Los valores representan la media de la concentración TG hepáticos ($n=6$) $\pm$ el error estándar. ** $P \leq 0.005$ vs grupo diabético + dosis de 100 mg/Kg, grupo normoglucémico (NG) (200 mg/Kg) * $P \leq 0.005$ vs grupo control, grupo control diabético, grupo diabético + dosis de 200 mg/Kg. ANOVA seguida de una prueba Tukey.

También observaron que las variantes del fruto rojo debido al contenido de flavonoides y betalaínas poseen actividad antioxidante y los convierten en un buen punto de partida para el análisis de compuestos capaces de regular los niveles de glucosa en sangre y de manera similar las alteraciones a los metabolismos lipídico y proteico (Cervantes-Arista *et al.*, 2020; Díaz de León-Sánchez *et al.*, 2020).

El género *Stenocereus* ha sido poco estudiado farmacológicamente, aunque se conoce su uso en la medicina tradicional. Las frutas son una fuente importante de metabolitos bioactivos con propiedades medicinales como: polifenoles, fitoesteroles, betalaínas, vitaminas y minerales, entre otros (García-Cruz *et al.*, 2017; Rodríguez-Sánchez *et al.*, 2017). Los fitoesteroles se han estudiado desde hace décadas por su efecto hipocolesterolémico. Aunque los micoesteroles presentes en los hongos comestibles aún no están ampliamente explorados, el ergosterol y otros derivados fúngicos han demostrado tener efectos beneficiosos para la salud y muestran potencial en el tratamiento de enfermedades cardiovasculares asociadas con la obesidad debido a sus propiedades hipotrigliceridémicas e hipocolesterolémicas (Das y Kumar, 2021).

El efecto hipolipemiante de los fitoesteroles se ha investigado desde hace décadas. Los extractos fúngicos enriquecidos con ergosterol son fuentes potenciales de

moléculas bioactivas que dificultan la absorción del colesterol e inhibe su biosíntesis. Varios de estos metabolitos aumentan la oxidación y disminuyen la síntesis de ácidos grasos, colesterol y triacilglicéridos. Esto ocurre por la modulación de factores transcripcionales clave en la oxidación de ácidos grasos, como el PPAR- α , en la síntesis de ácidos grasos, como el factor SREBP-1c y en la síntesis de colesterol, como el factor SREBP-2 (Das y Kumar, 2021). Es importante mencionar que la dosis de 200 mg/kg causó un aumento ligero en la concentración de TG hepáticos con respecto al control normoglucémico, que está dentro de los rangos normales reportado para los TG hepáticos por nosotros y otros autores (Aguilera *et al.*, 2018; Maithilikarpagaselvi *et al.*, 2016), por lo que no representaría una acumulación patológica.

En conclusión, el extracto hexánico de flores de *Stenocereus queretaroensis* mostró un efecto hipotrigliceridémico en suero e hígado en ratas diabéticas. El extracto aislado se caracterizó por RMN (^1H y ^{13}C) y se identificó al compuesto Ergosta-5,24(28)-dien-3 β -ol como el componente mayoritario.

Agradecimientos

Los autores agradecen a la Coordinación de la Investigación Científica (CIC) de la UMSNH y al Instituto de Ciencia, Tecnología e Innovación (ICTI) del Estado de Michoacán, por el apoyo financiero otorgado para la realización de este trabajo, con números CIC-UMICH 16880 y FCCHT123_ME-4.1, respectivamente.

Referencias

- Aguilera-Méndez A, Fernández-Mejía C (2012). The hypotriglyceridemic effect of biotin supplementation involves increased levels of cGMP and AMPK activation. *BioFactors* 38(5):387–394. doi:10.1002/biof.1034.
- Aguilera-Mendez A, Hernández-Equihua MG, Rueda-Rocha AC, Guajardo-López C, Nieto-Aguilar R, Serrato-Ochoa D, Ruíz Herrera LF, Guzmán-Nateras JA (2018). Protective effect of supplementation with biotin against high-fructose-induced metabolic syndrome in rats. *Nutrition Research* 57:86–96. doi:10.1016/j.nutres.2018.06.007
- Bierman EL (1992). George Lyman Duff Memorial Lecture. Atherogenesis in diabetes. *Arteriosclerosis and thrombosis. Arteriosclerosis, Thrombosis and Vascular Biology* 12(6):647–656. doi:10.1161/01.atv.12.6.647.
- Cervantes-Arista C, Roman-Guerrero A, Oidor-Chan VH, Díaz de León-Sánchez F, Álvarez-Ramírez EL, Pelayo-Zaldívar C, Sierra-Palacios EC, Mendoza Espinoza JA (2020). Chemical characterization, antioxidant capacity, and anti hyperglycemic effect of *Stenocereus stellatus* fruits from the arid Mixteca Baja region of Mexico. *Food Chemistry* 328:127076. doi:10.1016/j.foodchem.2020.127076.
- Díaz de León-Sánchez F, Hernández-Trigueros PD, Rodríguez-Verástegui LL, Oidor Chang, VH, Cervantes-Arista C, Aarland RC, Sierra-Palacios E, Mendoza Espinoza JA (2020). Chemical composition of juice and antihyperglycemic studies in seed of the prehispanic fruit tunillo (*Stenocereus stellatus*) collected in Oaxaca, Mexico. *Indian Journal of Traditional Knowledge* 19(3):580–584. doi:10.56042/ijtk.v19i3.41476.
- Das M, Kumar GS (2021). Potential role of mycosterols in hyperlipidemia—a review. *Steroids* 166:108775. doi:10.1016/j.steroids.2020.108775.
- Federación Internacional de Diabetes (2021). *Atlas de la Diabetes de la FID*, 10^{ma} edición. Bruselas, Bélgica: Federación Internacional de Diabetes. <https://idf.org/es/about-diabetes/diabetes-facts-figures/>.
- Fontenele RS, Salywon AM, Majure LC *et al.* (2021). New world Cactaceae plants Harbor diverse Geminiviruses. *Viruses* 13(4):694. doi:10.3390/v13040694.
- Garg A, Grundy SM (1990). Management of dyslipidemia in NIDDM. *Diabetes Care* 13(2):153–169. doi:10.2337/diacare.13.2.153.
- García-Cruz L, Dueñas M, Santos-Buelgas C, Valle-Guadarrama S, Salinas-Moreno Y (2017). Betalains and phenolic compounds profiling and antioxidant capacity of pitaya (*Stenocereus* spp.) fruit from two species (*S. pruinosus* and *S. stellatus*). *Food Chemistry* 234:111–118. doi:10.1016/j.foodchem.2017.04.174.
- Goldberg IJ, Ginsberg HN (2006). Ins and outs modulating hepatic triglyceride and development of nonalcoholic fatty liver disease. *Gastroenterology* 130(4):1343–1346. doi:10.1053/j.gastro.2006.02.040.
- Gallego-Muñoz C, Ferreira-Alfaya FJ (2015). Plantas medicinales en el tratamiento de la diabetes mellitus tipo 2: una revisión. *Farmacéuticos Comunitarios* 7(4):27–34. doi:10.5672/FC.2173-9218.
- Guimarães BM, Ramos KA, de Souza MC, Franco ML, de Souza Alves CC, de Paula Carli, A, Coqueiro JM (2021). Práticas terapêuticas com plantas medicinais para o tratamento do *Diabetes Mellitus*. *Research, Society and Development* 10(10):1–11. doi:10.33448/rsd-v10i10.18874.
- Jiménez-Sierra CL (2011). Las cactáceas mexicanas y los riesgos que enfrentan. *Revista Digital Universitaria UNAM* 12(1):1–23. doi:10.22201/codeic.16076079e.
- Monge A (2003). El descubrimiento de fármacos a partir de plantas medicinales. *Ciencia e Investigación* 6(1):36–39. doi:10.15381/ci.v6i1.3316.
- Maithilikarpagaselvi N, Sridhar MG, Swaminathan RP, Sripradha R, Badhe B (2016). Curcumin inhibits hyperlipidemia and hepatic fat accumulation in high-fructose-fed male Wistar rats. *Pharmaceutical Biology* 54(12):2857–2863. doi:10.1080/13880209.2016.1187179.

- Moreira Cevallos WJ, López Bailón AN, Moreira Loo CS, Castro Jalca JE (2022). Prevalencia y factores de riesgo de dislipidemias: un estudio de la situación actual. *Revista Científica Biomédica Higía De La Salud* 6(1). doi:10.37117/higia.v6i1.649.
- Norma Oficial Mexicana. NOM-062-ZOO. (1999). Especificaciones técnicas para la producción, cuidado y uso de los animales de laboratorio. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/203498/NOM-062-ZOO_1999_220801.pdf.
- Organización Mundial de la Salud (OMS) (2016) Informe mundial sobre la diabetes. https://iris.who.int/bitstream/handle/10665/254649/9789243565255_spa.pdf;jsessionid=2E11B18CB-CE287AC4812F3D1B3470A71?sequence=1.
- Rebollar A, Romero J, Cruz P, Zepeda H (2002). El cultivo de la pitaya (*Stenocereus* spp.) una alternativa para el trópico seco del estado de Michoacán. México: Universidad Autónoma de Chapingo. 2a edición. https://books.google.com.mx/books/about/Cultivo_de_la_pitaya_Stenocereus_sp.html?id=XePlkQEACAAJ&redir_esc=y.
- Rodríguez-Sánchez JA, Cruz y Victoria MT, Barragán-Huerta BE (2017). Betaxanthins and antioxidant capacity in *Stenocereus pruinosus*: Stability and use in food. *Food Research International* 91:63–71. doi:10.1016/j.foodres.2016.11.023.
- Salazar JR, Loza-Mejía MA, Soto-Cabrera D (2020). Chemistry, biological activities and in silico bioprospection of sterols and triterpenes from Mexican columnar Cactaceae. *Molecules* 25(7):1649. doi:10.3390/molecules25071649.
- Salazar-Vilchez J, Carbonell Y, Briceño S, Borges I, Añez R (2021). Características clínicas de pacientes diabéticos tipo 2 con hipoglucemia grave de un hospital venezolano. *Medicina Interna de México* 37(4):506–519. doi:10.24245/mim.v37i4.4089.
- Santos MM, Nunes MGS, Martins RD (2012) Uso empírico de plantas medicinais para tratamento de diabetes. *Revista Brasileira de Plantas Medicinais* 14(2):327–334. doi:10.1590/S1516-05722012000200012.
- Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (2001). Diario Oficial de la Federación 11/07/2001. <https://www.gob.mx/agricultura/>.
- Suttiarporn P, Chumpolsri W, Mahatheeranont S, Luangkamin S, Teepsawang S, Leardkamolkarn V (2015). Structures of phytosterols and triterpenoids with potential anti-cancer activity in bran of black non-glutinous rice. *Nutrients* 7(3):1672–1687. doi:10.3390/nu7031672.
- Wu L, Parhofer KG (2014). Diabetic dyslipidemia. *Metabolism* 63(12):1469–1479. doi:10.1016/j.metabol.2014.08.010.



Carmine red from cochineal (*Dactylopius coccus*), a natural dye: a review

Gabriela Monserrat Ochoa Manzo¹, Héctor Eduardo Martínez Flores^{2*} , José Octavio Rodiles López², Liberato Portillo³

¹ Programa Institucional de Doctorado en Ciencias de la Salud y Farmacéuticas. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.

² Facultad de Químico Farmacobiología. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.

³ Centro Universitario de Ciencias Biológicas y Agropecuarias, Universidad de Guadalajara.

Historial

Manuscrito recibido: 1 de septiembre de 2024

Manuscrito aceptado: 18 de octubre de 2024

Manuscrito publicado: abril de 2025

*Autor para correspondencia

Héctor Eduardo Martínez-Flores

hector.martinez.flores@umich.mx

Orcid:0000-0002-0044-9399

Abstract

The present review focuses on the natural carmine red dye extracted from insect *Dactylopius coccus*. It describes the insect, its infestation and development in the cactus plant, the insect collection, the dye extraction process, and the derived products that contain carminic acid as a natural red dye. Information about newly developed technologies such as microwave and ultrasound extraction are summarized, which may be useful for the recovery of bioactive compounds from cochineal grana. These new methods offer significant advantages in terms of efficiency and sustainability, as they have proven to be more environmentally friendly while increasing the extraction yield of carmine, promising a healthier and more sustainable future for the natural color industry.

Keywords: *Dactylopiidae*, carminic acid, natural pigment, extraction processes, emerging technologies

Introduction

In the food industry, the use of additives is essential to ensure the quality, safety, and shelf life of products (Erkan, 2010; Albuquerque *et al.*, 2021). Based on the Codex Alimentarius and the official Mexican regulations, through the Federal Commission for the Protection against Sanitary Risks (COFEPRIS), the definition of an additive is: “A substance that is neither normally consumed as a food itself, nor used as an ingredient. It is added to products for technological purposes at the manufacturing, transformation, preparation, treatment and packaging stages”. Additives can be classified according to their function as preservatives, texturizers, flavorings, colorants, acidulants, antioxidants, sweeteners, among others (Carocho *et al.*, 2014; Vega, 2021).

Colorants are responsible for adding color to foods to improve their appearance, as this plays a crucial role in the choice and acceptance of a product, as the consumer's first impression is based on visual perception (Herrera *et al.*, 2023). Colors are divided into synthetic (produced by chemical synthesis) and natural (derived from vegetables, insects, minerals, and microorganisms). The

colorants market is growing at an annual rate of 4.6% and its reach in the global market is estimated at \$2.3 billion US dollars per year (Rushikesh and Girirajsinh, 2022). Mordor Intelligence analyzed the global natural colors market and determined its value to be \$1.6 billion US dollar in 2020, with Compound Annual Growth Rate (CAGR) of 8.5% during the forecast period from 2021 to 2026, mainly due to the better acceptance of healthy foods that do not contain synthetic additives, as well as their functional properties, thus this trend has prompted manufacturers to replace artificial colors with natural ones (Landim *et al.*, 2021). The use of artificial colors generates too much controversy and concern regarding safety, health, and toxicity issues (Gebhardt *et al.*, 2020).

Carmine is a natural dye widely used in the food industry composed mainly of carminic acid, which is obtained by aqueous extraction of the female cochineal (*Dactylopius coccus*), an insect that lives on the cladodes of cactus plants it parasitizes by feeding on their sap (Pérez and Becerra, 2001). The objective of this review is to deepen the knowledge of “cochineal carmine”, including its origin, characteristics, extraction methods,

applications, and its future in food technology in the context of the growing trend towards the use of natural colors in food.

Cochineal and carmine red

The cochineal is an insect (**Figure 1**) belonging to the family *Dactylopiidae* and the genus *Dactylopius*, of which about ten species have been identified; these are of great economic importance due to their carminic acid content, which is used to produce a red dye. They are also important as biological control agents; however, some can be invasive and pose a threat to commercial cactus crops (Chavez-Moreno *et al.*, 2009; Van Dam and May, 2012).

The most notable *Dactylopius* species are the fine cochineal (*D. coccus*) and the wild cochineal (*D. opuntiae*) (**Figure 2**). The latter grows like a pest in cactus orchards and its body is covered with a white wax that resembles “milkweed” (algodoncillo) and contains a low concentration of carminic acid. On the other hand, the fine cochineal is covered with a wax that resembles a “white powder” and contains a higher concentration of carminic acid (Domínguez, 2012).

Fine cochineal grana (*Dactylopius coccus*)

The cochineal is native to tropical and subtropical regions of the Americas (Müller-Maatsch and Gras; 2016), particularly Mexico (Van Dam and May, 2012). The females of this insect synthesize an anthraquinone

glycoside called carminic acid as a defense mechanism (Zacarias-Alvarado *et al.*, 2020). From this compound, several dye-like products are obtained, which begins with harvesting and marketing the females of the dried insect (Arroyo and Medina, 2021). The post-harvest activities include detaching the insect from the stem, cleaning, sieving to remove wax, sacrificing, drying, and selecting the insect, all of which affect the percentage of carminic acid and therefore the quality of the cochineal (Inglese *et al.*, 2018).

The quality of the grana is classified into three groups based on its carminic acid content: low, between 18 and 19.97%; medium, between 20 and 20.75%; and high, when the carminic acid content is greater than 21% (Herrera and Llanderal-Cázares, 2011). These quality standards have been established by ITINTEC (Institute of Technological Research, Industries, and Technical Standards) of Peru. The following products can be obtained and marketed from grana cochineal: broodstock (live cochineal), dried cochineal, cochineal



Figure 1. Dehydrated cochineal grana insects (*Dactylopius coccus*) that have undergone a sacrificial process followed by dehydration. The average size is typically between 2 and 6 mm in length, depending on the growth stage and the dehydration process applied to the insects.



Figure 2. *Dactylopius opuntiae* growing on a cactus pad hanging in a nopaloteca used for the reproduction of cochineal. The white powder visible on the cactus pad is wax, a coating produced by the cochineal to protect itself and adhere to the cactus as it feeds. At this stage, the cochineal insects are alive.

powder, aqueous or alcoholic cochineal extract, carmine, and carminic acid in its pure form (**Figure 3**). Internationally, the price of the grain and its products is constantly fluctuating, as its value is directly related to the amount of carminic acid it contains (Flores-Alatorre *et al.*, 2014). Peru is the largest producer of dried cochineal grain, accounting for 85% of world production, followed by Mexico and the Canary Islands. To obtain the dye, insects are sacrificed and dehydrated, and more than 150,000 insects are needed to produce 1 kg of dried cochineal (Attokaran, 2017).

Carminic acid

Carminic acid is one of the oldest known natural dyes (Szadkowski *et al.*, 2022), and chemically, it is a β -C-glucopyranose derived from an anthraquinone and consists of an anthraquinone nucleus attached to a carboxyl group, one methyl group, four hydroxyls, and one hexose (Liu *et al.*, 2021). **Figure 4** shows the chemical structure of carminic acid and **Figure 5** shows the carminic acid powder.

Carminic acid was first synthesized in 1998 by Allevi *et al.* (1998). Its IUPAC name is 7- α -D-glucopyranosyl-9,10-dihydro-3,5,6,8-tetrahydroxy-1-methyl-9,10-dioxoanthracenecarboxylic acid (Alizadeh *et al.*, 2022), with a condensed molecular formula of $C_{22}H_{20}O_{13}$ and a molecular weight of 492.4 Da. Carminic acid is soluble in water, alcohol, alkaline and acidic solutions, has good light stability, and its color depends on pH (Dufossé,

2014). It changes from orange to purple as pH increases from 2 to 12 (Favaro *et al.*, 2002) and is red at pH 6. Therefore, carminic acid, carmine, and cochineal extract are among the most widely used pigments and dyes in the food industry. The consumption of carminic acid is strictly regulated, with a daily intake of 2.5 mg of carminic acid per kg of body weight per day (EFSA, 2015). Therefore, the content of carminic acid in foods should be controlled (Kavieva and Ziyatdinova, 2022). Based on the safety data sheet provided by Sigma-Aldrich, carminic acid does not present significant toxicological concerns. It is not classified as a hazardous substance, and no acute toxicity data, or carcinogenicity has been reported. Mutagenicity tests, such as the Ames test, have shown negative results. Therefore, carminic acid appears to be safe, the acceptable daily intake of 2.5 mg/kg body weight.

Cochineal and carmine extract

Cochineal extract and carmine are naturally derived food colors that have excellent heat, light, and acid stability and offer a wide range of shades from bright pinks and reds to oranges and lavenders. The FDA in its Code of Federal Regulation Title 21 (21CFR73.100) defines cochineal extract as a concentrated solution obtained after removal of alcohol from the aqueous-alcoholic extract of cochineal grana and its specifications are pH between 5.0 and 5.5 at 25 °C. Its chemical composition is protein $\leq 2.2\%$; total solids range from 5.7 to 6.3%; methanol should not exceed 150 ppm; and carminic acid should not be lesser than 1.8% (21CFR73.100; Favaro *et al.*, 2002).

Carmine (**Figure 6**) is a natural red pigment derived from the cochineal insect. It is produced through the aqueous extraction of carminic acid and then combined with aluminum or calcium-aluminum to form a lacquer pigment. Carmine is a coordinate complex with a six-membered chelate ring structure formed when the



Figure 3. Cochineal powder, obtained after the insect is collected from the cladode, is washed, the wax removed and ground to produce the raw dye.

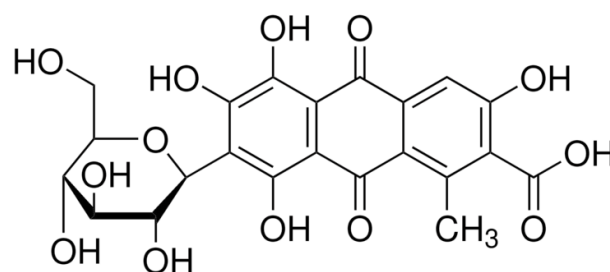


Figure 4. Chemical structure of carminic acid. Carminic acid, a natural anthraquinone compound produced by cochineal insects, owes its red color to alternating single and double bonds.



Figure 5. Carminic acid powder.



Figure 6. Carmine or carmine lacquer.

aluminum atom chelates with two carminic acid molecules through the 5-hydroxyl group and the ortho-carbonyl oxygen (Favaro *et al.*, 2002).

In addition, carmine color or carmine lake is a complex in which aluminum is bound to carminic acid, to which maltodextrin is usually added to ensure a final carminic acid content of 48.3 to 51.9%, according to the specifications established by the FDA and EFSA (European Food Safety Authority), which require that it contain not less than 50% carminic acid in chelates,

not more than 3% in relation to carminic acid for 4-aminocarminic acid and not more than 1% of matter insoluble in dilute ammonia. In the European Union, carmine lakes are regulated, and some are not allowed in certain food applications because 4-aminocarminic acid (4.ACA), a natural ammonium from cochineal protein, is under regulatory concern in Europe owing its allergic effects (Gómez, 2023).

4-aminocarminic acid

The process for the preparation of 4-aminocarminic acid was presented in a United States patent. The protocol consists of heating a mixture of carminic acid, citric acid, ammonia and water, in an oil bath at 115-120 °C for 40 min, followed by evaporation and drying (Schul, 1992). Its molecular formula is $C_{22}H_{21}NO_{12}$ and its molecular weight is 491.10 Da (Sabatino *et al.*, 2012). Its chemical structure is 7-β-D-glucopyranosyl-9,10-dihydro-5-amino-3,6,8-trihydroxy-1-methyl-9,10-dioxoanthracene-2-carboxylic acid (Cooksey, 2019). The use of this dye is regulated due to possible allergic reactions, but despite being banned in the EU, it was found in Italy during a 12-month quality control study conducted by the Italian Ministry of Agriculture, Food, Sovereignty and Forests in 2011 and 2012, so that 50% of beverages and food additives were labeled as E120 (Sabatino *et al.*, 2012; Schweiggert, 2018). There are concerns about the misuse of this colorant and the lack of transparent labeling to inform consumers.

4-carminic acid is a derivative of carminic acid that imparts and retains a deep red color to acidic foods that is not possible with carmine. Its existence was revealed by Kawasaki *et al.* (2002) upon purification and identification of an unknown red pigment in an apple syrup. This dye was developed in response to the need to obtain a brighter red color in acidic foods (pH < 3), but it is not approved for use in foods, although it is intentionally or unintentionally introduced into the marketplace and is called “acid-stable carmine” and is produced by the reaction of carminic acid with ammonia (Dapson, 2005, 2007).

Challenges of using carmine

One of the most used dyes in food technology is the synthetic red FD&C Red #40, but the trend is to use natural dyes such as cochineal carmine. The most used carmine option in the food industry is in the form of aluminum lacquer (carmine), and it is the natural and effective alternative to synthetic dyes (Dufossé, 2014). Despite this, there are three major challenges with

carmine dye: first, it cannot be Kosher or Halal certified because it is derived from an insect, and on the other hand, manufacturers are facing pressure from the vegan market (Watson, 2013). Second, its possible health effects due to the presence of aluminum (Ding *et al.*, 2019). Finally, its consumption can cause allergies due to the presence of proteins or protein residues (Gultekin and Doduc, 2013). Currently, there have been cases of occupational asthma and rhinoconjunctivitis in male butchers who inhaled constant amounts of carmine during work, dermatitis from lipstick application, and anaphylactic reactions in a woman who consumed yogurt and another who drank Campari during dinner (Beaudouin *et al.*, 1995; Baldwin *et al.*, 1997; Acero *et al.*, 1998; Lizaso *et al.*, 2000; Müller-Maatsch and Gras, 2016). A modern preparation of carmine has been proposed by Schmidt-Jacobsen and Frandsen (2011), using pure carminic acid, aluminum and calcium salts, and whey protein to replace the natural allergenic cochineal protein (Ohgiya *et al.*, 2009). In fact, extraction of carminic acid from cochineal has long been considered a difficult and complicated process with low yields (Cooksey, 2019).

Methods of extraction of natural dyes

Natural color extraction is a process involving the use of solvents. Its main objective is to separate the desired pigment found in the matrix; usually found in small amounts along with some components such as fibers, carbohydrates, and proteins, among others. The purpose of the extraction process is to transfer as much of the pigment as possible from the matrix to the solvent. The material containing the pigment must be reduced in particle size and then screened to improve extraction efficiency. Extraction becomes a key step to achieve higher dye efficiency and yield (Adeel *et al.*, 2018; Mansour, 2018; Rehman *et al.*, 2018). Extraction methods are classified into two classes: first, conventional methods such as Soxhlet, boiling, and use of solvents; second, methods with emerging technologies, which include techniques such as microwave, ultrasound, supercritical extraction, pressure liquid extraction, and others. These advanced methods are being studied to replace conventional extraction processes, as they allow more efficient extraction in short times and with higher dye recovery (Sankar, 2015; Da Silva *et al.*, 2020; Bota and Indrie, 2021).

Conventional methods

Conventional methods have been used since ancient times and play a fundamental role in obtaining natural

colorants from various plant and animal sources. These substances can be extracted using organic solvents such as acetone, ether, chloroform, ethanol, methanol, water or aqueous mixtures with non-polar solvents (Rehman *et al.*, 2018; Mansour, 2018).

The extraction method using a mixture of water and alcohol is more efficient than the aqueous method because it can extract both soluble and insoluble substances in water, and especially because aqueous extraction involves soaking the material for a long time, boiling it, and filtering it; similarly, acids or alkalis can be added to alcoholic solvents to release a greater amount of colorant (Mansour, 2018; Rehman *et al.*, 2018). These methods are easy to perform and, in some cases, economical, but the disadvantages are long extraction times, higher energy consumption, and the presence of toxic residual solvents that can be harmful to humans and the environment, since they are flammable, volatile, and explosive; the extraction yields are also low, and the dyes are less resistant to heat and have lower active ingredient content in the extracts (Zannou *et al.*, 2022).

Emerging technologies

The rising demand for high-quality natural products has encouraged the use of technologies that optimize the yield and performance of the active ingredient, reduce the use of solvents, extraction times, and energy consumption and are environmentally friendly.

Among the methods with the most research is the so-called “Supercritical Extraction”, which uses a gas, for example carbon dioxide, under conditions of high temperature and pressure, where the so-called supercritical state is reached and physicochemically there is no difference between a liquid-gas state, and components can be extracted from natural materials (Padma and Nisha, 2021). On the other hand, the so-called “high pressure liquid extraction” also uses high temperature and pressure conditions, but the solvent remains in a liquid state, which improves solvent diffusion and mass transfer due to the decrease in surface tension between the components and thus facilitates the rupture of the cells from the solid matrix (Leonarski *et al.*, 2023).

Microwave extraction is based on the uniform heating of the matrix using electromagnetic radiation with a frequency of 0.3 to 300 GHz, causing the polarized molecules to reorient themselves due to the heat generated and the friction between them, where the water within the plant matrix absorbs the energy microwaves and generates cell disruption, which is promoted by internal superheating and facilitates the exit of the compound

from the matrix (Da Rocha and Noreña, 2020; Geow *et al.*, 2021).

Finally, ultrasonic extraction uses a probe that applies an intensity at a frequency of 20 kHz to a liquid medium to generate small bubbles that increase in size to a critical point that collapse, a phenomenon called cavitation, releasing large amounts of energy; such increase of temperature and pressure of the solvent, causes mass transfer, breaks the matrix, and achieves the extraction of the compound. The main parameters that affect this vibrational effect are the wave frequency and amplitude, the input power, and the ultrasonic distribution of the wave. This makes it an efficient and environmentally friendly method for the extraction of dyes (Geow *et al.*, 2021; Rutkowska *et al.*, 2017).

Conventional and emerging technologies to obtain cochineal and carmine extracts

The most used method to obtain this dye is described as follows: 1) The cochineal powder is subjected to an extraction process with organic solvents; in the past the extraction was carried out with water, and nowadays it is carried out using alcohol or an alkaline medium such as ammonia or sodium carbonate; 2) Solid-liquid separation, which involves flocculation and filtration; here we obtain the aqueous or alcoholic extract of cochineal; 3) For the preparation of carmine, alum (aluminum and potassium sulfate) is added to the soluble extract to precipitate the carminic acid in the form of a red precipitate (aluminum salt); 4) Finally, the precipitate is washed with water, dried, ground and sieved to obtain a fine and uniform powder that can be used as carmine dye (Attokaran, 2017; Borges *et al.*, 2012).

The extraction and purification of carminic acid from raw cochineal is a complex process that must be standardized to obtain the desired product. González *et al.* (2002) achieved efficient extraction of pigments from cochineal using a mixture of methanol and water (65:35), and the results suggest that the number of extractions is statistically the most significant factor. However, these extraction processes have several disadvantages due to their low efficiency, long extraction times, the use of toxic solvents, and the presence of allergenic proteins derived from the insect and possibly complexed with carminic acid, generating a negative impact on the health of the consumer. This has motivated the study of new extraction methods using emerging technologies to reduce the content of allergenic proteins, improve the stability of carminic acid and increase efficiency (Attokaran, 2017; Borges *et al.*, 2012).

Emerging technologies are a novel approach to address the challenges posed by industrial competitiveness to be more innovative, economical, and ecological (Chemat *et al.*, 2019). These include more efficient use of energy, greater mass and heat transfer, use of environmentally friendly solvents, and guarantees a safe and high-quality product (Pinela *et al.*, 2019). The main advantage of these technologies is the optimization of extraction through cell wall disruption (Manzoor *et al.*, 2021).

Borges *et al.* (2012) extracted carminic acid from cochineal using supercritical fluid extraction and pressurized liquid extraction, and then compared the results obtained with the conventional method. They found that both techniques directly produced a red precipitate of carminic acid, which is advantageous in industry due to its greater solid-state stability. The yields of carminic acid were significantly higher, 42.4% for pressurized solvent extraction and 39.4% for supercritical fluid extraction, compared to 18.5% for conventional solid-liquid extraction. The best results were obtained using methanol/water and ethanol/water solvents at 100 and 150 °C, respectively. These extraction methods provide an efficient alternative to obtain carminic acid with higher yields and stability in the solid state, which may be of interest in the food and dye industries (Adeel *et al.*, 2018).

The importance of studying new technologies to optimize the extraction of natural colorants is aimed at minimizing energy consumption, extraction times, and preserving the application of color in foods, thus achieving the optimization of process conditions. However, these methods face challenges such as the generation of free radicals due to high temperatures and pressures, degradation of pigments, and undesirable effects on organoleptic and nutritional aspects (Kutlu *et al.*, 2022).

Conclusions

Grana Cochineal is an insect that feeds on the cactus plant and produces a dye called carmine red, which is used in various industries, mainly in cosmetics and food. The demand for dyes derived from natural sources, especially of animal origin, such as cochineal, has been growing significantly, mainly due to the toxicity associated with artificial dyes. Although cochineal is a natural dye, traditional extraction methods involve the use of toxic solvents and can pose challenges in terms of both efficiency and food safety. This has led to the study of new extraction methods, emerging technologies such as supercritical fluid extraction, high pressure

liquid extraction, ultrasound, and microwaves, which offer significant advantages in terms of efficiency and sustainability, as they have proven to be more environmentally friendly while increasing the extraction yield of carmine, promising a healthier and more sustainable future for the natural color industry.

References

- 21CFR73.100 United States Code for Federal Regulations, Title 21 Part 73.100: Cochineal Extract; Carmine. <http://www.accessdata.fda.gov/scripts/cdrh/cfdocs/cfCFR/CFRSearch.cfm?fr=73.100>.
- Acero S, Tabar AI, Alvarez MJ, Garcia BE, Olaguibel JM, Moneo I (1998). Occupational asthma and food allergy due to carmine. *Allergy* 53(9):897-901. doi:10.1111/j.1398-9995.1998.tb03998.x.
- Adeel S, Rafi S, Mustaan MA, Salman M, Ghaffar A (2018). Animal Based Natural Dyes: A Short Review. In: *Handbook of Renewable Materials for Coloration and Finishing*. pp 41-74. doi:10.1002/9781119407850.ch4.
- Albuquerque BR, Oliveira M, Barros L, Ferreira I (2021). Could fruits be a reliable source of food colorants? Pros and cons of these natural additives. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition* 61(5):805-835, doi:10.1080/10408398.2020.1746904.
- Alizadeh M, Demir E, Aydogdu N, Zare N, Karimi F, Kandomal SM, Rokni H, Ghasemi Y (2022). Recent advances in electrochemical monitoring for the analysis of amaranth and carminic acid as food colorants. *Food and Chemical Toxicology* 163:112929. doi:10.1016/j.fct.2022.112929.
- Allevi P, Anastasia M, Bingham S, Ciuffreda P, Fiecchi A, Cighetti G, Muir M, Scala A, Tyman J (1998). Synthesis of carminic acid, the colourant principle of cochineal. *Journal of the Chemical Society, Perkin Transactions* 1(3):575-582.
- Arroyo FG, Medina ST (2021). Manejo poscosecha de la grana cochinilla y su relación con su calidad. En: Portillo L, Soltero R, Vigueras AL, Romo R de L (editores). *Opuntia: aportaciones a su conocimiento y aprovechamiento*. Universidad de Guadalajara, México. pp 44-48.
- Attokaran M (2017). Cochineal. In: *Natural Food Flavors and Colorants*. pp 145-148. doi:10.1002/9781119114796.ch39.
- Baldwin JL, Chou AH, Solomon WR (1997). Popsicle-induced anaphylaxis due to carmine dye allergy. *Annals of Allergy, Asthma, and Immunology* 79(5):415-419. doi:10.1016/S1081-1206(10)63035-9.
- Beaudouin E, Kanny G, Lambert H, Fremont S, Moneret-Vautrin DA (1995). Food anaphylaxis following ingestion of carmine. *Annals of Allergy, Asthma, and Immunology* 74:427-430. doi:10.1016/S1081-1206(10)63445-X.
- Borges ME, Tejera RL, Díaz L, Esparza P, Ibáñez E (2012). Natural dyes extraction from cochineal (*Dactylopius coccus*). New extraction methods. *Food Chemistry* 132(4):1855-1860. doi:10.1016/j.foodchem.2011.12.01.
- Bota S, Indrie L (2021). Natural Dye Extraction and Dyeing of Different Fibers: A Review. In: Rather LJ, Haji A, Shabbir M (eds), *Innovative and Emerging Technologies for Textile Dyeing and Finishing*. pp 113-135. doi:10.1002/9781119710288.ch4.
- Carocho M, Barreiro MF, Morales P, Ferreira I (2014). Adding Molecules to Food, Pros and Cons: A Review on Synthetic and Natural Food Additives. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety* 13(4):377-399. doi:10.1111/1541-4337.12065.
- Chavez-Moreno CK, Tecante A, Casas A (2009). The *Opuntia* (Cactaceae) and *Dactylopius* (Hemiptera: Dactylopiidae) in Mexico: a historical perspective of use, interaction and distribution. *Biodiversity and Conservation* 18:3337-3355. doi:10.1007/s10531-009-9647-x.
- Chemat F, Abert-Vian M, Fabiano-Tixier AS, Strube J, Uhlenbrock L, Gunjevic V, Cravotto G (2019). Green extraction of natural products. Origins, current status, and future challenges. *TrAC Trends in Analytical Chemistry* 118:248-263. doi:10.1016/j.trac.2019.05.037.
- Cooksey CJ (2019). The red insect dyes: carminic, kermesic and laccaic acids and their derivatives. *Biotechnic & Histochemistry* 94(2):100-107. doi:10.1080/10520295.2018.1511065.
- Da Rocha CB, Noreña CPZ (2020). Microwave-assisted extraction and ultrasound- assisted extraction of bioactive compounds from grape pomace. *International Journal of Food Engineering* 16(1-2):20190191. doi:10.1515/ijfe-2019-0191.
- Da Silva LR, Nunes IL, Block JM (2020). Ultrasound-assisted extraction for the recovery of carotenoids from Guava's pulp and waste powders. *Plant Foods for Human Nutrition* 75(1):63-69. doi:10.1007/s11130-019-00784-0.
- Dapson R (2005). A method for determining identity and relative purity of carmine, carminic acid and aminocarminic acid. *Biotechnic & Histochemistry* 80(5-6):201-205. doi: 10.1080/10520290500485781.
- Dapson R (2007). The history, chemistry and modes of action of carmine and related dyes. *Biotechnic & Histochemistry* 82(4-5):173-187. doi:10.1080/10520290701704188.
- Ding Y, Tang J, You X, Zhang X, Wang G, Yao C, Lin M, Wang X, Cheng D (2019). Study on the mechanism underlying Al-induced hepatotoxicity based on the identification of the Al-binding proteins in liver. *Metallomics* 11:1353-1362. doi:10.1039/C9MT00150F.
- Domínguez DD (2012). Cochinilla de carmín. un producto estratégico para canarias. En Alonso DG (ed). *Semillas y Letras, Historia de la agricultura en Tenerife a través de los documentos escritos*. La Laguna, Santa Cruz de Tenerife: Servicio de Publicaciones, Universidad de La Laguna, Campus Central. pp 89-106
- Dufossé L (2014). Anthraquinones, the Dr Jekyll and Mr Hyde of the food pigment family. *Food Research International* 65:132-136. doi:10.1016/j.foodres.2014.09.012.

- EFSA Panel on Food Additives and Nutrient Sources added to Food (2015). Scientific Opinion on the re-evaluation of cochineal, carminic acid, carmines (E 120) as a food additive. *EFSA Journal* 13(11): 4288. doi:10.2903/j.efsa.2015.4288.
- EFSA (2022). Safety and efficacy of a feed additive consisting of carmine for cats and dogs (Mars Petcare GmbH) 20(10):e07609. doi:10.2903/j.efsa.2022.7609.
- Erkan T (2010). Gıdalaradaki katkı maddeleri. *Türk Pediatri Arşivi* 45(4):315-318. doi:10.4274/tpa.45.315.
- Favaro G, Miliani C, Romani A, Vagnini M (2002). Role of protolytic interactions in photo-aging processes of carminic acid and carminic lake in solution and painted layers. *Journal of the Chemical Society, Perkin Transactions 2* 2(1):192-197. doi:10.1039/B104595B.
- Flores-Alatorre HL, Abrego-Reyes V, Reyes-Esparza JA, Angeles E, Alba-Hurtado F (2014). Variation in the concentration of carminic acid produced by *Dactylopius coccus* (Hemiptera: Dactylopidae) at various maturation stages. *Journal of Economic Entomology* 107:1700-1705. doi:10.1603/ec13475.
- Gebhardt B, Sperl R, Carle R, Müller-Maatsch J (2020). Assessing the sustainability of natural and artificial food colorants. *Journal of Cleaner Production* 260:120884. doi:10.1016/j.jclepro.2020.120884.
- Geow CH, Tan MC, Yeap SP, Chin NL (2021). A Review on Extraction Techniques and Its Future Applications in Industry. *European Journal of Lipid Science and Technology* 123(4):2000302. doi:10.1002/ejlt.202000302.
- Gómez DM (2023). “La Cochinilla y el Carmín – Colores Naturales que son rentables”, <https://sensientfoodcolors.com/es-la/mercados-mundiales-o-mercados-globales/la-cochinilla-y-el-carmin-colores-naturales-que-son-rentables/>.
- González M, Méndez J, Carnero A, Lobo MG, Afonso A (2002). Optimizing Conditions for the Extraction of Pigments in Cochineals (*Dactylopius coccus* Costa) Using Response Surface Methodology. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 50(24):6968-6974. doi:10.1021/jf025756r.
- Gultekin F, Doguc DK (2013). Allergic and immunologic reactions to food additives. *Clinical Reviews in Allergy & Immunology* 45(1):6-29. doi: 10.1007/s12016-012-8300-8.
- Herrera A, Llanderal-Cázares C (2011). Tres calidades de cochinilla: *Dactylopius coccus* Costa en el Perú. *Cactusnet Newsletter* 13:127-136.
- Herrera M, Viera I, Roca M (2023). Study of the authentic composition of the novel green foods: Food colorants and coloring foods. *Food Research International* 170:112974. doi:10.1016/j.foodres.2023.112974.
- Inglese P, Mondragon JC, Nefzaoui A, Sáenz C (2018). Ecología del cultivo, manejo y usos del nopal. Ed. Organización de la Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura e ICARDA. Italia. pp 109-115.
- Kavieva L, Ziyatdinova G (2022). Sensitive voltammetric quantification of carminic acid in candies using selenium dioxide nanoparticles based electrode. *Food Chemistry* 386:132851. doi:10.1016/j.foodchem.2022.132851.
- Kawasaki Y, Sugimoto N, Sato K, Yamazaki T, Ishiwata H, Maitani T (2002). Identification of Acid-stable Carmine in Imported Apple Syrup Product. *Journal of the Food Hygienic Society of Japan* 43(4):191-195. doi:10.3358/shokueishi.43.191.
- Kutlu N, Pandiselvam R, Kamiloglu A, Saka, I, Sruthi NU, Kothakota A, Socol CT, Maurescu CM (2022). Impact of ultrasonication applications on color profile of foods. *Ultrasonics Sonochemistry* 89:106109. doi:10.1016/j.ultsonch.2022.106109.
- Landim NMI, Silva EK, Meireles MAA (2021). Natural blue food colorants: Consumer acceptance, current alternatives, trends, challenges, and future strategies. *Trends in Food Science & Technology* 112:163-173. doi:10.1016/j.tifs.2021.03.023.
- Leonarski E, Kuasnei M, Durant MPA, Cesca, K., de Oliveira D, Ferreira ZAA (2023). Pressurized liquid extraction as an eco-friendly approach to recover anthocyanin from black rice bran. *Innovative Food Science & Emerging Technologies* 86:103372. doi:10.1016/j.ifset.2023.103372.
- Liu Q, He Z, Zeng M, Qin F, Wang Z, Liu G, Chen J (2021). Effects of different food ingredients on the color and absorption spectrum of carminic acid and carminic aluminum lake. *Food Science & Nutrition* 9(1):36-43. doi:10.1002/fsn3.1628.
- Lizaso M, Moneo I, Garcia B, Acero S, Quirce S, Tabar A (2000). Identification of allergens involved in occupational asthma due to carmine dye. *Annals of Allergy, Asthma & Immunology* 84(5):549-552. doi:10.1016/S1081-1206(10)62521-5.
- Mansour R (2018). Natural Dyes and Pigments: Extraction and Applications. In: *Handbook of Renewable Materials for Coloration and Finishing*. pp 75-102. doi:10.1002/9781119407850.ch5.
- Manzoor M, Singh J, Gani A, Noor N (2021). Valorization of natural colors as health-promoting bioactive compounds: Phytochemical profile, extraction techniques, and pharmacological perspectives. *Food Chemistry* 362:130141. doi: 10.1016/j.foodchem.2021.130141.
- Mordor Intelligence, “Mercado de colorantes alimentarios naturales: crecimiento, tendencia, impacto de covid-19 y pronósticos (2023-2028)”, <https://www.mordorintelligence.com/es/industry-reports/global-natural-food-colorants-market>, [consultado el 20 de septiembre de 2023].
- Müller-Maatsch J, Gras C (2016). The “carmine problem” and potential alternatives. In: Carle R, Schweiggert R (eds). *Handbook on Natural Pigments in Food and Beverages, Industrial Applications for Improving Food Color*. 1st edition. eBook. Wood head Publishing, Elsevier Ltd. Cambridge, UK. pp 385-428.
- Ohgiya Y, Arakawa F, Akiyama H, Yoshioka Y, Hayashi Y, Sakai S, Ito S, Yamakawa Y, Ohgiya S, Ikezawa Z, Teshima R (2009). Molecular cloning, expression, and characterization of a major 38-kd cochineal allergen. *Journal of Allergy and Clinical Immunology*

123:1157-1162. doi:10.1016/j.jaci.2008.12.1111.

Ishwarya SP, Nisha P (2021). Headway in Supercritical Extraction of Fragrances and Colors. In: Knoerzer K, Muthukumarappan K (eds). *Innovative Food Processing Technologies*. Elsevier, Oxford, pp 620-639. doi:<https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100596-5.22677-2>

Perez SM, Becerra RR (2001). NOCHEZTLI: El insecto del rojo carmín". *Biodiversitas* 6(36):1-8.

Pinela J, Prieto M, Pereira E, Jabeur I, Barreiro MF, Barros L, Ferreira IC (2019). Optimization of heat-and ultrasound-assisted extraction of anthocyanins from *Hibiscus sabdariffa* calyces for natural food colorants. *Food Chemistry* 275:309-321. doi:10.1016/j.foodchem.2018.09.118.

Rehman F, Adeel S, Rafi S, Habib N, Zia KM, Zuber M, Akhtar N (2018). Contemporary Revolutions in Natural Dyes: Extraction and Dyeing Methodology. In: *Handbook of Renewable Materials for Coloration and Finishing*. pp 125-168. doi:10.1002/9781119407850.ch8.

Rushikesh AP, Girirajsinh CJ (2022). Natural food colorants: extraction and stability study. *Materials Today: Proceedings* 57(6):2381-2395. doi:10.1016/j.matpr.2021.12.151.

Rutkowska M, Namieśnik J, Konieczka P (2017). Ultrasound-Assisted Extraction. In: *The Application of Green Solvents in Separation Processes*. pp 301-324. Elsevier. doi: 10.1016/b978-0-12-805297-6.00010-3.

Sabatino L, Scordino M, Gargano M, Lazzaro F, Borzi MA, Traulo P, Gagliano G (2012). Aminocarminic acid in E120-labelled food additives and beverages. *Food Additives and Contaminants: Part B* 5(4):295-300. doi:10.1080/19393210.2012.719551.

Sankar KU (2015). Extraction Processes. In: Bhattacharya S (Ed.). *Conventional and Advanced Food Processing Technologies* (1st ed.). Mysore, India: Food Engineering Department, CSIR-Central Food Technological Research Institute. John Wiley & Sons, Ltd. pp 129-157. doi:10.1002/9781118406281.ch7.

Schmidt-Jacobsen JF, Frandsen RF (2011). Method for the preparation of a carminic acid lake. US Patent 8,021,440 B2.

Schul J (1992). Colorant based on carminic acid, method of preparation, and method of coloring a foodstuff. United States Patent Number. 5:147, 673.

Schweiggert RM (2018). Perspective on the Ongoing Replacement of Artificial and Animal-Based Dyes with Alternative Natural Pigments in Foods and Beverages. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 66(12):3074-3081. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.7b0593>.

Sigma-Aldrich. (n.d.). Product Specification: Carminic Acid. Retrieved from <https://www.sigmaaldrich.com>.

Szadkowski B, Maniukiewicz W, Rybiński P, Beyou E, Marzec A (2022). Bio-friendly stable organic-inorganic hybrid pigments based on carminic acid and porous minerals: acid/base allochromic behavior and UV-stabilizing effects on ethylene-norbornene copolymer matrix. *Journal of Environmental Chemical Engineering* 10(5):108268 doi:10.1016/j.jece.2022.108268.

Van Dam AR, May B (2012). A new species of *Dactylopius Costa* (*Dactylopius gracilipilus* sp. nov.) (Hemiptera: Coccoidea: Dactylopiidae) from the Chihuahuan Desert, Texas USA. *Zootaxa* 3573:33-39. doi:10.11646/zootaxa.3573.1.3.

Vega G (2021). (The Food Tech). "Aditivos alimentarios: ¿qué son y cuál es su relevancia en la industria?". <https://thefoodtech.com/ingredientes-y-aditivos-alimentarios/aditivos-alimentarios-que-son-y-cual-es-su-relevancia-en-la-industria/>, [consultado el 20 de septiembre de 2023].

Watson E (2013). Dannon rejects calls to remove crushed bugs from its yogurts: 'Carmine is a safe natural food color, and we label it clearly on pack'. <http://www.foodnavigator-usa.com/Suppliers2/Dannon-rejects-calls-to-removecrushed-bugs-from-its-yogurts-Carmine-is-a-safe-natural-food-color-and-we-labelit-clearly-on-pack> (last accessed on December 30, 2013).

Zacarias-Alvarado JR, Tovar-Robles CL, Méndez-Gallegos S, Magallanes-Quintanar R, Aquino-Pérez G (2020). Rendimiento y calidad de ácido carmínico de *Dactylopius coccus Costa* en diferentes alturas de la nopaloteca. *Agrociencia* 54:705-716. doi:10.47163/agrociencia.v54i5.2127

Zannou O, Pashazadeh H, Ibrahim SA, Koca I, Galanakis CM (2022). Green and highly extraction of phenolic compounds and antioxidant capacity from kinkeliba (*Combretum micranthum* G. Don) by natural deep eutectic solvents (NADESs) using maceration, ultrasound-assisted extraction and homogenate-assisted extraction. *Arabian Journal of Chemistry* 15(5):103752. doi:10.1016/j.arabjc.2022.103752



Effect of antagonistic bacteria on *Dactylopius opuntiae* (Hemiptera: Dactylopiidae)

Redouan Qessaoui¹, Chaima Elhallah¹, Salahddine Chafiki^{1,2}, Yassin Imlil¹, Rachid Bouharroud^{1*}

¹ Regional Center for Agricultural Research of Agadir, National Institute of Agricultural Research, Avenue Ennasr, PoB 415 Rabat Principale, Rabat 10090, Morocco.

² AgroBioSciences Plant Stress Physiology Laboratory (AgBS), Mohammed VI Polytechnic University (UM6P), Benguerir, 43150 Morocco.

Historial

Manuscrito recibido: 28 de agosto de 2024

Manuscrito aceptado: 29 de enero de 2025

Manuscrito publicado: abril 2025

*Autor para correspondencia

Rachid Bouharroud

e-mail: rachid.bouharroud@inra.ma

Abstract

Cactus pear has important economic roles in Morocco as a source of food, animal feed, and income for rural populations. However, this crop is currently suffering from the attack of the wild cochineal *Dactylopius opuntiae* (Cockerell), which has caused huge production losses. A range of insecticides are widely used to control *D. opuntiae* and other scale insects worldwide. However, the problems associated with the harmful effects of pesticides on humans, the environment and non-target organisms, require that alternative options should be developed for the eco-friendly control of *D. opuntiae*. This study aims to evaluate the potential of three rhizospheric bacteria in controlling *D. opuntiae*, from which two isolates have a notable impact on both nymphs and adult females. Particularly, isolate TRD16 caused 80% mortality against nymphs, while BRS35 and ZTRS2 show 97% and 84% pathogenicity, respectively, against adult females.

Keywords: *Opuntia ficus-indica*, cactus cochineal pest, rhizospheric bacteria

Introduction

Cactus pear is a plant species commonly found in semi-arid and arid regions worldwide. It is an important crop in many countries for mitigating water scarcity and soil erosion owing its resistance to drought and heat and alleviates desertification (LeHouérou, 1996; Yahia *et al.*, 2011). The Moroccan Green Plan (PMV 2008-2020) advocates for cactus pear cultivation in harsh areas, which extended from 45,000 hectares during the early 1990s to over 150,000 hectares by 2017 (MAPMDREF, 2017). Unfortunately, the crop is currently being attacked by a sap-sucking insect pest named *Dactylopius opuntiae* (Cockerell) (Hemiptera: Dactylopiidae). In Morocco, this insect was initially reported in the Sidi Bennour region in September 2014 (Bouharroud *et al.*, 2016) and since then, it has spread to various regions, posing a threat to the entire value chain. Due to its high propagation speed, this pest could potentially cause significant damage to cactus pear in a short time.

In response to *D. opuntiae*, the National Office of Alimentary Security in Morocco authorized several insecticides to control this pest (ONSSA, 2024). However, the use of synthetic residual chemicals not only contributes

to pest resistance but also poses a threat to human health and the environment and negatively affects natural enemies (Ramírez-Bustos *et al.*, 2018; Isman, 2019). To minimize these problems and keep pest populations below economic damage levels, alternative control techniques are required for an integrated management. In this study, bacteria isolated from the cactus pear rhizosphere were evaluated for their insecticidal effects on *D. opuntiae* under laboratory conditions.

Materials and methods

Soil samples

Cactus pear rhizosphere soil samples were collected from cacti in Tioughza, located in the Sidi Ifni province, Morocco (29°26'13.97"N/10° 1'55.73"W), during March 2022, transported to the laboratory and stored at 4°C until further analysis.

Bacterial isolation

To isolate bacteria from the rhizosphere, 1 g of each soil sample was added to 9 mL of sterile distilled water

and mixed. Subsequently, decimal dilutions up to 10^{-6} were prepared. Next, 0.1 ml of each dilution was used to inoculate three Petri dishes containing nutrient agar medium, which were then incubated at 28 ± 2 °C for 48 h (Qessaoui *et al.*, 2019). All colonies that appeared on the culture media were streaked on fresh nutrient agar media. After incubation for 48 h at 28 ± 2 °C, well-isolated colonies were considered pure and stored on nutrient agar at 4 °C for three months. Eppendorf tubes containing nutrient broth supplemented with 20% sterile glycerol were used for long-term storage at -20°C (Fonseca *et al.*, 2006; Caplik *et al.*, 2022).

Bactericidal activity of isolates against *D. opuntiae* females and nymphs

The activity of three selected isolates against *D. opuntiae* females and nymphs was evaluated under laboratory conditions (26 ± 2 °C, relative humidity of 75%, and photoperiod of 14 h light/10 h darkness). For this test, pieces of cladode of the same size containing ten females were used. Ten first-instar nymphs of *D. opuntiae* were placed separately on the cladodes. Afterward, the infected cladodes were treated with each bacterial isolate (10^6 CFU/ml) using a hand sprayer (Fig. 1). The infected cladodes were placed in a disinfected plastic box. For control, sterile distilled water was used to treat the cladodes. Three repetitions for each treatment were used.

Nymph mortality was recorded 48 and 72 h after applying the treatments. Mortality of adult females was examined through a binocular stereoscope and recorded 6 and 9 days after treatment. Dead nymphs displayed color changes and immobility, while the dead females exhibited desiccation and a dark brown hue (Ramdani *et al.*, 2021).

Statistical analysis

Data was subjected to ANOVA, and presented as means $\pm$ standard deviation. Any difference mentioned is significant at $p < 0.05$ using Newman–Keuls test through the SPSS software.

Results and discussion

The nymph mortality rates increased by all three bacteria at 48 and 72 h of treatment (Table 1). After 48 h of treatment, TRD16 isolate shows the highest percentage of nymph mortality ($53.33 \pm 20.82\%$) compared to the control. At 72 h after the treatment, although the means were clearly different and TRD16 still causing the highest percentage of nymph mortality ($80 \pm 26.46\%$), no statistically significant differences were observed among the treatments.

Regarding the effect of bacteria on female mortality, the results indicated a significant difference between the tested bacteria ($P < 0.05$) at six and nine days after treatment. By six days, BRS35 isolate exhibited the highest percentage of female mortality (70.16 ± 13.10) compared to the control. After nine days of treatment the same isolate had $97.62 \pm 4.12\%$ of mortality followed by ZTRS2 (83.64 ± 12.50), and consistently, the control obtained the lowest percentage of mortality (44.79 ± 5.5).

Exploring the bacterial diversity of soil for biological control of pests remains an attractive alternative (Achouak *et al.*, 2000). The current study was carried out in laboratory conditions to assess the potential effect of three isolates alone with a black soap for controlling nymphs and adult females of *D. opuntiae*. TRD16 and BRS35 provided the highest toxicity on *D. opuntiae* nymphs and adult females, respectively. The potential of bacteria as biopesticides has been shown against

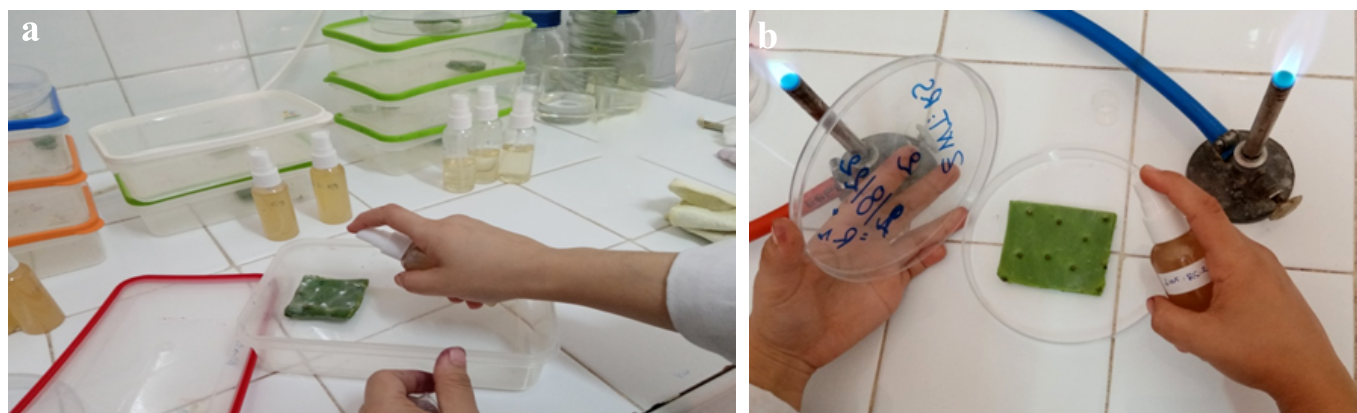


Figure 1. Bacterial application to adult females (a) and first-instar nymphs (b) of *D. opuntiae* under laboratory conditions.

Table 1. Percentage of first-stage nymph mortality after treatment with the selected bacteria. Within a column, values with the same letters are not significantly different according to the Newman & Keuls test at 5%. Values are the average of three replications; values represent the mean and standard deviation.

Isolate	Exposure period	
	48 h	72 h
Control	10.00 ± 10.00 ^a	33.33 ± 5.77 ^a
ZTRS 2	33.33 ± 15.28 ^{ab}	70.00 ± 10.00 ^a
TRD 16	53.33 ± 20.82 ^b	80.00 ± 26.46 ^a
BRS 35	30.00 ± 10.00 ^{ab}	53.33 ± 23.09 ^a

Table 2. Percentage of adult female mortality after treatment with the selected bacteria. Within a column, values with the same letters are not significantly different according to the Newman & Keuls test at 5%. Values are the average of three replications; values represent the mean and standard deviation.

	Time of exposure	
	6 days	9 days
Control	21.62 ± 7.30 ^a	44.78 ± 5.59 ^a
ZTRS2	36.71 ± 6.03 ^a	83.63 ± 12.50 ^{bc}
TRD16	26.42 ± 13.64 ^a	67.02 ± 21.36 ^{ab}
BRS35	70.16 ± 13.10 ^b	97.62 ± 4.12 ^c

a broad spectrum of insects (Burges, 1982; Dowling and Waterfield, 2007; Ruiú, 2020). Entomopathogenic bacteria occupy a special place in the natural control of many insects, particularly relevant are *Bacillus* species that effectively control pests and offers encouraging prospects. Bacterial antagonistic activities have been attributed to their capability to produce enzymes like chitinase and cellulase (Veliz *et al.*, 2017; Qessaoui *et al.*, 2022). Perhaps these cell wall degrading enzymes can affect *D. opuntiae* disrupting the insect's internal structures and functions, and ultimately impairing its survival. Chitinase targets chitin, a major component of the insect's exoskeleton, thereby weakening it and rendering the insect more vulnerable to environmental stress or predation (Paschapur *et al.*, 2021). Cellulase, on the other hand, has the capacity to break down cellulose in the insect's gut, which in turn affects its ability to digest food (Barbosa *et al.*, 2021). The results of the present study demonstrate that the application of bacteria can be used for the bio-control of *D. opuntiae*, providing a favorable alternative to chemical pesticides. However, further research is required towards taxonomically identify the selected bacteria and their mechanisms of action. Laboratory investigations should be accompanied by field experiments to identify the optimal application of the most effective bacterial

isolates on the wild cochineal. Researchers also need to establish suitable bacterial formulations, explore their compatibility with other biopesticides (such as botanical extracts or oils) and determine the most suitable method of application under field conditions.

Conclusions

The results of this study demonstrate that bacterial isolates from the cactus pear rhizosphere, particularly TRD16 and BRS35, exhibit potential as biocontrol agents against *D. opuntiae* nymphs and adult females. This research highlights the promising role of bacteria in integrated pest management, offering an eco-friendly alternative to chemical pesticides. Further investigation about bacterial formulations and their secondary effects on plants is necessary to fully explore their practical application in *D. opuntiae* control.

References

- Achouak W, Sutra L (2000). *Pseudomonas brassicacearum* ap. nov. and *Pseudomonas thivervalensis* sp. nov., two root-associated bacteria isolated from *Brassica napus* and *Arabidopsis thaliana*. *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology* 50:9-18.
- Bouharroud R, Amarraque A, Qessaoui R (2016). First report of the *Opuntia* cochineal scale *Dactylopius opuntiae* (Hemiptera: Dactylopiidae) in Morocco. *EPPO Bull* 46:308-310
- Bouthaina B, Manel L (2016). Isolement et criblage enzymatiques et antimicrobiens de bactéries thermophiles de Hammem Debagh.
- Burges HD (1982). Control of insects by bacteria. *Parasitology* 84(4):79-117.
- Caplik D, Kusek M, Kara S, Seyrek A and Celik Y, 2022. First report of bacterial stalk rot of maize caused by *Dickeya zeae* in Turkey. *New Disease Reports* 45(1):p.e12070.
- Dowling A, Waterfield NR (2007). Insecticidal toxins from *Photobacterium* bacteria and their potential use in agriculture. *Toxicon* 49(4):436-451.
- Fonseca F, Marin M and Morris GJ (2006). Stabilization of frozen *Lactobacillus delbrueckii* subsp. *bulgaricus* in glycerol suspensions: freezing kinetics and storage temperature effects. *Applied and Environmental Microbiology* 72(10):6474-6482.
- Isman MB (2019). Botanical insecticides in the twenty-first century fulfilling their promise? *Annu Rev Entomol* 65. doi:10. 1146/annurev-ento-011019-025010
- LeHouérou HN (1996). The role of cacti (*Opuntia* spp.) in erosion control, land reclamation, rehabilitation and agricultural develop-

ment in the Mediterranean Basin. *Journal of Arid Environmental* 33:135–159.

MAPMDREF (2017). <http://www.agriculture.gov.ma/pages/actualites/cochenille-du-cactus-lancement-d%E2%80%99une-assistance-technique-de-la-fao-pour-l%E2%80%99eradication>

ONSSA (2024). Index phytosanitaire; <https://eservice.onssa.gov.ma/IndPesticide.aspx>. Accessed: 2024-12-19

Paschapur A, Subbanna ARNS, Singh AK, Jeevan B, Stanley J, Rajashekhar H and Mishra KK (2021). Unraveling the importance of metabolites from entomopathogenic fungi in insect pest management. *Microbes for Sustainable Insect Pest Management: Hydrolytic Enzyme & Secondary Metabolite* 2:89-120.

Qessaoui R, Bouharroud R, Furze JN, El Aalaoui M, Akroud H, Amarraque A, Chebli B (2019). Applications of new rhizobacteria *Pseudomonas* isolates in agroecology via fundamental processes complementing plant growth. *Scientific Reports* 9(1):1-10.

Qessaoui R, Boutjagualt I, Walters SA, Bouamair A, Tahiri A, Ait Aabd N, ... Bouharroud R (2022). Pathogenicity of Rhizobacteria *Pseudomonas* against *Ceratitis capitata* Wiedemann (Diptera: Tephritidae). *Phytoparasitica* 50(4):889-899.

Ramdani C, Bouharroud R, Sbaghi M, Mesfioui A, El Bouhssini M (2021). Field and laboratory evaluations of different botanical insecticides for the control of *Dactylopius opuntiae* (Cockerell) on cactus pear in Morocco. *International Journal of Tropical Insect Science* 41(2):1623-1632.

Ramírez-Bustos II, López-Martínez V, Juárez-López P, Guillén-Sánchez D, Alía-Tejaca I, Rivera-León I, Albeiro Saldarriaga-Noreña H and Jiménez-García D (2018). Identificación de envases vacíos de plaguicidas en plantaciones de nopal verdura, *Opuntia ficus-indica* (L.) Mill. (Cactaceae), en Morelos, México. *Acta Agrícola y Pecuaría* 4:18-25. doi:10.30973/aap/2018.4.1/3

Ruiu L (2020). Plant-growth-promoting bacteria (PGPB) against insects and other agricultural pests. *Agronomy* 10(6):861.

Veliz EA, Martínez-Hidalgo P and Hirsch AM (2017). Chitinase-producing bacteria and their role in biocontrol. *AIMS microbiology* 3(3):689.

Yahia EM, Sáenz C (2011). *Cactus pear (Opuntia species)*. In: Yahia EM (ed) *Postharvest Biology and Technology of Tropical and Subtropical Fruits*. Wood head Publishing, Sawston UK, pp 290-3



Caracterización de las propiedades físicas del adobe de viviendas vernáculas en Santiago Amatlán, Oaxaca

Characterization of the physical properties of adobe in vernacular houses in Santiago Amatlán, Oaxaca

Miguel Adrián Hernández Rodríguez^{1†*} , Heidy Gómez Barranco¹ , Rafael Alavéz Ramírez² ,
Elia Mercedes Alonso Guzmán³ .

¹ Facultad de Arquitectura “5 de Mayo”, Universidad Autónoma Benito Juárez de Oaxaca (UABJO).

² Instituto Politécnico Nacional, Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional (CIIDIR) Unidad Oaxaca.

³ Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo (UMSNH), Cuerpo Académico “Ciencias, Ingeniería y Tecnología de Materiales para la Construcción”.

Historial

Manuscrito recibido: 14 de octubre de 2024

Manuscrito aceptado: 28 de marzo de 2025

Manuscrito publicado: abril 2025

*Autor para correspondencia

Miguel Adrián Hernández Rodríguez

miguel.ahr117@gmail.com

ORCID: 0000-0002-5239-4094

Resumen

La pérdida del patrimonio arquitectónico representa un problema en México debido al desconocimiento de sus técnicas y características, además de la falta de normativa. Esta investigación forma parte del PRONAI 321260 del CONACYT, y se busca preservar los sistemas constructivos tradicionales en municipios marginados. Las estadísticas de la CONAVI indican que Santiago Amatlán, Oaxaca, presenta altos niveles de pobreza y un progresivo abandono de materiales tradicionales. En el presente trabajo se caracterizaron las propiedades físicas del adobe de viviendas vernáculas de la comunidad, lo que facilitará su preservación y promoverá su uso adecuado en nuevas construcciones que forman parte del patrimonio cultural de la región.

Palabras clave: Adobe, arquitectura vernácula, propiedades físicas.

Abstract

The loss of architectural heritage represents a problem in Mexico due to the lack of knowledge of its techniques and characteristics, in addition to the lack of regulations. This research is part of CONACYT's PRONAI 321260, and seeks to preserve traditional construction systems in marginalized municipalities. CONAVI statistics indicate that Santiago Amatlán, Oaxaca, has high levels of poverty and a progressive abandonment of traditional materials. In the present work, the physical properties of adobe in vernacular houses of the community were characterized, which will facilitate its preservation and promote its appropriate use in new constructions that are part of the cultural heritage of the region.

Keywords: Adobe, vernacular architecture, physical properties.

Introducción

La construcción con tierra ha tenido una importancia vital a lo largo de la historia y sigue desempeñando un papel fundamental en la actualidad, según el Banco Mundial (2022), un tercio de la población habita en viviendas construidas con este material. En México, dichas construcciones tienen una baja apreciación, ya que sus materiales se consideran propios de las clases más desfavorecidas. En el estado de Oaxaca, este sistema constructivo sigue en uso, prueba de ello es la notable colección de edificios históricos construidos con adobe,

los cuales reflejan su riqueza cultural.

En términos ambientales, la fabricación de adobe se caracteriza por tener una huella de carbono muy baja y, además, es un material reciclable, lo que permite su reutilización. En el ámbito social, la utilización de materiales vernáculos contribuye a preservar la identidad y el patrimonio cultural de la región. Además, promueve el trabajo local, fortaleciendo los vínculos y facilitando la transmisión de habilidades tradicionales de construcción a lo largo de las generaciones. Según los informes del Consejo Nacional de Evaluación de la Política de

Desarrollo Social (CONEVAL, 2023) y la Comisión Nacional de Vivienda (CONAVI, 2023), la comunidad de Santiago Amatlán, presenta indicadores de pobreza y un progresivo desuso de materiales tradicionales, lo cual propicia la pérdida de su riqueza arquitectónica. Al realizar un conteo de viviendas en la comunidad, se observa que alrededor del 44% están construidas con adobe. Sin embargo, el desconocimiento sobre estas técnicas, calidad y cualidades de sus materiales se incrementan conforme pasa el tiempo.

Esta investigación, que se centra en la caracterización de las propiedades físicas del sistema constructivo de adobe de las viviendas vernáculas en el municipio de Santiago Amatlán, Nochixtlán, Oaxaca, forma parte del PRONAI 321260 del CONACYT. El objetivo fue caracterizar las propiedades físicas del adobe utilizado para la construcción de viviendas vernáculas para brindar información relevante a los profesionales del área. Se revisaron los antecedentes y el marco normativo existente sobre el sistema constructivo del adobe, se llevó a cabo un mapeo de la tipología de vivienda, se realizaron entrevistas sobre la comodidad térmica de los ocupantes de las viviendas y se tomaron muestras de adobe in situ, para posteriormente, efectuar pruebas físicas del material.

Material y métodos

Caracterización física y toma de muestras de adobe

La caracterización de materiales se refiere al proceso de identificar, describir y evaluar las propiedades físicas, mecánicas, químicas y estructurales de un material. Esto incluye la determinación de su composición, estructura interna, comportamiento frente a diferentes condiciones ambientales y su capacidad para cumplir con ciertas especificaciones o requisitos de rendimiento en aplicaciones específicas.

Para esta investigación, se llevó a cabo la toma y extracción de muestras representativas del entorno, sujetas a la disponibilidad de los habitantes. En total, se recolectaron 16 muestras, de las cuales 9 corresponden a coronas de muros, 5 a la parte intermedia y 2 bloques a la cimentación. Además, se realizó un muestreo de un pozo a cielo abierto con una profundidad de 1.1 m. El propósito de este muestreo fue comparar, a través del tamizado del terreno, si los adobes fueron efectivamente elaborados con tierra proveniente del mismo lugar, según lo indicado por los habitantes. Las muestras recopiladas exhiben, en general, las siguientes dimensiones: 20 cm de ancho, 15 cm de altura y 40 cm de longitud.

Propiedades físicas

Granulometría en seco

La granulometría es un proceso mecánico mediante el cual se separan las partículas de un suelo según su tamaño. Los resultados de este análisis suelen representarse en curvas granulométricas, que muestran el porcentaje acumulado de material en función del tamaño de las partículas. Estas curvas son fundamentales para comprender las características del material, como su distribución de tamaños, uniformidad, densidad aparente y porosidad, entre otros aspectos. En el caso del adobe, la granulometría es un factor clave para determinar sus propiedades mecánicas, estabilidad y durabilidad, ya que una distribución adecuada de tamaños de partículas mejora su resistencia y desempeño estructural. Para la clasificación de suelos, se emplea el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS, 2023), el cual permite categorizar los suelos con base en sus características y propiedades, facilitando su estudio y aplicación. Como primer paso, la muestra de adobe fue secada en un horno a 60 °C durante 24 h, con el fin de eliminar cualquier humedad residual. Una vez seca, se disgregó utilizando un martillo de goma, asegurando que el material alcanzara un estado adecuado para el análisis sin alterar significativamente la granulometría. Posteriormente, se procedió al cuarteo de la muestra mediante un cono truncado, asegurando una distribución representativa del material. Se realizaron cinco tanteos para obtener una fracción homogénea.

Tras la selección, el material fue pesado en una balanza de precisión y sometido a un tamizado mecánico con una máquina Ro-Tap durante 5 minutos, utilizando una serie de mallas que van desde 2" hasta la No. 4. Este proceso permitió obtener la distribución granulométrica del material para su posterior análisis (ASTM C136/C136M – 14).

Granulometría de lavado

De la muestra previamente obtenida, se criban 200 g de material que pasa por la malla No. 4 y se colocan en un recipiente etiquetado. Luego, la muestra se lava mediante tamizado húmedo con la malla No. 200 para eliminar limos y arcillas, continuando el proceso hasta que el agua de drenaje salga completamente clara.

Una vez completado el lavado, la muestra se seca en un horno a 60 °C hasta alcanzar un peso constante, asegurando la eliminación total de humedad. Finalmente, el material seco se criba nuevamente utilizando una serie de mallas estandarizadas, y se registran los pesos obtenidos para el análisis granulométrico.

Peso volumétrico

El peso unitario o peso volumétrico se define como la relación entre el peso total de la muestra y su volumen total. Esta prueba, en la fabricación de adobe, es fundamental porque determina su resistencia y durabilidad. Un adobe con un peso adecuado garantiza una estructura sólida y estable, lo que resulta vital para la seguridad y la longevidad de las construcciones de tierra.

Para calcular el peso volumétrico, primero se pesó la tara vacía utilizando una balanza de precisión. Luego, se pesó la tara con la muestra de suelo obtenida de la prueba de granulometría, la cual había sido secada previamente en un horno, disgregada y cuarteada para asegurar su homogeneidad. Posteriormente, se calculó el volumen de la tara con la muestra (ASTM D7263-21).

Con estos datos, se utilizó la siguiente fórmula para determinar el peso volumétrico:

$$Y_m = W_m / V_m$$

Donde:

Y_m : Peso volumétrico (kg/m^3)

W_m : Peso de la muestra (kg)

V_m : Volumen de la muestra (m^3)

Porcentaje de humedad

El porcentaje de humedad en un suelo se refiere a la cantidad de agua presente en relación con el peso total del suelo. El contenido de humedad en el adobe varía según la mezcla y el proceso de fabricación. Controlar este factor es crucial para asegurar la calidad y resistencia del material en construcción, ya que afecta directamente su trabajabilidad, resistencia y durabilidad. Un contenido de humedad adecuado es necesario para una correcta mezcla, compactación y secado del adobe.

Para realizar esta prueba, primero se pesa la muestra y luego se coloca en un horno a una temperatura de 105 °C durante 24 horas para su secado. Después de este proceso, se vuelve a pesar la muestra, restando el peso de la tara (ASTM D2974-20e1.).

El contenido de humedad se calculó mediante la siguiente fórmula:

$$W\% = (P_{sh} - P_{ss}) / P_{ss} \times 100$$

donde:

P_{sh} : Peso de la muestra húmeda (antes del secado)

P_{ss} : Peso de la muestra seca (después del secado completo)

Densidad

La densidad es una medida de la cantidad de masa contenida en una unidad de volumen, y se calcula dividiendo la masa de un objeto o sustancia por su volumen.

La densidad del adobe puede variar dependiendo de varios factores, como la composición de los materiales utilizados, el proceso de fabricación y el grado de compactación. Esta característica influye directamente en su resistencia, aislamiento, durabilidad y facilidad de manejo. Controlar la densidad del adobe es fundamental para garantizar la seguridad, estabilidad y eficiencia de las estructuras construidas con este material.

Mediante la determinación de la densidad, también es posible calcular la porosidad total del suelo. Para ello, se pesaron 50 gramos de material que pasó por una malla número 40 y se distribuyó en dos matraces, previamente calibrados y numerados.

El siguiente paso consistió en hervir el agua en un baño maría durante 2 horas para eliminar las moléculas de oxígeno presentes en la muestra. Posteriormente, se utilizó una máquina de vacío para extraer el aire restante y se registró la temperatura. Luego, la muestra se secó en un horno a 65°C durante 24 horas (ASTM D7263-21.).

Finalmente, se pesó el contenido seco y se calculó la densidad utilizando la siguiente fórmula:

$$\rho_r = M_{ps} / V_{pd}$$

donde:

ρ_r es la densidad aparente del material,

M_{ps} es la masa de la muestra seca (en gramos),

V_{pd} es el volumen desplazado por el agua (en centímetros cúbicos).

Límites de Atterberg

Los límites de Atterberg son un conjunto de pruebas utilizadas para determinar las propiedades de los suelos, particularmente su contenido de agua y plasticidad (ASTM D4318-95a).

Límite líquido

Esta prueba se emplea para determinar el contenido de agua con el cual el suelo adquiere una consistencia de lodo capaz de fluir con esfuerzos bajos.

La prueba se realiza colocando una muestra del suelo en una cuchara de Casagrande normalizada. Un surco abierto con un acanalador normalizado se cierra por el efecto de golpear la cuchara sobre una base rígida, al dejarla caer desde una altura de 10 mm. La cantidad de humedad en el suelo se ajusta gradualmente hasta que

el surco se cierra completamente a lo largo de una distancia de 12 mm (0,47 pulgadas) después de 25 golpes estándar.

El límite líquido en la fabricación de adobe determina la humedad adecuada para la mezcla, asegurando la consistencia, plasticidad y previniendo la contracción excesiva, garantizando así la calidad del producto final.

Una vez alcanzados los 25 golpes, se procede a llenar el molde para determinar la contracción lineal.

Límite plástico

El límite plástico del suelo describe una propiedad que indica su plasticidad. Esta propiedad corresponde a la humedad del suelo por encima de la cual el suelo se comporta plásticamente, es decir, puede deformarse sin romperse, e influye en la plasticidad de la mezcla de adobe, afectando su trabajabilidad, coherencia, estabilidad y durabilidad, aspectos fundamentales para la fabricación de adobe de calidad. Este ensayo consiste en mezclar una muestra de suelo con agua y amasarla hasta que adquiera una consistencia uniforme. Luego, la muestra se enrolla en forma de hilo sobre una superficie plana (generalmente de vidrio) hasta que el hilo tenga un diámetro de aproximadamente 3 mm y se rompa. El contenido de humedad correspondiente a este punto de ruptura, donde el hilo se fragmenta, se registra como el límite plástico del suelo.

Contracción lineal

La prueba de contracción lineal en tierra es un procedimiento utilizado para determinar la cantidad de contracción que experimentará un suelo al secarse, debido a la pérdida de humedad, lo cual puede causar asentamientos o deformaciones en las estructuras construidas sobre él. Durante esta prueba, las muestras de suelo se preparan y se compactan adecuadamente en un molde rectangular con un volumen y compactación estándar. Posteriormente, se someten a un proceso de secado controlado, generalmente en un horno a una temperatura de 105 °C durante un periodo de 24 h, hasta que la humedad del suelo se elimine gradualmente. Durante el proceso de secado, se registran las variaciones en la longitud de las muestras a intervalos regulares, por ejemplo, cada 24 h, hasta que la contracción se estabilice.

La contracción lineal se calcula utilizando la fórmula estándar:

$$CL (\%) = [(Li - Lf) / Li] \times 100.$$

Donde:

CL = Contracción lineal (%)

Li = Longitud inicial

Lf = Longitud final

Resultados

Estado del arte de la información

Marco normativo

El sistema constructivo de adobe, profundamente arraigado en la historia y cultura de México, ha enfrentado diversos desafíos y ha sido objeto de regulación y normativas específicas. A nivel internacional, el marco normativo relacionado con el adobe puede estar influenciado por convenciones y tratados internacionales que abordan la preservación del patrimonio cultural, la protección del medio ambiente y los estándares de construcción sostenible.

La Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (UNESCO, 2023) desempeña un papel clave en la promoción y preservación de la arquitectura de tierra, incluido el adobe, como parte del patrimonio cultural mundial.

La Convención sobre la Protección del Patrimonio Mundial, Cultural y Natural, adoptada en 1972, reconoce la importancia de salvaguardar sitios y prácticas culturales relacionadas con la tierra. Además, organizaciones como ONU-Hábitat promueven prácticas de construcción sostenible que incluyen el uso de materiales tradicionales, como el adobe, en proyectos de vivienda a nivel global.

Dentro de las normativas vigentes y aplicables a nivel internacional, destaca la regulación peruana sobre el adobe, establecida en el Reglamento Nacional de Edificaciones (RNE, 2023) de Perú, el cual define estándares y requisitos técnicos para la construcción con este material.

En México, las regulaciones específicas para la construcción con adobe son limitadas y pueden variar según el estado o municipio. No obstante, existen normativas nacionales aplicables a la construcción en general que también pueden ser relevantes para el uso del adobe. Entre las más importantes se encuentran la Norma Mexicana NMX-C-416-ONNCCE-2022, que establece los requisitos para la fabricación y uso del adobe en edificaciones, así como la Norma Mexicana NMX-C-404-ONNCCE-2022, que forma parte de las normas técnicas complementarias para elementos de mampostería.

A nivel estatal en el estado de Oaxaca, no existe una normativa específica sobre la construcción con adobe;

sin embargo, algunos manuales técnicos proporcionan pautas para su correcta aplicación.

Análisis de la zona de estudio

Tipología de vivienda

Las viviendas de adobe en la comunidad se caracterizan por ser de un solo nivel, con una planta rectangular de entre 30 m² y 50 m² de superficie en promedio. Sus muros longitudinales tienen una altura de entre 2.4 m y 2.7 m, mientras que los muros transversales alcanzan alturas de 3 m a 3.5 m. Por lo general, no cuentan con muros divisorios intermedios. Suelen tener una única puerta de acceso, ubicada al centro del muro longitudinal, con dimensiones que varían entre 0.7 m y 1.2 m de ancho, y una altura promedio de 2 m. Por lo regular, presentan una ventana de entre 0.3 m² y 1 m² de área, ubicada en algún muro longitudinal.

Como se observa en la **Figura 1**, en puertas y ventanas se colocan dinteles de madera de entre 3 cm y 5 cm de espesor, con un apoyo sobre los muros de aprox. 20 cm a 30 cm. Para unir las piezas de adobe se utiliza un mortero compuesto por tierra, agua y pasto seco, formando un lodo cuya junta tiene un espesor de entre 2 cm y 3 cm. La cimentación suele estar compuesta por zapatas corridas de piedra braza, desplantadas a una profundidad de entre 60 cm y 80 cm, y sobresaliendo del terreno natural entre 30 cm y 40 cm para evitar la intemperización de la base de los muros de adobe (Arroyo, 2010).

El sistema de cubierta es a dos aguas, con una inclinación de entre 13° y 25°. Generalmente, está conformado por una lámina y se estructura con una viga longitudinal

robusta de madera que se apoya en los muros transversales (cabeceros) y en dos puntales de madera. Estos puntales se conectan a una viga transversal ubicada en cada tercio del claro y se apoyan sobre los muros longitudinales. Sobre los muros y la viga longitudinal descansan polines de madera, también conocidos como “madrinas” o “listones”, colocados con una separación promedio de 60 cm. Transversalmente a los polines se instalan fajillas de madera cada 25 cm, las cuales sirven de soporte para las tejas de barro recocido.

Mapeo de viviendas

En el municipio de Santiago Amatlán existen un total de 120 hogares, de los cuales 53 viviendas están construidas con adobe, lo que representa el 44.1% del total. Le sigue el uso de tabicón, con un 29%, lo que indica que la mayoría de las viviendas aún son de adobe, resaltando la importancia de esta investigación. A continuación, se muestra la distribución actual de las viviendas de adobe (**Figura 2**). Como referencia, se toma el templo de Santiago Apóstol, a partir del cual el municipio se divide en cuatro cuadrantes, identificándose la mayor concentración de viviendas en el cuadrante noroeste.

Las viviendas se clasifican según su estado actual de la siguiente manera:

Color verde: viviendas en buen estado de conservación.
Color naranja: viviendas que presentan algún tipo de deterioro.

Color rojo: viviendas abandonadas o que representan un riesgo estructural para sus habitantes.

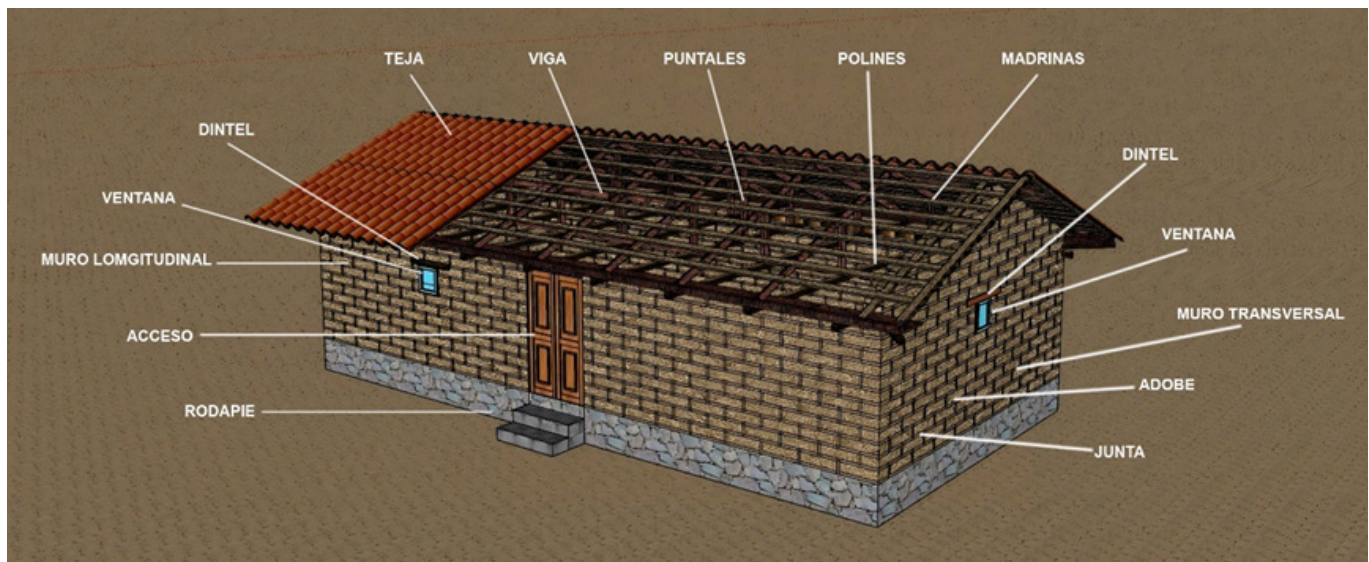


Figura 1. Elementos de la vivienda tradicional de adobe.

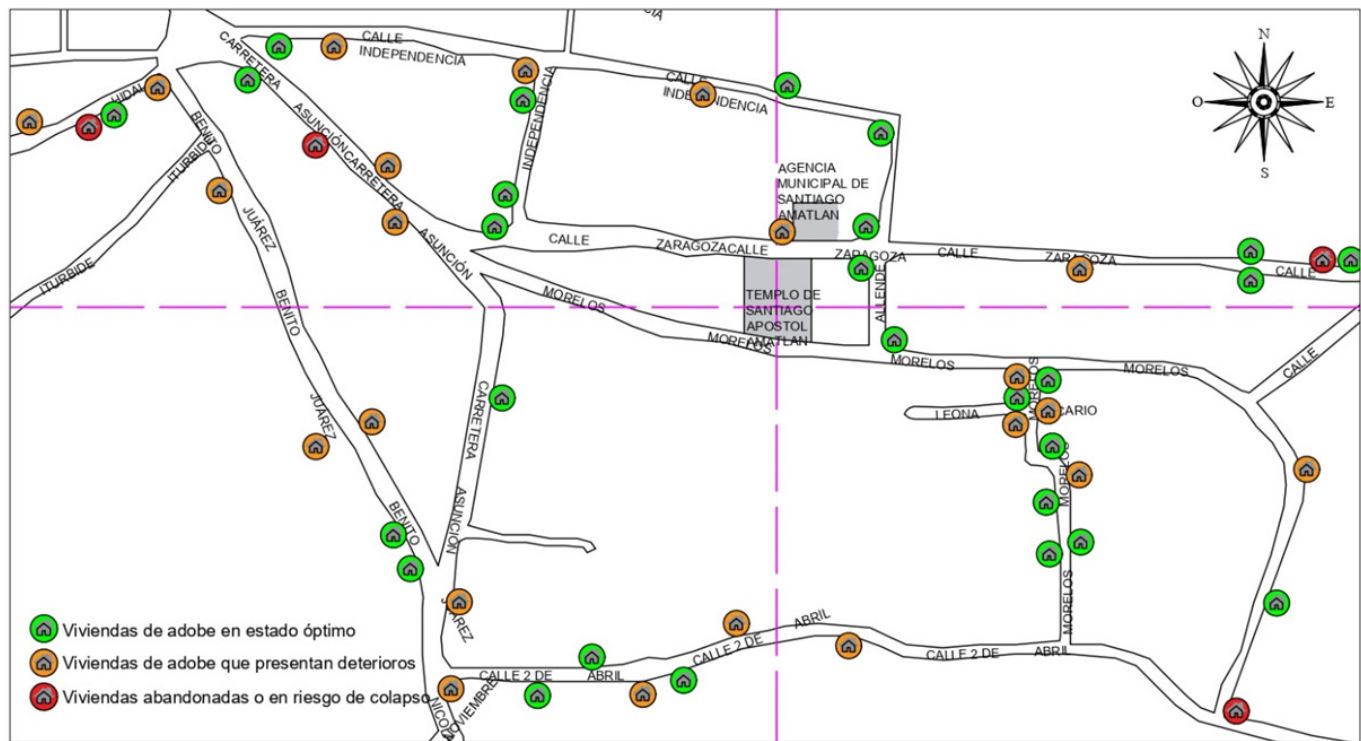


Figura 2. Mapeo de las viviendas y estado actual.

Estadísticas de vivienda

En Santiago Amatlán aproximadamente el 10% de las edificaciones se encuentran en estado de abandono. A través de un conteo directo de viviendas, se identificaron diversos métodos de construcción en la comunidad. Entre los más comunes se encuentran 53 viviendas construidas con adobe, 35 con tabicón, 27 con tabique rojo, 3 con sistemas mixtos, 1 con carrizo y 1 con madera. La mayoría de estas viviendas cuentan con cubiertas de lámina, seguidas por losa maciza y techumbres de tejas de asbesto.

Como se puede observar en la **Figura 3**, el sistema constructivo predominante es el de adobe, representando el 44.1% de las viviendas en la comunidad.

Entrevistas

Se realizaron quince entrevistas a diversos residentes de distintas edades de la comunidad de Santiago Amatlán, Oaxaca, a partir de los 18 años, quienes residen en viviendas de adobe. Estas entrevistas han permitido evidenciar que el material predominante para la construcción en la comunidad es el adobe, con un 44.1% de las viviendas construidas con este material, cuyo conocimiento se transmite de generación en generación.

Las entrevistas también revelaron una problemática: las personas de entre 18 y 30 años expresaron su deseo de cambiar el material de construcción de sus viviendas por tabicón o bloque, mientras que los mayores de 30 años se sienten cómodos con sus viviendas actuales.

Estos resultados son alarmantes, ya que la falta de difusión y promoción de este sistema constructivo podría llevar a la pérdida de su uso en el futuro. Las entrevistas indican que las viviendas fueron construidas por los propios residentes, utilizando la tierra del terreno para su fabricación. Además, se detallaron otros aspectos importantes, como la falta de acceso a servicios sanitarios, la necesidad constante de mantenimiento de las viviendas de adobe y las principales actividades económicas de la comunidad.

Propiedades físicas

La caracterización de las propiedades físicas de la tierra es fundamental en la fabricación de adobe, ya

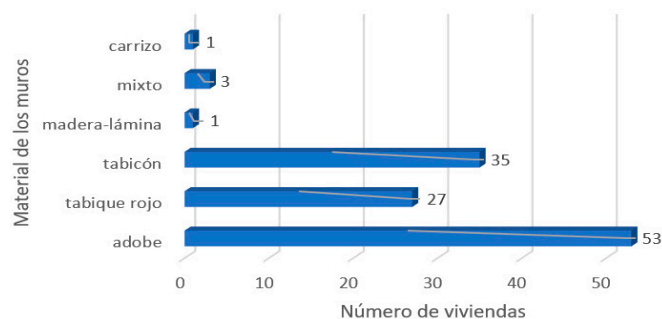


Figura 3. Estadística de materiales en muros.

que garantiza la calidad, resistencia y durabilidad del material, lo cual es esencial para que las construcciones sean seguras y sostenibles.

La presente investigación permitió realizar un mapeo de la ubicación de las viviendas de adobe en Santiago Amatlán, Oaxaca, además de conocer su estado actual y constatar la importancia de promover el uso de este sistema constructivo en la comunidad. Aunque el adobe sigue siendo el material más utilizado, según las estadísticas de la SEDATU, los datos del censo de viviendas y las entrevistas realizadas indican que su uso está en declive y podría desaparecer por completo en el futuro.

Asimismo, se identificó la tipología de vivienda predominante en la comunidad. Se realizó un conteo de las viviendas, registrando los materiales de construcción empleados. Los resultados revelaron que existen 120 viviendas en la localidad, de las cuales el 44.1% están construidas con adobe, el 29% con tabicón y el resto con otros materiales. Finalmente, se llevó a cabo un análisis del estado de conservación de las viviendas de adobe.

Las pruebas de laboratorio realizadas proporcionan una guía valiosa sobre las características del suelo en la zona. Al llevar a cabo las pruebas físicas, se determinó que el material analizado corresponde a una arcilla illita de baja compresibilidad, con un peso volumétrico de 1.185 kg/m^3 y un porcentaje de humedad total de 7.9%.

En cuanto a su densidad, los resultados mostraron un valor de 2.80 g/cm^3 , lo que sugiere que este tipo de adobe, al ser más denso, podría ofrecer ventajas en términos de resistencia. Sin embargo, es necesario considerar su comportamiento térmico y el impacto en el diseño estructural, especialmente en regiones donde el clima y la sismología son factores críticos para la construcción.

Los límites de Atterberg obtenidos, con un límite líquido de 35%, un límite plástico de 16.2%, una contracción lineal de 6.6% y un índice plástico de 18.8%, indican que este adobe tiene una plasticidad moderada (**Figura 4**). Esto sugiere una buena trabajabilidad durante el proceso de moldeado, sin ser demasiado susceptible a deformaciones excesivas cuando se encuentra en estado plástico. El índice plástico moderado (18.8%) refleja una cierta capacidad para soportar cambios de humedad sin perder cohesión, mientras que la contracción lineal relativamente baja (6.6%) indica que el material no se encogerá significativamente al secarse, lo que es ventajoso para evitar fisuras y garantizar estabilidad dimensional.

Según estos resultados, el suelo se clasifica como CL (arcilla de baja plasticidad) bajo el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS). La prueba de granulometría realizada (**Figura 5**) indicó que el material

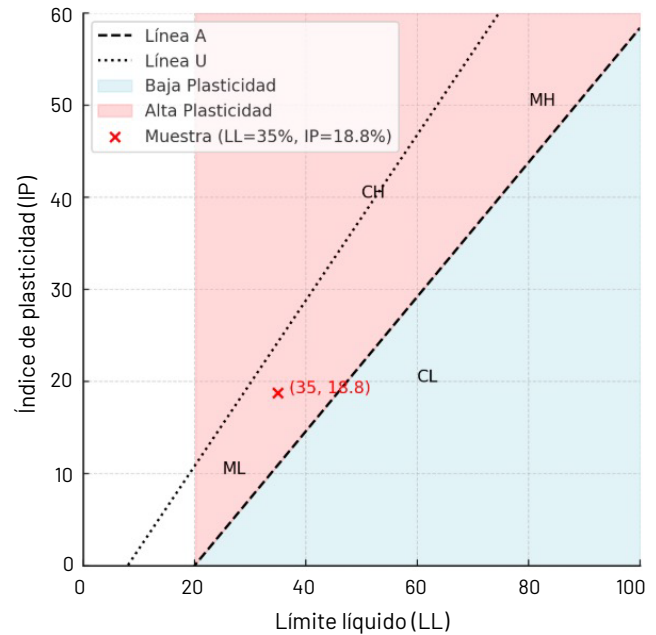


Figura 4. Gráfica de plasticidad de Casagrande.

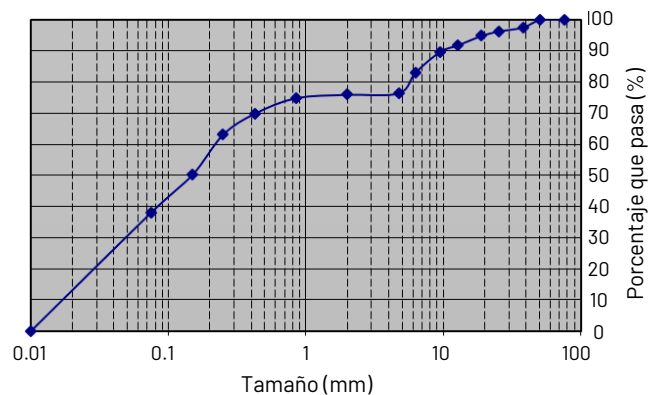


Figura 5. Curva granulométrica.

presenta una distribución de partículas medianamente uniforme. De acuerdo con los criterios establecidos por el SUCS, se observó que menos del 50% del material pasó a través de la malla número 4, lo que clasifica el suelo como un material granular, compuesto predominantemente por limos y arcillas. Esto implica que el adobe presenta una estructura granular que contribuye a su estabilidad mecánica y cohesión, permitiendo una adecuada compactación y resistencia a la compresión, al mismo tiempo que mantiene una buena trabajabilidad durante su fabricación y aplicación.

Discusión

Como mencionan Arroyo *et al.* (2013), es fundamental estudiar las propiedades físicas del suelo, ya que estas

influyen significativamente en las características mecánicas que presentará el bloque. Se considera que un adobe de buena calidad debe tener una densidad entre 1700 kg/m³ y 2000 kg/m³, lo que mejora sus propiedades mecánicas (Escalante y Piñeiros, 2022). En el estudio realizado, los parámetros obtenidos permitieron analizar ciertas características del suelo de la zona. Por ejemplo, el límite plástico (16.2%) indica que el suelo contiene una cantidad moderada de arcillas.

Las pruebas de granulometría y de límites de Atterberg permitieron clasificar el suelo como una arcilla de baja compresibilidad de tipo illita. Esta clasificación se debe a que su estructura laminar no presenta una expansión y contracción significativa en comparación con otros tipos de arcillas. Los resultados de las pruebas de contracción lineal fueron bajos, con un valor de 6.6%, lo que indica que el material es estable y reduce el riesgo de dilataciones, asentamientos o agrietamientos en los bloques.

Dado que en México no existe una normativa específica vigente para este tipo de material, se tomó como referencia la Norma de Diseño y Construcción con Tierra Reforzada E.080 (2017), la cual establece una resistencia mínima a compresión del adobe de 1 MPa. Aunque los resultados muestran una resistencia de 1.05 MPa, la diferencia con el valor requerido es mínima. Este mismo patrón se observa en los valores de resistencia a la flexión.

Al revisar la bibliografía, se observa que autores como Morales-Domínguez *et al.* (2007) han propuesto mejoras en las propiedades del adobe, logrando resistencias a compresión de hasta 10.79 MPa. Aunque las características actuales de nuestro material cumplen con la normativa vigente, lo hacen en un rango mínimo. Por lo tanto, esta investigación deja abierta la posibilidad de mejorar las propiedades del material para hacerlo más resistente y duradero.

Agradecimientos

Los autores agradecen el apoyo del PRONAI 321260 del CONAHCYT, al laboratorio de materiales perteneciente al Instituto Politécnico Nacional, CIIDIR IPN Unidad Oaxaca y al Laboratorio de Materiales “Ing. Luis Silva Ruelas” por todas las facilidades proporcionadas.

Referencias

- Arroyo Matus R, Sánchez Tizapa S, Catalán Quiroz P (2013). Caracterización experimental de las propiedades mecánicas de la mampostería de adobe del sur de México. *Ingeniería* 17(3):167-177. <https://www.redalyc.org/pdf/467/46730914001.pdf>
- ASTM International (2018). Standard test methods for liquid limit, plastic limit, and plasticity index of soils (ASTM D4318-95a).
- ASTM International (2020). Standard test method for sieve analysis of fine and coarse aggregates (ASTM C136/C136M-14).
- ASTM International (2020). Standard test methods for determining the water (moisture) content, ash content, and organic material of peat and other organic soils (ASTM D2974-20e1).
- ASTM International (2021). Standard test method for determination of density and unit weight of soil specimens (ASTM D7263-21).
- Banco Mundial (2022). Informe sobre el desarrollo mundial.
- Consejo Nacional de Evaluación de la Política de Desarrollo Social (2023). Informe Anual Sobre La Situación de Pobreza y Rezago Social.
- Escalante D, Mendoza JLP (2022). Caracterización física y mecánica del adobe del centro histórico de Quito sometido a envejecimiento acelerado. *infoANALÍTICA* 10(2):81-96.
- Guerrero LF, Hastings I (2020). Transference of sustainable preservation techniques for building adobe dwellings in Ixtepec, Oaxaca, Mexico. *Journal of Traditional Building, Architecture and Urbanism* (1):474–484. doi: 10.51303/jtbau.vi1.372
- Morales-Domínguez VJ, Ortiz-Guzmán M, Alavéz-Ramírez R (2007). Mejoramiento de las propiedades mecánicas del adobe compactado. *Naturaleza y Desarrollo* 1:41-48.
- Norma E.080 (2020). Diseño y construcción con tierra reforzada. Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento de Perú. URL:https://procurement-notices.undp.org/view_file.cfm?doc_id=109376
- Sánchez Calvillo A (2022). La vulnerabilidad sísmica de la vivienda vernácula de adobe en México: análisis constructivo y caracterización material para su conservación. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Tesis. URL:https://www.researchgate.net/profile/Adria-Sanchez-Calvillo/publication/365727077_La_vulnerabilidad_sismica_de_la_vivienda_vernacula_de_adobe_en_Mexico_analisis_constructivo_y_caracterizacion_material_para_su_conservacion/links/63803d7448124c2bc669643d/La-vulnerabilidad-sismica-de-la-vivienda-vernacula-de-adobe-en-Mexico-analisis-constructivo-y-caracterizacion-material-para-su-conservacion.pdf



Evaluación termodinámica de un sistema híbrido solar-combustible fósil en la generación de electricidad y agua caliente sanitaria

Thermodynamic evaluation of a solar-fossil fuel hybrid system in the generation of electricity and domestic hot water

Alejandra Belem Mendoza Maldonado*, Luis Felipe Pasillas Villalobos, Víctor M. Ambriz-Díaz, Oscar Chávez, Israel Y. Rosas

Tecnológico Nacional de México/I. T. Chihuahua, Av. Tecnológico, 2909, Chihuahua 31310, Chihuahua, México.

Historial

Manuscrito recibido: 9 de agosto de 2024

Manuscrito aceptado: 4 de noviembre de 2024

Manuscrito publicado: abril 2025

*Autor para correspondencia

Alejandra Belem Mendoza Maldonado

e-mail: alejandra.mendoza.md@gmail.com

Resumen

Este trabajo presenta la evaluación termodinámica de un sistema híbrido solar y combustible fósil. El sistema se compone de un circuito de agua caliente para el aporte de calor solar-fósil, un ORC con recalentamiento para generar electricidad y un circuito de Agua Caliente Sanitaria (ACS). El sistema híbrido fue evaluado y los modelos desarrollados se resolvieron utilizando el software EES. Los resultados indican que el aporte de calor solar logra incrementar la temperatura del circuito de agua caliente en 5 °C, lo que representa un incremento de la viabilidad energética. Además, los resultados se muestran altamente atractivos debido a que el sistema logra una eficiencia global del 62.12%, y un suministro eléctrico y térmico en ACS para 266 y 2078 viviendas, respectivamente.

Palabras clave: Sistema híbrido, solar-fósil, generación de electricidad, agua caliente sanitaria, análisis termodinámico.

Abstract

This work presents the thermodynamic evaluation of a solar-fossil fuel hybrid system. The system is made up of a hot water circuit to supply solar-fossil heat, an ORC with reheating to generate electricity and a domestic hot water (DHW) circuit. The hybrid system was evaluated and the developed models were solved using the EES software. The results indicate that the contribution of solar heat manages to increase the temperature of the hot water circuit by 5 °C, which represents an increase in energy viability. Furthermore, the results are highly attractive because the system achieves an overall efficiency of 62.12%, and an electrical and thermal supply in DHW for 266 and 2078 homes, respectively.

Keywords: Hybrid system, solar-fossil, electricity generation, domestic hot water, thermodynamic analysis.

Introducción

En la actualidad, los combustibles fósiles, son las principales fuentes de energía primaria para la generación de electricidad (Ibrahim *et al.*, 2023). Dentro de las tecnologías principales de generación de energía eléctrica a partir de combustibles fósiles se encuentran las centrales basadas en generación de vapor como lo es el ciclo Rankine, donde para aplicaciones de pequeña escala y baja temperatura el ciclo Rankine Orgánico es el candidato primordial (Aliahmadi *et al.*, 2021). El ciclo Rankine, es el ciclo ideal para las centrales eléctricas de vapor. Sin embargo, existen una serie de modificaciones que permiten mejorar el rendimiento del ciclo Rankine ideal, como por ejemplo el recalentamiento. Mediante este proceso se puede mejorar el rendimiento de la turbina del ciclo. Para ello, el vapor realiza una expansión parcial en la turbina y se introduce nuevamente el vapor

en la caldera para que se recaliente a presión constante. A continuación, vuelve a la turbina (a otra sección de la misma turbina o a otra turbina) y se expande nuevamente (Khaleel *et al.*, 2022).

Por mucho tiempo en el ciclo Rankine de vapor de agua o de fluido orgánico, el calor suministrado ha sido por medio de quema de combustible fósil, pero con el aumento en la contaminación del planeta, el aumento de costos de combustibles y el avance en tecnología de energías renovables se ha conseguido cambiar esta situación, un ejemplo es la utilización de la energía solar (Zhang *et al.*, 2019). En esta dirección, la combinación de la energía solar y los combustibles fósiles como recursos primarios en la generación de energía eléctrica, da origen al concepto de las plantas híbridas de energía (Wang *et al.*, 2019). Mediante este nuevo concepto, se puede mejorar la rentabilidad económica y explorar

el uso de los recursos y las plantas termo-solares. En cuanto al diseño, las plantas solares-combustible fósil se integran por un ciclo de vapor y una tecnología de captación solar, donde se destacan los captadores cilíndricos-parabólicos (Alam *et al.*, 2023). En el modo de operación se apoyan del concepto del ciclo binario, por lo que el ciclo Rankine Orgánico (ORC) juega un papel importante (Al-Sulaiman, 2014).

El hecho de diseñar sistemas híbridos utilizando el ORC, tiene como objetivo principal la producción de electricidad a partir del aprovechamiento de dos fuentes de energía primarias. En el caso del sistema híbrido solar-combustible fósil, la hibridación se fundamenta en la combinación del aprovechamiento de los recursos captados de la energía solar y la energía contenida en algún hidrocarburo. En este sendero, el uso del gas natural ha tenido una gran atracción (Wang *et al.*, 2020). Sin embargo, una parte medular en el diseño de los sistemas híbridos es el desempeño termodinámico del sistema. Por lo tanto, la viabilidad tecnológica de los sistemas híbridos depende en gran medida del rendimiento de los colectores solares y del uso eficiente de la energía que

se logra capturar (Javadi *et al.*, 2020). Es por ello, que, para mejorar el desempeño termodinámico de los sistemas híbridos es preciso integrar otros procesos que mejoren el aprovechamiento de la energía térmica, tal es el caso del Agua Caliente Sanitaria (Fuentes *et al.*, 2018). El aprovechamiento de la energía residual del ORC en aplicaciones de Agua Caliente Sanitaria (ACS), es una aplicación típica del uso directo de calor, y puede ser empleada en viviendas en usos comunes como lavado de platos, ropa, en la ducha, entre otros. Mediante el aprovechamiento de la energía en aplicaciones de ACS, es posible ahorrar combustible, obteniendo el diseño de un sistema híbrido realmente sustentable (Pomianowski *et al.*, 2020). En relación con lo anterior, y con la finalidad de mejorar el desempeño termodinámico de los sistemas híbridos, la comunidad científica ha tomado conciencia y ha realizado esfuerzos en la investigación, evaluación y desarrollo de los sistemas híbridos. **La Tabla 1**, concentra una revisión de la literatura en antecedentes de sistemas híbridos.

La literatura revisada muestra un campo explorado en el análisis de sistemas híbridos en la producción de

Tabla 1. Revisión de antecedentes de sistemas solar-combustible fósil.

Referencia	Descripción y principales hallazgos de la investigación
(Wang <i>et al.</i> , 2019)	Análisis termodinámico con fundamento en la primera ley de la termodinámica de un sistema híbrido solar-combustible fósil en condiciones de trabajo fuera de diseño. Los resultados arrojan una eficiencia óptima del 63.24% y un aporte de calor solar de 133 MWt.
(Vakilabadi <i>et al.</i> , 2019)	Análisis termodinámico de una planta de energía híbrida solar-combustible fósil. Los resultados indican que el 47% de la energía se pierde en el condensador, y la eficiencia máxima del sistema es de 23%.
(Akbari Vakilabadi <i>et al.</i> , 2018)	Análisis termodinámico (energético) de una de planta solar térmica con incorporación de sistema de recuperación de calor. Los resultados muestran un posible incremento en la potencia de salida de 34.01 MW a 34.92 MW.
(Li <i>et al.</i> , 2017)	Evaluación del desempeño termodinámico de una central híbrida solar-combustible fósil. Según los resultados, la máxima entrada de energía solar para el funcionamiento de la caldera se determina en 66,544 kW.
(Peng <i>et al.</i> , 2014)	Rendimiento termodinámico de una planta de energía híbrida solar-combustible fósil en China. Los resultados muestran, una eficiencia máxima del 26.3 % y del 11.5%, en verano e invierno, respectivamente.
(Zhao y Bai, 2014)	Análisis del rendimiento termodinámico de una central térmica híbrida solar-combustible fósil. Los resultados muestran una eficiencia de 39.35%, un incremento de potencia del 6.13% y una reducción de consumo de combustible de 13.14 g/kWh.
(Fontalvo <i>et al.</i> , 2014)	Análisis para plantas de energía híbridas solar-combustibles fósiles. Los resultados muestran que las temperaturas del vapor que alcanzan el mejor rendimiento termodinámico oscilan entre 638.2 y 638.7 K.
(Sheu y Mitsos, 2013)	Optimización termodinámica de una planta híbrida solar-combustible fósil. Los resultados muestran una eficiencia del sistema híbrido del 47.59 %.
(Reddy <i>et al.</i> , 2012)	Evaluación termodinámica de una planta solar térmica de concentradores cilindro parabólicos. Los resultados muestran que la eficiencia energética puede incrementarse en un 1.49% incrementando la presión 15 bar.

energía. Sin embargo, los sistemas híbridos encontrados carecen de la integración del proceso de ACS. Esto ha motivado a los autores de este trabajo a realizar la evaluación termodinámica de un sistema híbrido solar-combustible fósil en la generación de electricidad y producción de ACS, y en consecuencia llenar ese vacío existente en la literatura. Por lo tanto, para lograr el objetivo general de la evaluación termodinámica de un sistema híbrido solar-combustible fósil en la generación de electricidad y agua caliente sanitaria, esta investigación se ha estructurado mediante los siguientes objetivos específicos:

1. Realizar la evaluación termodinámica del sistema híbrido, con la finalidad de estimar la distribución de energía del sistema (balance térmico), productos energéticos del sistema, el potencial ahorro de combustible debido al aporte de calor solar, y el desempeño termodinámico en términos de eficiencia energética logrado por el sistema híbrido solar-combustible fósil.
2. Estimar de acuerdo con la electricidad generada del sistema híbrido, el número de viviendas que podrían ser cubiertas en demanda de electricidad.
3. Estimar mediante una evaluación termodinámica, el calor disponible para ACS y el número de viviendas que podrían ser cubiertas en agua caliente.

Metodología

La **Figura 1**, muestra la metodología implementada en este trabajo. Primeramente, se realiza la descripción y definición del sistema híbrido. Después, se introducen los datos de entrada, y finalmente se realiza el modelado termodinámico del sistema y se obtienen los resultados.

Descripción del sistema híbrido

El sistema híbrido integrado se activa mediante una combinación de energías primarias, en este caso la energía de un combustible fósil y la energía solar captada mediante colectores solares parabólicos (**Figura 2**). El sistema opera en una configuración de ciclo binario, en donde en un primer circuito (estados termodinámicos del 1 a 5) circula agua caliente obtenida a partir del calor suministrado al ciclo mediante la caldera y los colectores solares. Posteriormente, en este primer circuito se cede calor mediante un intercambiador (evaporador) de calor a un ciclo Rankine orgánico que opera con un fluido de trabajo denominado isopentano con la finalidad de generar electricidad. El ciclo Rankine Orgánico opera mediante una configuración de ciclo Rankine con recalentamiento (circuito con estados termodinámicos del 6 al 11). Una vez que el agua caliente del primer circuito cede calor en el intercambiador de calor del ciclo Rankine Orgánico, esta pasa a otro intercambiador

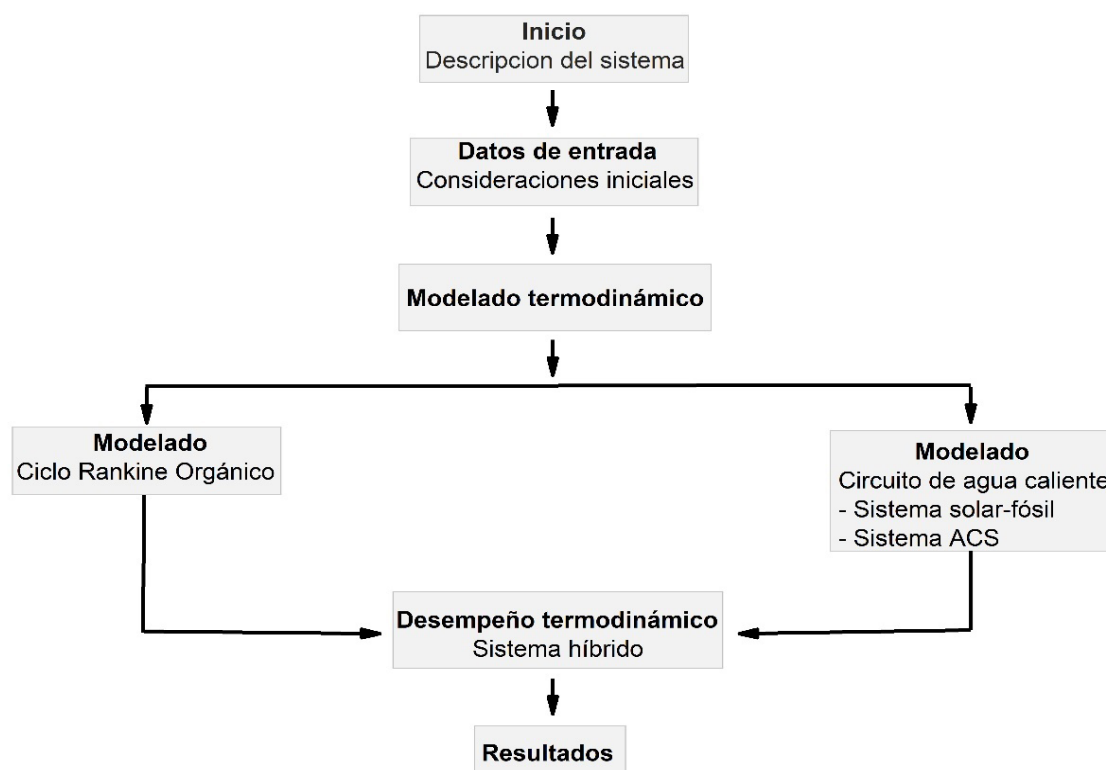


Figura 1. Metodología del presente trabajo.

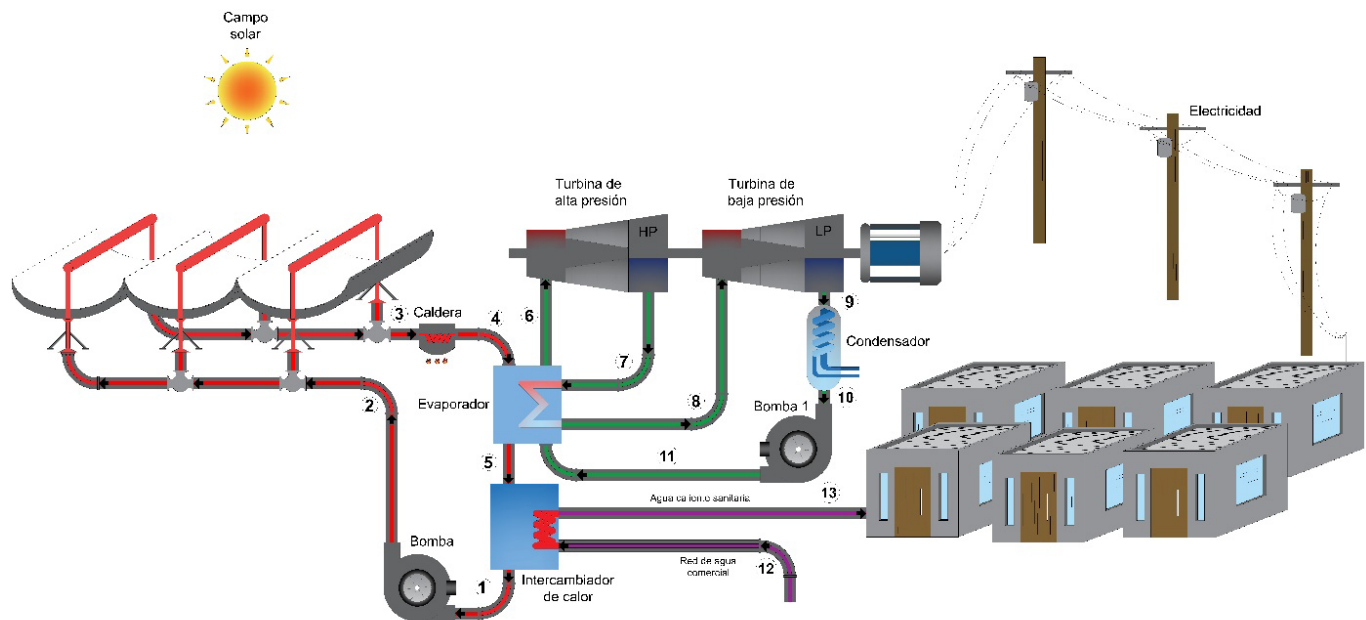


Figura 2. Diagrama del sistema híbrido.

de calor con la finalidad de ceder calor y que este calor sea utilizado en aplicaciones de agua caliente sanitaria y satisfaga la demanda térmica de un conjunto de viviendas. En la etapa de agua caliente sanitaria se tiene a la entrada del intercambiador de calor agua a temperatura ambiente suministrada por la red pública. En el intercambiador, el agua de red aumenta su temperatura hasta la temperatura requerida para suministrar agua caliente sanitaria.

Consideraciones para el modelado termodinámico

A continuación, se presentan las principales suposiciones para el análisis del sistema híbrido solar-combustible fósil (Tocci *et al.*, 2017; Akbari y Mahmoudi, 2014; Ambriz-Díaz *et al.*, 2020):

1. Se considera estado estable y los cambios de energía cinética y potencial son despreciables.
2. La temperatura del estado 4 (entrada del intercambiador 1/evaporador), es de 150 °C y la presión de 800 kPa.
3. El circuito de agua caliente se analiza como líquido incompresible y se considera agua caliente.
4. En la salida del intercambiador de ACS se tiene una temperatura de 100 °C por el lado del circuito de agua caliente.
5. La temperatura del vapor a la entrada de las turbinas, es de 140 °C.
6. La eficiencia de ambas turbinas y bomba es considerada isentrópica.
7. La calidad en el estado 10, es de 0.
8. La potencia neta de las turbinas, es de 100 kW.

9. El calor específico del agua se asume de 4.19 kJ/kg °C.

Modelado termodinámico

El modelo termodinámico del sistema híbrido se ha desarrollado en el software EES. El sistema se analiza mediante la primera ley de la termodinámica, realizando balances de masa y energía en cada componente, y para conocer las condiciones de cada estado y así determinar su comportamiento, Ecuaciones (1) y (2):

$$0 = \dot{Q}_{VC} - \dot{W}_{VC} + \sum_E \dot{m}_i \cdot h_i - \sum_S \dot{m}_i \cdot h_i \quad (1)$$

$$0 = \sum_E \dot{m}_i - \sum_S \dot{m}_i \quad (2)$$

En los casos de líquidos incompresibles, el cambio de energía específica de flujo se modela a partir de la definición de calor específico:

$$C_P = \frac{\Delta h}{\Delta T} \quad (3)$$

Ciclo Rankine Orgánico

Para la potencia neta del ciclo Rankine con recalentamiento, se tiene una capacidad nominal de 100 kW. Esta capacidad nominal es función de la potencia de ambas turbinas y el consumo de potencia de la bomba. La Ecuación (4), define la capacidad nominal del ORC:

$$\dot{W}_{ORC} = \dot{W}_{THP} + \dot{W}_{TLP} - \dot{W}_B \quad (4)$$

Donde la potencia producida por la turbina de alta presión, la potencia generada por la turbina de baja presión y la potencia consumida por la bomba, son determinadas a partir de las Ecuaciones (5), (6) y (7), respectivamente:

$$\dot{W}_{THP} = \dot{m}_{iso} \cdot (h_6 - h_7) \quad (5)$$

$$\dot{W}_{TLP} = \dot{m}_{iso} \cdot (h_8 - h_9) \quad (6)$$

$$\dot{W}_B = \dot{m}_{iso} \cdot (h_{11} - h_{10}) \quad (7)$$

La cantidad de potencia generada por el ORC, depende en su totalidad del flujo másico de isopentano, involucrado en las Ecuaciones (5) - (7). Este flujo másico se evalúa mediante la Ecuación (8):

$$\dot{m}_{iso} = \frac{\dot{W}_{ORC}}{h_6 - h_7 + h_8 - h_9 - h_{11} + h_{10}} \quad (8)$$

Por otra parte, el aporte de calor requerido por el ORC para producir los 100 kW, se determina mediante un balance de energía en el evaporador, Ecuación (9). Además, la fracción de energía térmica encargada de efectuar el recalentamiento, también puede ser determinada en el evaporador mediante la Ecuación (10):

$$\dot{Q}_{EVP} = \dot{m}_{iso} \cdot (h_6 - h_{11}) + \dot{m}_{iso} \cdot (h_8 - h_7) \quad (9)$$

$$\dot{Q}_R = \dot{m}_{iso} \cdot (h_8 - h_7) \quad (10)$$

La energía que requiere disipar el ORC al medio ambiente y lograr operar en su configuración de maquina térmica se define por un balance de energía en el condensador, Ecuación (11):

$$\dot{Q}_{COND} = \dot{m}_{iso} \cdot (h_9 - h_{10}) \quad (11)$$

El desempeño termodinámico del ORC se determina mediante la Ecuación (12):

$$\eta_{ORC} = \left(\frac{\dot{W}_{ORC}}{\dot{Q}_{EVP}} \right) \cdot 100 \quad (12)$$

Circuito de agua caliente

Un parámetro fundamental en el desempeño del sistema híbrido, es el flujo másico del circuito de agua caliente. Este flujo, es posible determinarlo en el evaporador del ORC, Ecuación (13):

$$\dot{m}_{hw} = \frac{\dot{Q}_{EVP}}{C_{p,hw} \cdot (T_4 - T_5)} \quad (13)$$

Aporte de calor solar/fósil

Una vez evaluado el flujo másico del circuito de agua caliente, es posible determinar el aporte de calor solar y el aporte de calor de origen fósil aportado por el boiler/caldera del sistema. Para el aporte de calor solar, en este trabajo se ha establecido un área de colectores de 100 m², y una irradiación solar promedio de 0.6 kW/m² (Bou Lawz Ksayer, 2011). La Ecuación (14), define el aporte de calor solar:

$$\dot{Q}_{Solar} = I_s \cdot A_c \quad (14)$$

El incremento de temperatura del flujo másico de agua caliente, a partir del campo solar, se determina a partir de la Ecuación (15):

$$T_3 = \frac{\dot{Q}_{Solar}}{\dot{m}_{hw} \cdot C_{p,hw}} + T_2 \quad (15)$$

Por otra parte, el aporte de calor por el sistema de combustible fósil, se determina a partir de un balance de energía en el boiler, Ecuación (16). Mientras que el consumo de combustible (gas natural) por parte del boiler se determina mediante la Ecuación (17). El Poder Calorífico Inferior (PCI) del Gas Natural (GN) se ha establecido de acuerdo con (Sukpancharoen y Prasartkaew, 2021):

$$\dot{Q}_{Boiler} = \dot{m}_{hw} \cdot C_{p,hw} \cdot (T_4 - T_3) \quad (16)$$

$$\dot{m}_{GN} = \frac{\dot{Q}_{Boiler}}{PCI} \quad (17)$$

Sistema de agua caliente sanitaria

Para evaluar el calor del sistema de ACS, es necesario

aplicar la primera ley de la termodinámica en el intercambiador de calor que permite la cedencia de energía entre el circuito de agua caliente y el sistema ACS, Ecuación (18):

$$\dot{Q}_{ACS} = \dot{m}_{hw} \cdot C_{P,hw} \cdot (T_5 - T_1) \quad (18)$$

Una vez determinado el $(\dot{Q}_{ACS})$, es necesario establecer el número de viviendas que puede satisfacer dicha cantidad de calor disponible. Para lo anterior, se requiere primeramente estimar el consumo de ACS por vivienda. En este trabajo se ha establecido que dicho valor oscila entre los 120 a 160 Lt/día (Fuentes *et al.*, 2018), por lo que el flujo másico de ACS consumido diariamente por una vivienda se puede estimar a partir de la Ecuación (19):

$$\dot{m}_{ACS} = \rho_{h2o} \cdot \dot{V}_{ACS} \quad (19)$$

Otros parámetros importantes para determinar el número de viviendas, son las temperaturas del agua de la red que se va a calentar y la temperatura deseada del ACS. Para estimar el número de viviendas se ha asumido una temperatura promedio de la red de agua de 25 °C y una temperatura deseada de 80 °C (Wang *et al.*, 2018). Teniendo definidos los parámetros anteriores, el número de viviendas que podría satisfacer el sistema híbrido en ACS, se puede evaluar mediante la Ecuación (20):

$$n_{viviendas} = \frac{\dot{Q}_{ACS}}{\dot{m}_{ACS} \cdot C_{P,h2o} \cdot (T_{13} - T_{12})} \quad (20)$$

Desempeño termodinámico del sistema híbrido

El desempeño termodinámico por primera ley del sistema híbrido depende fundamentalmente de los productos energéticos que tiene el sistema y de los recursos energéticos consumidos para alcanzar dichos productos. La relación recurso-producto, define la eficiencia, Ecuación (21):

$$\eta_s = \left(\frac{\dot{W}_{ORC} + \dot{Q}_{ACS}}{\dot{Q}_{Boiler} + \dot{Q}_{Solar}} \right) \cdot 100 \quad (21)$$

El $(\dot{Q}_{ACS})$ producido por el sistema puede satisfacer un determinado número de viviendas, definido en la Ecuación (19). Mientras que el otro producto, la electricidad producida por el ORC ($\dot{W}_{ORC}$), puede suminis-

trar electricidad a un número aproximado de viviendas. La demanda eléctrica que puede satisfacer, depende del consumo promedio de energía por vivienda (CUE), alrededor de 9 - 12 kWh/día (CFE, 2024), por lo que, el número de viviendas que se puede satisfacer en electricidad depende de la energía diaria generada por el ORC definido en la Ecuación (22), y el consumo unitario en electricidad por vivienda definido en la Ecuación (23):

$$P_E = \dot{W}_{ORC} \cdot \left[24 \frac{kWh}{dia} \right] \quad (22)$$

$$n_{viviendas,E} = \frac{P_E}{C_{UE}} \quad (23)$$

Resultados y discusión

En esta parte, se presentan los resultados y discusión sobre el sistema híbrido solar-combustible fósil. Utilizando las suposiciones establecidas, el sistema ha sido resuelto utilizando la primera ley de la termodinámica e implementando el software EES. Las propiedades termodinámicas del sistema se definen en la **Tabla 2**.

Las propiedades del estado termodinámico 4 (salida de la caldera/boiler) repercuten directamente sobre el rendimiento de los subsistemas del sistema híbrido (ORC, sistema ACS y circuito de agua caliente), en especial la temperatura de dicho estado (temperatura del boiler). Esta temperatura; se encarga de mantener el óptimo funcionamiento del sistema híbrido e influye directamente en la energía térmica que requiere el ORC para

Tabla 2. Propiedades termodinámicas del sistema híbrido.

Estado	h (kJ/kg)	$\dot{m}$ (kg/s)	P (kPa)	S (kJ/kg·K)	T (°C)
1	168.2	2.865	800	0.572	40
2	168.2	2.865	800	0.572	40
3	189.1	2.865	800	0.6383	45
4	632.5	2.865	800	1.842	150
5	419.6	2.865	800	1.306	100
6	184.3	1.123	1256	-0.2661	140
7	169.4	1.123	847.9	-0.2661	127.5
8	198.9	1.123	847.9	-0.1935	140
9	123	1.123	137.5	-0.1935	95.11
10	-322.5	1.123	137.5	-1.6	37
11	-320.6	1.123	1256	-1.6	37.43
12	104.9	3.126	200	0.3669	25
13	335	3.126	200	1.075	80

generar la electricidad. Una variación en la temperatura del boiler no implica un cambio significativo en las potencias del ORC debido a que se está integrando un módulo ORC de 100 kW nominales. Sin embargo, aunque la potencia no tenga cambios significativos, el flujo másico de isopentano que requiere el ORC para generar los 100 kW si se observa influenciado. El flujo másico que requiere el ORC puede variar de 1.08 a 1.57 kg/s en función de la temperatura del boiler. A medida que la temperatura del boiler es mayor, se requiere un menor flujo másico debido a la recepción de energía de mayor calidad termodinámica en el proceso. Esto se puede observar en la **Figura 3**.

La **Figura 4**, muestra una comparativa entre la variación de la temperatura de boiler y las potencias térmicas del evaporador, condensador y recalentador. Se puede apreciar una disminución general de todas las potencias térmicas al elevar la temperatura del boiler como consecuencia de la disminución del flujo másico del ORC. Además, mediante esta **Figura 4**, también se puede destacar que para la configuración de ORC con recalentamiento, el mayor aporte del recalentamiento se origina a una menor temperatura. A una temperatura del boiler de 120 °C, el aporte del recalentador es de alrededor de 700 kW.

Por otra parte, el circuito ORC encargado de mantener un suministro constante de calor para el ORC y el sistema ACS, logra su objetivo gracias a dos principales fuentes de calor: el boiler y los colectores solares. Estas entradas de energía, presentan un comportamiento específico respecto a la temperatura del boiler, si la temperatura aumenta, el flujo de calor necesario entrante por el boiler decrece, pero el flujo de calor captado por los colectores solares se mantiene constante, 60 kW. Esto es debido, por una parte, a que al incrementar la temperatura del boiler se requiere un flujo másico de menor magnitud

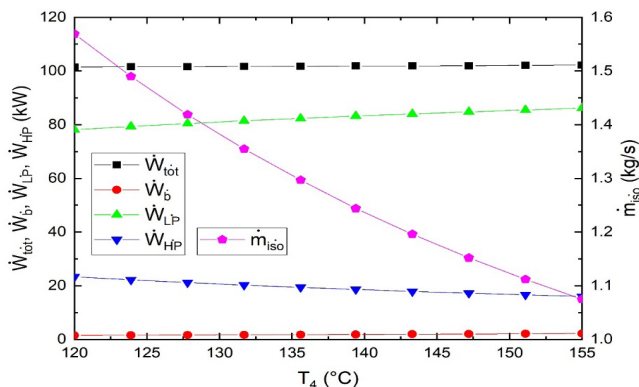


Figura 3. Potencias y flujo de isopentano del ORC en función de la temperatura del boiler.

de agua caliente para activar el ORC de 100 kW, y en consecuencia el flujo de calor del boiler decrece. Por su parte, el calor captado por los colectores se mantiene constante debido a que para el análisis se consideró un área definida de colectores de 100 m² y se analizó para una irradiación fija en una época del año. La **Figura 5**, plasma este comportamiento, donde también se visualiza

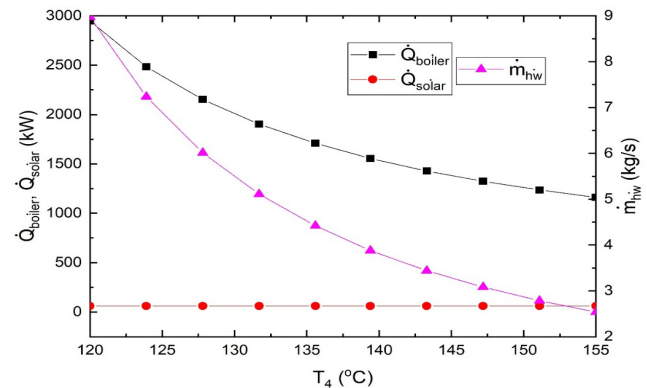


Figura 5. Parámetros del circuito de agua caliente en función de la temperatura del boiler.

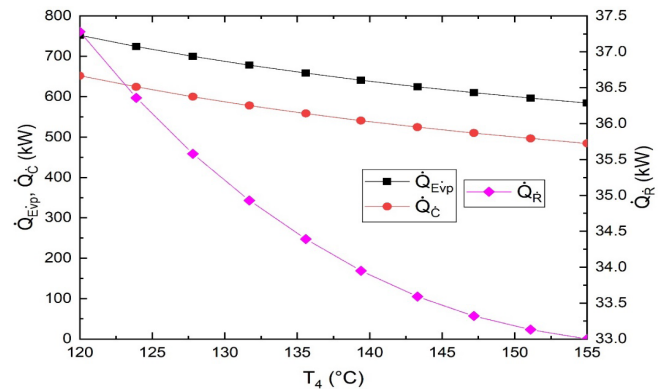


Figura 4. Potencia térmica en componentes del ORC en función de la temperatura del boiler.

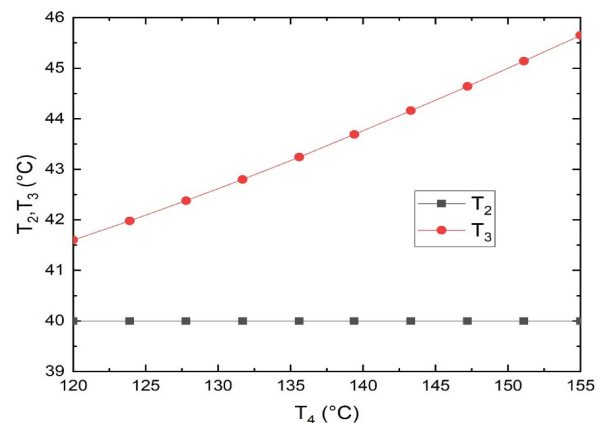


Figura 6. Temperaturas del campo solar en función de la temperatura del boiler.

que entre mayor sea la temperatura en el estado 4, menor será el flujo másico del circuito de agua caliente, entre 2.5 y 9 kg/s.

Para visualizar el efecto del aporte de calor por los colectores solares en el flujo másico del circuito de agua caliente, se presenta la **Figura 6**. En esta dirección, es indispensable evaluar la tendencia de temperaturas de entrada y salida de los colectores, previas al suministro de calor de estos elementos, en función de las posibles variaciones de la temperatura del boiler. La temperatura del boiler, no provocará ningún efecto sobre la temperatura de entrada de los colectores, y esto es debido a que la temperatura de salida del intercambiador de ACS se mantiene constante, y esta temperatura prácticamente es la temperatura de entrada de los colectores. Mientras que, por otro lado, la temperatura que el flujo másico de agua caliente alcanzada a la salida de los colectores solares, sí se observa incrementada. Este incremento se observa en un rango desde 41.56 °C hasta 45.56 °C, en función de un incremento de la temperatura del boiler de 35 °C.

Uno de los productos del sistema híbrido es el ACS, este producto puede ser función de la temperatura del boiler. La manera de cuantificar este producto es a través de la potencia térmica que se tiene disponible para ACS, y en función de esta potencia estimar el número de viviendas que puede ser cubierto en ACS. En esta dirección, se puede apreciar un fuerte impacto en el número de viviendas y la potencia térmica del ACS al realizar una variación de la temperatura del boiler como lo muestra la **Figura 7**. Al elevar la temperatura del boiler se produce una menor potencia térmica del ACS debido a la disminución del flujo másico del boiler. Como consecuencia, al reducir potencia térmica del ACS el número de viviendas se ve afectado de igual forma. El número de viviendas puede variar desde aproximadamente 6,500 hasta 2078, para una temperatura del boiler de entre 120 hasta 155 °C, respectivamente.

Debido a que se trata de un sistema híbrido con consumo de combustible fósil, un importante factor es el consumo de gas natural, este es indispensable para la incorporación del boiler y activar el sistema. En la **Figura 8**, se muestra cómo esta cantidad de gas natural decrece de 0.06 a 0.024 kg/s, si la temperatura a la salida del boiler se aumenta. Este comportamiento se presenta por la disminución de aporte de calor por parte del boiler (de 2,947 a 1,162 kW), y que es función del flujo másico de agua caliente requerido por el ORC. A mayor temperatura del boiler, el ORC requiere un menor flujo másico de agua caliente y es por ello la disminución del consumo de calor y combustible por parte del boiler.

Finalmente, la **Figura 9**, muestra el desempeño termodinámico del sistema híbrido y del ciclo ORC operando de manera individual. Se puede apreciar que, a medida que se incrementa la temperatura del boiler la eficiencia del ORC se incrementa, este incremento de eficiencia oscila alrededor del 3.81%. Por su parte, la

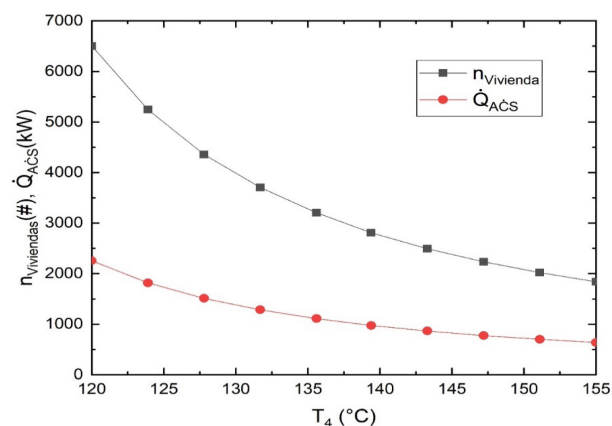


Figura 7. Parámetros del sistema de ACS en función de la temperatura del boiler.

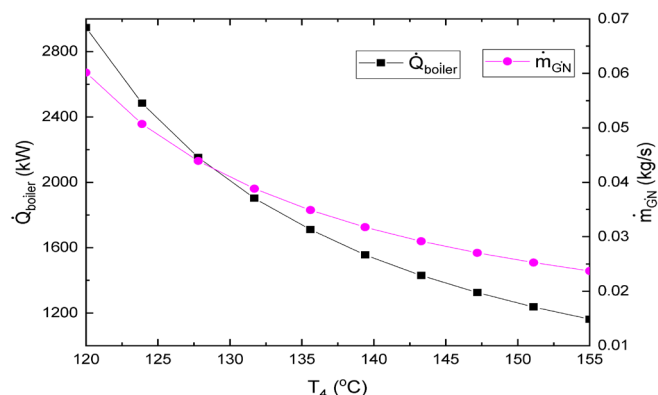


Figura 8. Aporte de potencia calorífica y consumo de GN en el boiler.

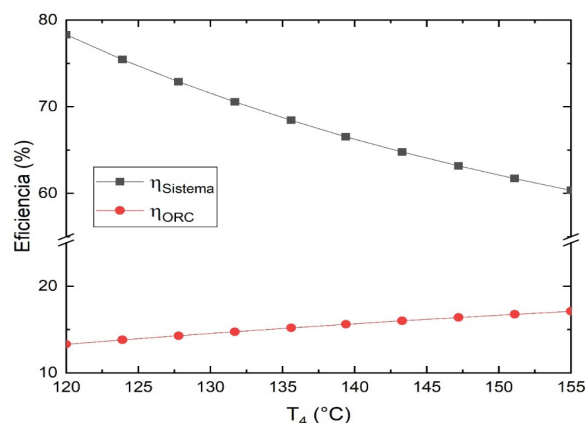


Figura 9. Eficiencia del sistema híbrido y del ORC en función de la temperatura del boiler.

eficiencia del sistema se observa disminuida a medida que, se incrementa la temperatura del boiler. Esta disminución en la eficiencia es debida a que a medida que la temperatura del boiler se incrementa, se reduce el flujo másico de agua caliente del circuito de agua caliente, y esto tiene como consecuencia una menor producción de ACS. Al tener una menor producción de ACS, se disminuyen los productos energéticos del sistema híbrido, lo que se traduce en una reducción en la eficiencia energética del sistema total.

Conclusiones

En este trabajo se presentó la evaluación termodinámica de un sistema híbrido solar-combustible fósil para la generación de electricidad y agua caliente sanitaria. La evaluación ha resultado altamente atractiva desde el punto de vista energético, por una parte, el ciclo Rankine orgánico puede lograr la producción de 100 kW netos, de los cuales 16.78 kW se producen en la turbina de alta presión y 85.3 kW se obtienen a partir de la turbina de baja presión, convirtiendo esta potencia neta a energía, se puede satisfacer la demanda eléctrica de al menos 267 viviendas. Además, el ORC, resulta altamente eficiente debido a su temperatura de activación y a la configuración de operación en recalentamiento. La eficiencia lograda por el ORC operando de manera independiente puede llegar al 16.66%, lo que es atractivo para ciclos de estas características.

Por otro lado, el sistema de agua caliente sanitaria ha permitido incrementar el uso de la energía primaria del sistema, logrando que el sistema híbrido solar-fósil alcance una eficiencia combinada de calor-electricidad del 62.12%, donde el sistema ACS puede aprovechar 720.4 kW lo que representa el suministro de agua caliente sanitaria para 2078 viviendas. En recopilación, la configuración de sistema híbrido-solar ha permitido un incremento en los productos del sistema, y el campo solar logra un ahorro de combustible de hasta 4.4 kg/h de gas natural debido a la energía térmica captada a través de los colectores, presentando como resultado un incremento de la rentabilidad energética del sistema.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido desarrollado en el marco de los proyectos de Investigación Científica, Desarrollo Tecnológico e Innovación del Instituto Tecnológico Nacional de México (TecNM)-Proyecto: 19424.24-P. Los autores agradecen el apoyo para la realización de esta investigación.

Referencias

- Akbari AD, Mahmoudi SMS (2014). Thermoeconomic analysis & optimization of the combined supercritical CO₂ (carbon dioxide) recompression Brayton/organic Rankine cycle. *Energy* 78:501–512. doi:10.1016/j.energy.2014.10.037
- Akbari Vakilabadi M, Bidi M, Najafi AF (2018). Energy, Exergy analysis and optimization of solar thermal power plant with adding heat and water recovery system. *Energy Conversion and Management* 171:1639–1650. doi:10.1016/j.enconman.2018.06.094
- Alam MI, Nuhash MM, Zihad A, Nakib TH, Ehsan MM (2023). Conventional and Emerging CSP Technologies and Design Modifications: Research Status and Recent Advancements. In *International Journal of Thermofluids* (Vol. 20). Elsevier B.V. doi:10.1016/j.ijft.2023.100406
- Aliahmadi M, Moosavi A, Sadrhosseini H (2021). Multi-objective optimization of regenerative ORC system integrated with thermoelectric generators for low-temperature waste heat recovery. *Energy Reports* 7:300–313. doi:10.1016/j.egy.2020.12.035
- Al-Sulaiman FA (2014). Exergy analysis of parabolic trough solar collectors integrated with combined steam and organic Rankine cycles. *Energy Conversion and Management* 77:441–449. doi:10.1016/j.enconman.2013.10.013
- Ambriz-Díaz VM, Rubio-Maya C, Ruiz-Casanova E, Martínez-Patiño J, Pastor-Martínez E (2020). Advanced exergy and exergoeconomic analysis for a polygeneration plant operating in geothermal cascade. *Energy Conversion and Management* 203. doi:10.1016/j.enconman.2019.112227
- Bou Laww Ksayer E (2011). Design of an ORC system operating with solar heat and producing sanitary hot water. *Energy Procedia* 6:389–395. doi:10.1016/j.egypro.2011.05.045
- CFE (2024). *Cuántos kwh por día es normal*. <https://recibodeluzcfe.mx/blog/cuantos-kwh-por-dia-es-normal/>
- Fontalvo A, García J, Sanjuan M, Padilla RV (2014). Automatic control strategies for hybrid solar-fossil fuel power plants. *Renewable Energy* 62:424–431. doi:10.1016/j.renene.2013.07.034
- Fuentes E, Arce L, Salom J (2018). A review of domestic hot water consumption profiles for application in systems and buildings energy performance analysis. In *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (Vol. 81, pp. 1530–1547). Elsevier Ltd. doi:10.1016/j.rser.2017.05.229
- Ibrahim HA, Ayomoh MK, Bansal RC, Gitau MN, Yadavalli VSS, Naidoo R (2023). Sustainability of power generation for developing economies: A systematic review of power sources mix. In *Energy Strategy Reviews* (Vol. 47). Elsevier Ltd. doi:10.1016/j.esr.2023.101085
- Javadi FS, Metselaar HSC, Ganesan P (2020). Performance improvement of solar thermal systems integrated with phase change materials (PCM), a review. In *Solar Energy* (Vol. 206, pp. 330–352). Elsevier Ltd. doi:10.1016/j.solener.2020.05.106

Khaleel OJ, Basim Ismail F, Khalil Ibrahim T, bin Abu Hassan SH (2022). Energy and exergy analysis of the steam power plants: A comprehensive review on the Classification, Development, Improvements, and configurations. In *Ain Shams Engineering Journal* (Vol. 13, Issue 3). Ain Shams University. doi:10.1016/j.asej.2021.11.009

Li J, Wu Z, Zeng K, Flamant G, Ding A, Wang J (2017). Safety and efficiency assessment of a solar-aided coal-fired power plant. *Energy Conversion and Management* 150:714–724. doi:10.1016/j.enconman.2017.08.049

Peng S, Hong H, Wang Y, Wang Z, Jin H (2014). Off-design thermodynamic performances on typical days of a 330MW solar aided coal-fired power plant in China. *Applied Energy* 130:500–509. doi:10.1016/j.apenergy.2014.01.096

Pomianowski MZ, Johra H, Marszal-Pomianowska A, Zhang C (2020). Sustainable and energy-efficient domestic hot water systems: A review. In *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (Vol. 128). Elsevier Ltd. doi:10.1016/j.rser.2020.109900

Reddy VS, Kaushik SC, Tyagi SK (2012). Exergetic analysis and performance evaluation of parabolic trough concentrating solar thermal power plant (PTCSTPP). *Energy* 39(1):258–273. doi:10.1016/j.energy.2012.01.023

Sheu EJ, Mitsos A (2013). Optimization of a hybrid solar-fossil fuel plant: Solar steam reforming of methane in a combined cycle. *Energy* 51:193–202. doi:10.1016/j.energy.2013.01.027

Sukpancharoen S, Prasartkaew B (2021). Combined heat and power plant using a multi-objective Henry gas solubility optimization algorithm: A thermodynamic investigation of energy, exergy, and economic (3E) analysis. *Heliyon* 7(9). doi:10.1016/j.heliyon.2021.e08003

Tocci L, Pal T, Pesmazoglou I, Franchetti B (2017). Small scale Organic Rankine Cycle (ORC): A techno-economic review. In *Energies* (Vol. 10, Issue 4). MDPI AG. doi:10.3390/en10040413

Vakilabadi MA, Bidi M, Najafi AF, Ahmadi MH (2019). Exergy analysis of a hybrid solar-fossil fuel power plant. *Energy Science and Engineering* 7(1):146–161. doi:10.1002/ese3.265

Wang J, Duan L, Yang Y, Pang L, Yang L (2019). Multi-objective optimization of solar-aided coal-fired power generation system under off-design work conditions. *Energy Science and Engineering* 7(2):379–398. doi:10.1002/ese3.280

Wang J, Duan L, Yang Y, Yang Z, Yang L (2019). Study on the general system integration optimization method of the solar aided coal-fired power generation system. *Energy* 169:660–673. doi:10.1016/j.energy.2018.12.054

Wang J, Han Z, Guan Z (2020). Hybrid solar-assisted combined cooling, heating, and power systems: A review. In *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (Vol. 133). Elsevier Ltd. doi:10.1016/j.rser.2020.110256

Wang J, Xie X, Lu Y, Liu B, Li X (2018). Thermodynamic performance

analysis and comparison of a combined cooling heating and power system integrated with two types of thermal energy storage. *Applied Energy* 219:114–122. doi:10.1016/j.apenergy.2018.03.029

Zhang N, Hou H, Yu G, Hu E, Duan L, Zhao J (2019). Simulated performance analysis of a solar aided power generation plant in fuel saving operation mode. *Energy* 166:918–928. doi:10.1016/j.energy.2018.10.014

Zhao H, Bai Y (2014). Thermodynamic performance analysis of the coal-fired power plant with solar thermal utilizations. *International Journal of Energy Research* 38(11):1446–1456. doi:10.1002/er.3166

Nomenclatura

Símbolos

A_C	Área de colectores solares, m ²
C_p	Calor específico a presión constante, kJ/kg-K
C_{UE}	Consumo específico de electricidad, kWh/día
$\dot{m}$	Flujo másico, kg/s
h	Entalpía específica, kJ/kg
I_s	Irradiación solar, kW/m ²
PCI	Poder Calorífico inferior, kJ/kg-k
P_E	Energía eléctrica, kWh
$\dot{Q}$	Tasa de calor, kW
T	Temperatura, °C
$\dot{V}$	Caudal, m ³ /s
$\dot{W}$	Potencia, kW

Símbolos griegos

Δ	Diferencia, -
η	Eficiencia, %
ρ	Densidad, kg/m ³

Subíndices

1,...13, i	Estados termodinámicos
ACS	Agua Caliente Sanitaria
B	Bomba
$COND$	Condensador
E	Electricidad
EVP	Evaporador
GN	Gas natural
hw	Agua caliente
iso	Isopentano
ORC	Ciclo Rankine Orgánico

<i>R</i>	Recalentamiento
<i>S</i>	Sistema
<i>THP</i>	Turbina de alta presión
<i>TLP</i>	Turbina de baja presión
<i>VC</i>	Volumen de control



Análisis termodinámico de un sistema de cogeneración de electricidad y calor de agua caliente sanitaria utilizando un motor de combustión interna y un ciclo Rankine orgánico

Thermodynamic analysis of a domestic hot water and electricity cogeneration system using an internal combustion engine and an organic Rankine cycle

Luis Felipe Pasillas Villalobos*, Alejandra Belem Mendoza Maldonado, Víctor M. Ambriz Díaz, Oscar Chávez, Israel Y. Rosas

Tecnológico Nacional de México/I. T. Chihuahua, Av. Tecnológico, 2909, Chihuahua 31310, Chihuahua, México.

Historial

Manuscrito recibido: 9 de agosto de 2024

Manuscrito aceptado: 9 de noviembre de 2024

Manuscrito publicado: abril 2025

*Autor para correspondencia

Luis Felipe Pasillas Villalobos

e-mail: felipe.pasillas.v@gmail.com

Resumen

Este trabajo presenta un análisis termodinámico de un sistema de cogeneración con capacidad de generar electricidad y calor de Agua Caliente Sanitaria (ACS). El sistema está integrado por un motor Diesel, un ORC acoplado en la recuperación de los gases de escape y un sistema ACS acoplado en la recuperación de calor del radiador. Para evaluar la viabilidad termodinámica del sistema, se establecen los modelos de masa y energía en función de la primera ley de la termodinámica. Los resultados indican un incremento en la eficiencia eléctrica total del sistema de 2.75% a partir del uso del calor residual contenido en los gases de escape del motor para activar el ORC y una potencia total de 1,079.58 kW. La energía eléctrica generada puede satisfacer la demanda de 2,879 viviendas, mientras que la energía térmica puede suministrar agua caliente a 1,846 viviendas.

Palabras clave: Análisis termodinámico, sistema de cogeneración, motor de combustión interna, ciclo Rankine orgánico, agua caliente sanitaria.

Abstract

This work presents a thermodynamic analysis of a cogeneration system with the capacity to generate electricity and DHW (domestic hot water). The system is integrated by a Diesel engine, an ORC coupled to the exhaust gas recovery and an DHW system coupled to the radiator heat recovery. To evaluate the thermodynamic viability of the system, the mass and energy models are established based on the first law of thermodynamics. The results indicate an increase in the total electrical efficiency of the system of 2.75% from the use of waste heat contained in the engine exhaust gases to activate the ORC and a total power of 1,079.58 kW. The electrical energy generated can meet the demand of 2,879 homes, while the thermal energy can supply hot water to 1,846 homes.

Keywords: Thermodynamic analysis, cogeneration system, internal combustion engine, organic Rankine cycle, domestic hot water.

Introducción

La propuesta de establecer sistemas de energía más sustentables y eficientes está en constante crecimiento. En este sendero, los sistemas de cogeneración pretenden aprovechar de manera eficiente los recursos combustibles, proporcionando de manera innovadora servicios energéticos como la electricidad y el calor (Isa *et al.*, 2018). Un sistema de cogeneración, se compone básicamente por una tecnología principal de generación de electricidad que opera con calor obtenido de la quema de algún combustible fósil, y tecnologías secundarias de recuperación de calor. Entre las tecnologías principales, se distinguen los motores de combustión interna y las

turbinas de gas, siendo los motores de combustión interna una de las tecnologías más implementadas, por su bajo costo y gran disponibilidad de operación (Parsa y Neshat, 2022). Mientras que, en las tecnologías de recuperación de calor, se pueden encontrar desde ciclos Rankine operando con fluidos orgánicos (ORC) o tecnologías de uso directo de calor, tal es el caso del uso del calor en aplicaciones de Agua Caliente Sanitaria (ACS) (Abed *et al.*, 2013; Leal-Chávez *et al.*, 2019).

Si bien, aunque la cogeneración es una metodología eficiente de la recuperación de calor residual de los sistemas térmicos, no es un concepto reciente (Ganesh y Omprakash, 2022). En la actualidad, aún existen ciertas

limitantes científicas y tecnológicas sobre la evaluación e integración teórica y práctica de las tecnologías de recuperación de calor en los sistemas de cogeneración. Es por ello, que la comunidad científica aún continúa investigando dichos sistemas desde la perspectiva termodinámica, con la finalidad de obtener la más alta eficiencia de los sistemas de cogeneración (CHP; por sus siglas en inglés) en relación con los beneficios que se pueden obtener en términos de ahorro de combustible, integración de tecnologías primarias y secundarias, y la obtención de productos energéticos (Barelli *et al.*, 2011). En relación con la evaluación termodinámica de los sistemas de cogeneración utilizando motores de combustión interna y ciclos Rankine orgánicos, existen muchas investigaciones disponibles en la literatura. Por ejemplo, Neto *et al.* (2021), realizaron una evaluación termodinámica de un sistema ORC para la recuperación de calor residual de un motor de combustión interna (MCI). La evaluación la establecen en términos de la primera ley de la termodinámica, y en consecuencia obtienen los modelos de diseño y fuera de diseño del sistema de cogeneración, con la finalidad de simular la operación del sistema en la recuperación de calor. Los resultados indicaron, bajo diferentes condiciones de análisis, una producción de potencia del ORC mínima, media y máxima de 8.5, 15.59 y 26.29 kW, respectivamente. Mediante la obtención de productos energéticos, la investigación demuestra la viabilidad energética de recuperar el calor residual mediante la tecnología ORC.

En la misma dirección, Mohammadkhani y Yari (2019), realizaron un análisis termodinámico para la simulación de la recuperación de calor de los gases de escape y refrigerante de un motor diésel mediante un ORC. El análisis termodinámico se establece en función de la primera ley de la termodinámica, y se analizan en detalle las distribuciones de temperatura del sistema empleando diferentes fluidos de trabajo para lograr los mejores resultados. Los resultados muestran que la potencia neta producida del ORC es de 24.93 kW, lo que equivale al 25 % de la potencia de frenado del motor. Mansoury *et al.* (2018), realizaron la evaluación energética (evaluación termodinámica) de un ORC de dos etapas activado con los gases de escape de un MCI. Se lleva a cabo un análisis térmico utilizando la primera ley de la termodinámica, para simular el rendimiento del ORC utilizando el software Engineering Equation Solver (EES). Los resultados obtenidos muestran que acoplar el ORC al MCI mejora la eficiencia de conversión de combustible del sistema global (sistema de cogeneración). Se determina que la potencia neta producida por el ORC puede alcanzar los 35 kW, en las óptimas condiciones de funciona-

miento. Seyedkavoosi *et al.* (2017), realizaron un modelado termodinámico integral de una nueva configuración para recuperar el calor residual del fluido refrigerante y de los gases de escape de un MCI e incorporaron un ORC como tecnología candidata de recuperación de calor operando con los fluidos de trabajo R-123 y R-134a. Los resultados muestran que el ORC puede alcanzar una potencia neta de 468 kW, optimizando parámetros de diseño. Khaljani *et al.* (2016), evaluaron un ciclo de cogeneración basado en la recuperación de calor de un motor y dos ORC. Los resultados del estudio revelan que aumentar la diferencia de temperatura del evaporador y la temperatura del condensador de los ORC, conduce a una reducción de la eficiencia. Sin embargo, los resultados muestran una producción de potencia de los ORC de 9.4 y 6.3 kW, respectivamente.

Açikkalp *et al.* (2014), presentaron una evaluación mediante un enfoque termodinámico para una posible mejora del sistema de cogeneración de Eskisehir, Turquía. El sistema genera aproximadamente 5,900 kW de energía eléctrica mediante un MCI y 4,300 kW de energía térmica utilizada para satisfacer las demandas de una fábrica. Los resultados muestran que la cámara de combustión y el condensador presentan un área de oportunidad para mejorar el desempeño del sistema. Srinivasan *et al.* (2010), presentaron un análisis de un sistema con recuperación del calor residual de los gases de escape de un MCI de baja temperatura y un ORC. A partir del análisis, se identificó como un parámetro de diseño importante la efectividad del intercambiador de calor ORC (evaporador). Los resultados muestran que el sistema puede producir una potencia superior a los 13 kW, entre el motor y el ORC combinados. Daghigh y Shafieian (2016), realizaron una investigación sobre la recuperación de calor de motores diésel submarinos para sistemas combinados de energía térmica y electricidad. La electricidad se genera a partir de una tecnología ORC y la energía térmica obtenida se plantea con fines de almacenamiento de ACS. Los resultados muestran una potencia de salida del ORC de 53 kW. Ebrahimi-Moghadam *et al.* (2020), presentaron un estudio paramétrico integral para evaluar desde el punto de vista energético una propuesta y evaluación de un nuevo sistema de cogeneración de calor-electricidad. El sistema propuesto lo integran con una turbina de gas y un ciclo Kalina. Las ecuaciones que rigen el sistema las resuelven y validan mediante el desarrollo de un código computacional de alta precisión en el software EES, y obtienen mediante sus resultados una eficiencia del sistema de cogeneración del 69.43%.

De acuerdo con la literatura revisada, es bien sabi-

do que la generación combinada de calor y electricidad (cogeneración) permite aprovechar la energía del combustible de manera más eficiente que en la generación separada de electricidad y calor. También de acuerdo con estos antecedentes, se puede destacar que existe un campo de investigación muy explorado de los sistemas de cogeneración implementando motores de combustión interna y la tecnología de ORC para la recuperación de los gases de escape y el calor del fluido refrigerante del motor. Sin embargo, existe un vacío en cuanto al análisis termodinámico de sistemas de cogeneración integrados con motores de combustión interna, ORC, y en específico, con la recuperación de energía del motor para aplicaciones de ACS. Solamente, los trabajos de Daghigh y Shafieian (2016) y Ebrahimi-Moghadam *et al.* (2020), se enfocan en la recuperación de energía térmica de ACS, sin embargo, los sistemas de cogeneración son diferentes debido a que utilizan diferentes tecnologías primarias del sistema como lo son las turbinas de gas y diferentes metodologías de recuperación de calor para la obtención de ACS. Por lo anterior, este trabajo tiene por objetivo realizar un análisis termodinámico de un sistema de cogeneración de electricidad y calor de ACS utilizando un MCI y un ORC, pretendiendo llenar ese vacío existente en la literatura y obtener nuevos senderos para el uso eficiente de la energía. En este contexto, con la motivación de analizar el sistema de cogeneración propuesto, se plantean como objetivos específicos y de determinación de la viabilidad termodinámica del sistema: 1) Realizar el análisis termodinámico para obtener el balance térmico del sistema de cogeneración, desempeño termodinámico y distribuciones de energía, 2) Establecer mediante la generación de electricidad, la demanda eléctrica que podría cubrirse en número de viviendas y, 3) Determinar mediante la recuperación de calor, la magnitud de energía térmica que podría aprovecharse en aplicaciones ACS y el número de viviendas al que se le podría suministrar ACS.

Metodología

La metodología implementada en la presente investigación consiste en la descripción de la propuesta del sistema de cogeneración, la presentación de los modelos termodinámicos utilizados para el modelado del sistema, incluyendo los datos de partida, así como los modelos establecidos para el motor Diesel, el ciclo Rankine orgánico y el circuito de agua caliente. Finalmente, se presentan los resultados obtenidos a partir de la resolución de los modelos termodinámicos utilizando el software EES.

Descripción de la integración del sistema de cogeneración

El sistema de cogeneración contempla un motor de combustión interna Diesel del fabricante Caterpillar de la serie D1000, el cual brinda una potencia nominal de 1000 kW (CAT, 2024). En dicho sistema se plantea utilizar la energía contenida en los gases que libera el motor para poder activar un ORC, el cual opera con isopentano como fluido de trabajo (estados termodinámicos 5-8 de la **Figura 1**). La recuperación de los gases de escape del motor (estados termodinámicos 3-4 de la **Figura 1**), se plantea con la finalidad de generar nuevamente electricidad mediante una energía de deshecho que no se contempla como producto en los procesos tradicionales de generación de energía eléctrica. Por otra parte, la energía disipada a través de las camisas de enfriamiento (radiador) y postenfriador del motor, se contempla aprovecharlas y tener un producto de calor útil para su aplicación en agua caliente sanitaria para viviendas. La **Figura 1**, muestra el diagrama generalizado del sistema de producción combinada de calor y electricidad.

Modelado termodinámico

Consideraciones y datos de entrada

Para el desarrollo del modelado termodinámico se ha realizado las siguientes suposiciones principales (Zhang *et al.*, 2020; Dibazar *et al.*, 2020):

- Se considera que todos los procesos se efectúan en estado estable.
- Se desprecian las pérdidas de presión en tuberías y equipos intercambiadores de calor.
- Se desprecian los efectos de la gravedad y la energía cinética.
- La condición ambiental se define a una temperatura de 298 K.

Consideraciones para el motor Diesel

- Las consideraciones utilizadas en el modelo termodinámico del motor Diesel se presentan a continuación (Sanchez *et al.*, 2024; Caton, 2018):
- Se considera el Poder Calorífico inferior del Diesel (PCI) en 43,000 kJ/kg.
- Se asume un valor para la densidad del combustible Diesel de 850 kg/m³.
- La temperatura del radiador se considera entre 85 y 95 °C.

Para los gases de escape del motor, de acuerdo con Shankar y Sebastian (2014), se considera que todos los

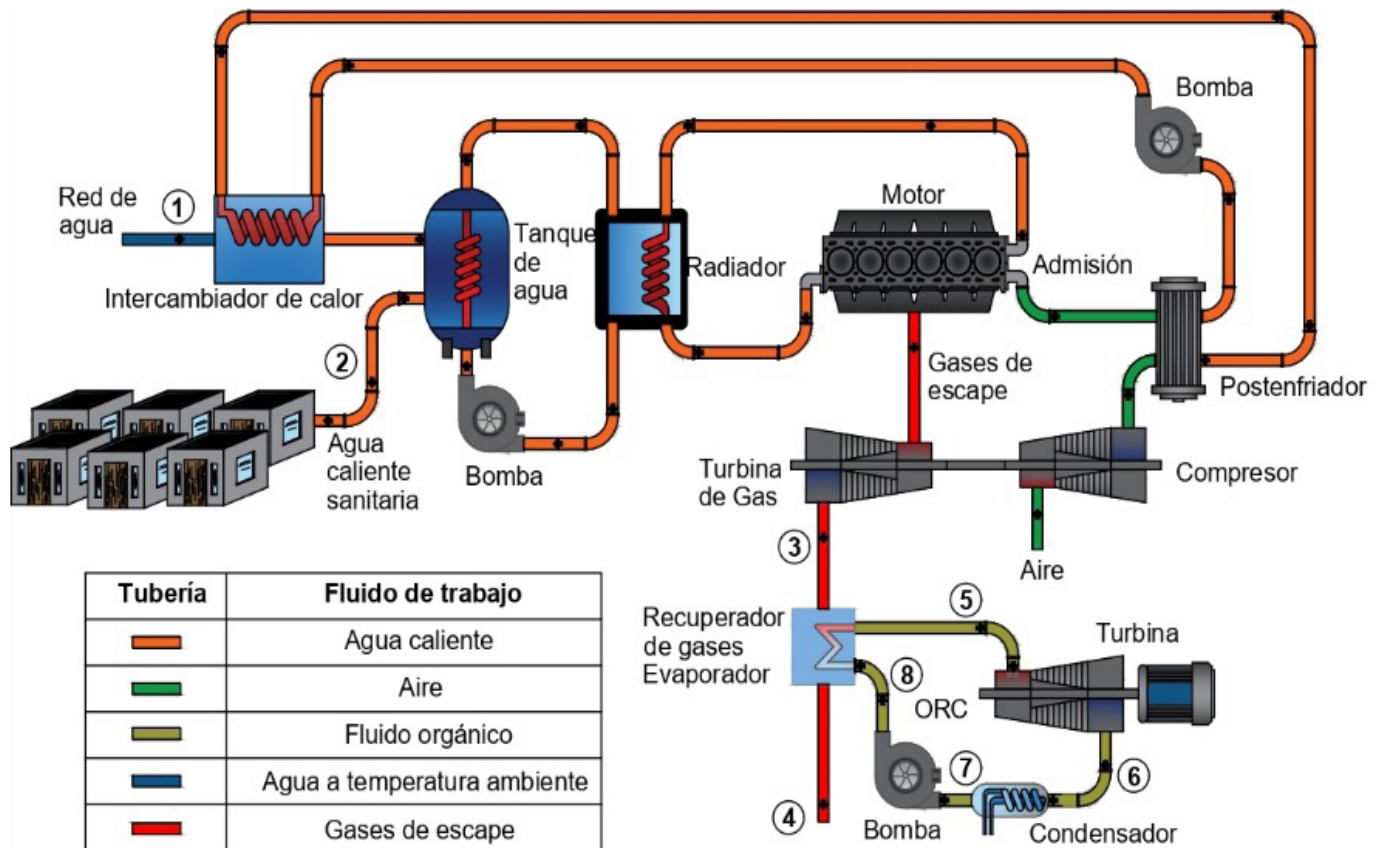


Figura 1. Diagrama del sistema de cogeneración.

gases son ideales y que las interacciones entre fases pueden ignorarse. Por lo que, la densidad de los gases de escape puede estimarse a partir de la ecuación de estado:

$$\left(\frac{P}{\rho}\right)_{\text{Gases}} = (n \cdot R \cdot T)_{\text{Gases}} \quad (1)$$

Además, el calor específico a presión constante de los gases de escape puede determinarse a partir de la expresión presentada en Hassan *et al.* (2021):

$$C_{p_{\text{Gases}}} = 0.93750 + \frac{0.01215 \cdot T_{\text{Gases}}}{10^2} + \frac{0.01670 \cdot T_{\text{Gases}}^2}{10^5} + \frac{0.07164 \cdot T_{\text{Gases}}^3}{10^9} \quad (2)$$

También, otros datos de entrada del modelo se han obtenido a partir de la ficha técnica del motor Diesel D1000 (CAT, 2024). Estos datos se pueden apreciar en la **Tabla 1** y **2**. La **Tabla 1**, muestra la distribución de energía en el rechazo de calor del motor. Mientras que la

Tabla 2, muestra las características termodinámicas de los gases de escape del motor.

Consideraciones para el ciclo Rankine orgánico

A continuación, se enlistan las consideraciones implementadas en el modelado termodinámico del ORC (Ambriz-Díaz *et al.*, 2020; Kong *et al.*, 2019; Hemadri y Subbarao, 2021; Prada y Noriega, 2022; Hernández-Fernández *et al.*, 2020):

- El R134a ingresa a la turbina en condiciones de vapor sobrecalentado.
- Se considera un sobrecalentamiento de 2-3 °C, sobre la temperatura de saturación.
- Se asume una temperatura de saturación de 40 °C en el condensador.
- La eficiencia isoentrópica de la turbina y de la bomba es de 85%.
- La efectividad de intercambio de calor del evaporador es 85%.
- La diferencia de temperatura del agua de enfriamiento en el condensador es de 10 °C.
- El calor específico a presión constante del agua de enfriamiento es 4.19 kJ/kg-K.

Tabla 1. Distribución de energía en el motor.

Rechazo de calor	Energía (kW)
Gases de escape	1,074
Radiador	352
Postenfriador	288
Pérdidas	182

Tabla 2. Características termodinámicas de los gases de escape.

Gases de escape	Magnitud
Temperatura	476.4 °C
Flujo volumétrico	228.4 m ³ /min

- Con la finalidad de observar la influencia de las caídas de presión en la potencia del ORC. Se consideran una caída de presión en el condensador y evaporador de 3 y 0.44 kPa, respectivamente.

Consideraciones para el sistema ACS

Para el sistema de agua caliente sanitaria en el aprovechamiento de calor del motor D1000, se tienen las siguientes suposiciones (Wang *et al.*, 2018):

- Se asume una temperatura de 80 °C en el interior del tanque de agua caliente sanitaria.
- La diferencia de temperatura requerida para incrementar la temperatura del agua de la red a 80 °C, es de 55 °C.
- La densidad del agua caliente se asume en un valor de 1,000 kg/m³.
- La demanda de agua caliente consumida por una vivienda es de 130 l/día.

Ecuaciones gobernantes

Para modelar el sistema, se hizo uso de la primera ley de la termodinámica y el principio de la conservación de la masa, Ecuaciones (3) – (5), (Abusoglu y Kanoglu, 2008):

$$\sum_{Entrada} \dot{m}_i = \sum_{Salida} \dot{m}_i \quad (3)$$

$$\sum_{Entrada} \dot{E} = \sum_{Salida} \dot{E} \quad (4)$$

$$0 = \dot{Q}_i - \dot{W}_i + \sum_{Entrada} \dot{m}_i \cdot h_i - \sum_{Salida} \dot{m}_i \cdot h_i \quad (5)$$

Modelado termodinámico del motor Diesel

La **Tabla 3**, muestra las ecuaciones gobernantes para

el modelado termodinámico del motor Diesel D1000, mientras que la **Tabla 4**, muestra los parámetros de desempeño termodinámico del motor en la generación de electricidad, aprovechamiento de calor residual, generación combinada de calor y electricidad, y desempeño termodinámico global (Mostafavi *et al.*, 1997; Debnath *et al.*, 2013):

Modelado termodinámico del ciclo Rankine

La **Tabla 5**, muestra los balances de masa y energía del ORC. Los balances se presentan por componente y por el ciclo ORC en manera global. Las ecuaciones de balance acoplan el ciclo ORC para el aprovechamiento de los gases de escape del motor y la disipación de calor del ORC a la atmosfera. Por otra parte, la **Tabla 6**, las ecuaciones utilizadas para estimar el desempeño termodinámico de los componentes del ORC, y del ciclo desde el punto de vista energético y desde la perspectiva de la eficiencia máxima teórica a la que el ciclo está limitado a lograr (Salek *et al.*, 2017).

Modelado termodinámico del sistema ACS

La **Tabla 7**, muestra las ecuaciones para el modelado del sistema de ACS. Se presenta la metodología para evaluar la energía térmica que se puede recuperar del motor y aprovecharla en aplicaciones de ACS. Así como también, el flujo másico de agua caliente que se puede lograr y el número de viviendas estimado al que se le puede suministrar agua caliente (Fuentes *et al.*, 2018).

Desempeño termodinámico y eléctrico del sistema global

La **Tabla 8**, muestra las ecuaciones del modelado termo-

Tabla 3. Ecuaciones del modelo termodinámico del motor Diesel.

Definición termodinámica	Ecuación (*)
Balance de energía del motor	$\dot{Q}_{Tot} = \dot{W}_M + \dot{Q}_{Radiador} + \dot{Q}_{Gases} + \dot{Q}_{Postenfriador} + \dot{Q}_{Perdidas}$
Consumo de combustible del motor	$\dot{m}_{Diesel} = \frac{\dot{Q}_{Tot}}{PCI_{Diesel}}$
Flujo másico de los gases de escape	$\dot{m}_{Gases} = \dot{V}_{Gases} \cdot \rho_{Gases}$
Temperatura de salida de los gases del sistema	$T_4 = T_3 - \frac{\dot{Q}_{Gases}}{\dot{m}_{Gases} \cdot C_{P,Gases}}$

Unidades de ecuaciones (*) - $\dot{Q}$ en (kW), $\dot{m}$ en (kg/s), T en (°C).

Tabla 4. Parámetros de desempeño termodinámico del motor Diesel.

Parámetro de desempeño	Ecuación (-)
Eficiencia en la generación de electricidad	$\eta_{E,M} = \frac{\dot{W}_M}{\dot{Q}_{Tot}}$
Eficiencia en la recuperación de calor	$\eta_{Q,M} = \frac{\dot{Q}_{Radiador} + \dot{Q}_{Postenfriador} + \dot{Q}_{Gases}}{\dot{Q}_{Tot}}$
Relación calor - electricidad	$R_{Q/E} = \frac{\dot{Q}_{Radiador} + \dot{Q}_{Postenfriador} + \dot{Q}_{Gases}}{\dot{W}_M}$
Relación pérdida de energía - energía primaria	$\Gamma = \frac{\dot{Q}_{Perdidas}}{\dot{Q}_{Tot}}$
Eficiencia global (Electricidad + Calor)	$\eta_M = \eta_{E,M} + \eta_{Q,M}$

Tabla 5. Balances de masa y energía del ORC.

Componente	Flujos másicos (kg/s)	Flujos de energía (kJ/s)
Evaporador	$\dot{m}_{Gases} = \dot{m}_3 = \dot{m}_4$ $\dot{m}_5 = \dot{m}_8$ $\dot{m}_{R134a} = \frac{\dot{Q}_{EVP}}{(h_5 - h_8)}$	$\dot{Q}_{EVP} = \varepsilon \cdot \dot{Q}_{Gases}$
Turbina	$\dot{m}_5 = \dot{m}_6$	$\dot{W}_T = \dot{m}_5 \cdot (h_5 - h_6)$
Condensador	$\dot{m}_6 = \dot{m}_7$ $\dot{m}_w = \frac{\dot{Q}_C}{C_{p,w} \cdot \Delta T_C}$	$\dot{Q}_C = \dot{m}_6 \cdot (h_6 - h_7)$ $\dot{Q}_C = \dot{m}_w \cdot C_{p,w} \cdot \Delta T_C$
Bomba	$\dot{m}_8 = \dot{m}_7$	$\dot{W}_B = \dot{m}_7 \cdot (h_8 - h_7)$
Ciclo ORC	$\dot{m}_3 = \dot{m}_4$ $\dot{m}_{w,e} = \dot{m}_{w,s}$	$\dot{Q}_{EVP} = \dot{W}_{N,ORC} + \dot{Q}_C$ $\dot{W}_{N,ORC} = \dot{W}_T - \dot{W}_B$

Tabla 6. Parámetros de desempeño termodinámico del ORC.

Parámetro de desempeño	Ecuación (-)
Eficiencia isoentrópica	$\eta_T = \frac{h_5 - h_6}{h_5 - h_{6,i}}$
Eficiencia isoentrópica	$\eta_B = \frac{h_{8i} - h_7}{h_8 - h_7}$
Eficiencia energética	$\eta_I = 1 - \frac{\dot{Q}_C}{\dot{Q}_{EVP}}$
Eficiencia de Carnot	$\eta_{II} = 1 - \frac{T_L}{T_{Gases}}$

Donde T_L , es la temperatura a la que se encuentra el depósito de calor del ORC.

Tabla 7. Parámetros del sistema de agua caliente sanitaria.

Parámetro	Ecuación (*)
Flujo de energía de ACS	$\dot{Q}_{ACS} = \dot{Q}_{Radiador} + \dot{Q}_{Postenfriador}$
Flujo másico de ACS	$\dot{m}_{ACS} = \rho_w \cdot \dot{V}_{ACS}$
Número de viviendas	$n_{ACS} = \frac{\dot{Q}_{ACS}}{\dot{m}_{ACS} \cdot C_{p,w} \cdot \Delta T_{ACS}}$

Unidades de ecuaciones (*) - $\dot{Q}_{ACS}$ en (kW), $\dot{m}_{ACS}$ en (kg/s), n_{ACS} (-)

dinámico del sistema global. Se presenta la potencia total desarrollada por el sistema (Motor + ORC), la eficiencia global del sistema (Electricidad + calor de ACS), y el número de viviendas que se puede satisfacer de acuerdo con la generación de electricidad total (CFE, 2024).

Resultados y discusión

En esta parte se presentan los resultados obtenidos del modelado termodinámico del sistema de cogeneración del MCI, ORC y sistema ACS. Se muestran resultados primeramente para las tecnologías operando de manera en individual a las condiciones establecidas y posteriormente para el sistema de cogeneración de manera global.

Resultados motor Diesel

La **Figura 2**, muestra los parámetros de desempeño termodinámico del motor Diesel (MCI). Se puede apreciar para el motor de la serie D1000, una eficiencia global del 93.72%, donde el 34.53% corresponde a la genera-

Tabla 8. Modelado termodinámico global del sistema de cogeneración.

Parámetro	Ecuación (*)
Potencia total	$\dot{W}_{Tot,S} = \dot{W}_M + \dot{W}_{N,ORC}$
Eficiencia total	$\eta_{Tot,s} = \frac{\dot{W}_{Tot,S}}{\dot{Q}_{Tot}}$
Demanda eléctrica cubierta	$n_E = \frac{E}{C_E}$ $E = 24 \cdot \dot{W}_{Tot,S}$ $C_E = 9kWh / día$

Unidades de ecuaciones (*) - $\dot{W}$ en (kW), n en (-), E en (kWh)

ción de electricidad y el 59.19% a la recuperación de calor. Comparando las potencias térmicas del radiador, postenfirador y gases de escape, con la potencia generada del motor, resulta una relación de calor-electricidad de 1.714. Esto indica que el motor Diesel como tecnología de cogeneración representa mayores ventajas en la recuperación de calor que en la generación de electricidad. Por otro lado, las pérdidas de energía primaria son de 2.285%, estas pérdidas de energía son desechadas al medio ambiente por convección y radiación. Otra cantidad de energía que no se cataloga como pérdida, más bien como deshecho de energía, es la energía contenida en los gases de escape a la salida del sistema de cogeneración. Esta energía se desecha a la salida del evaporador del ORC y es función de algunos parámetros, como lo son: la temperatura de los gases de escape en el estado termodinámico 4 (**Figura 1**), el calor específico a presión constante, la densidad y el flujo másico. Para el sistema de cogeneración, los gases de escape tienen una densidad de 0.9299 kg/m³, un calor específico a presión constante de 0.9652 kJ/kg-K, un flujo másico de 3.54 kg/s y una temperatura de 162.1 °C, lo que indica una temperatura superior a la temperatura del punto de rocío, esto evita problemas de corrosión en el evaporador del ORC según Hassan *et al.* (2021).

Finalmente, con la finalidad de tener una noción del costo de inversión del motor, un estimado del costo de inversión del motor Diésel, se puede obtener a partir de su costo unitario por kW. Según Slavica *et al.* (2023), el costo de inversión unitario de un motor de cogeneración oscila entre 850 – 1950 \$/kW (dólares/kW), por lo que

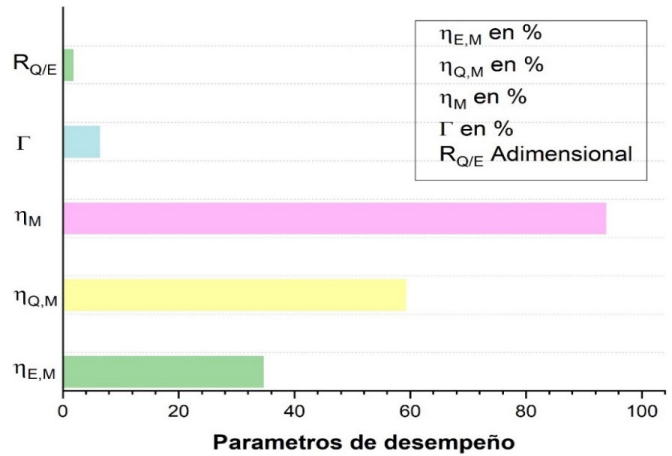


Figura 2. Parámetros de desempeño termodinámico del motor Diesel.

el costo del motor puede alcanzar \$ 1,950,000 (dólares).

Resultados ciclo Rankine Orgánico

Para la determinación de parámetros del ORC ha sido fundamental definir y calcular las propiedades de cada estado termodinámico del ORC que, por su configuración básica, se compone de una bomba, un intercambiador de calor (evaporador), una turbina y un condensador. Apegándose a la primera ley de la termodinámica, y a través del balance de energía del evaporador del ORC se ha encontrado que los gases de escape del MCI logran evaporar 5.24 kg/s de refrigerante R134a, donde dicho flujo se mantiene constante a lo largo del ciclo ORC. También el flujo es regido por dos diferentes presiones; presión alta de 3,085 kPa, resultado de la bomba y presión baja de 1,017 kPa resultado de la transformación de líquido a vapor del fluido de trabajo en condensador. Por otro lado, el mayor pico positivo de flujo de energía se presenta luego del evaporador debido a la energía transmitida por los gases de escape. La **Tabla 9** plasma las propiedades termodinámicas del ORC.

El impacto del sistema de cogeneración se puede visualizar con los flujos de energía alcanzados (potencias mecánicas y térmicas). Específicamente en el ORC, la potencia calorífica adquirida por el evaporador alcanza más de 900 kW, lo que es suficiente para el cambio de

Tabla 9. Propiedades del ciclo Rankine Orgánico.

#	h [kJ/kg]	[kg/s]	P [kPa]	s [kJ/kg-K]	T [°C]
5	284.6	5.24	3085	0.8929	90
6	267.3	5.24	1017	0.9026	40
7	108.3	5.24	1017	0.3949	40
8	110.4	5.24	3085	0.3959	41.6

estado del refrigerante de líquido a vapor e incrementar su energía. Esta energía del vapor contribuye a la generación de 90.64 kW por medio de la turbina. En contraparte, la bomba consume 11.07 kW, repercutiendo directamente sobre la potencia neta mostrada en la **Figura 3**. En relación con lo anterior, el ORC puede alcanzar una producción neta de potencia de 79.58 kW; sin embargo, si se consideran las caídas de presión en el condensador y el evaporador, el ORC logra una potencia neta de 79.32 kW, lo que representa una disminución en la potencia neta del ciclo del 0.32%. Cabe resaltar que para que el ORC opere en ciclo cerrado y alcance los parámetros mencionados anteriormente, es necesario un rechazo de calor hacia el medio ambiente de 833.3 kW por el condensador.

Un aspecto importante que se debe tomar cuenta en el caso de que un proyecto se pretenda llevar a la práctica es el costo de inversión. En el caso del ORC una estimación se puede obtener a partir de su capacidad nominal. Para ciclos Rankine orgánicos de capacidades de 10 – 100 kW, el costo de inversión es de aproximadamente 2,500 \$/kW (Tocci *et al.*, 2017), por lo que el ORC de la presente investigación puede tener un costo de inversión de \$ 200,000 (dólares).

La **Figura 4**, muestra los efectos de variar la temperatura de admisión de la turbina en un sobrecalentamiento de 2 – 3 °C contra las eficiencias por ley de la termodinámica y la eficiencia de Carnot. Como es de esperarse la eficiencia del Carnot no tuvo variación debido a que el motor seleccionado tiene capacidades fijas de funcionamiento y la eficiencia se evalúa en función de la temperatura de activación y de rechazo de calor del ORC. La eficiencia de Carnot es una eficiencia que no puede alcanzar un ciclo real. Sin embargo, indica una pauta para tratar de aspirar a obtener dicha eficiencia. Para el ORC activado con una temperatura de 476.4 °C y con una temperatura de rechazo de calor de 25 °C, se ha obtenido una eficiencia de Carnot de 60.23% y una eficiencia térmica de 7.41%. Por otro lado, la eficiencia por ley se observa beneficiada al incrementar la temperatura del sobrecalentamiento en un 0.083%, mientras que la eficiencia de Carnot es ajena a este sobrecalentamiento por lo cual se mantiene constante.

Al realizar el sobrecalentamiento de 2 – 3 °C en la temperatura de admisión de la turbina, se observan influenciados ciertos parámetros termodinámicos en el ciclo ORC, un ejemplo de ello se puede apreciar en la **Figura 5**. Se puede reafirmar que el sobrecalentamiento puede influenciar directamente el flujo másico del R134a, esta reducción varía desde 5.426 a 5.24 , y en consecuencia debido a un menor trabajo de la bomba y a

una mayor calidad de la energía del refrigerante a la entrada de la turbina, se puede obtener una mayor potencia neta de 78.7 a 79.58 kW.

Existe una directa relación entre el flujo másico del

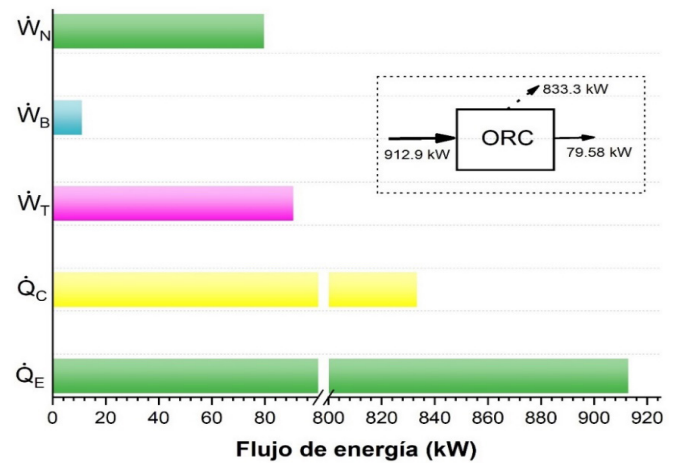


Figura 3. Flujos de energía por componente del ORC.

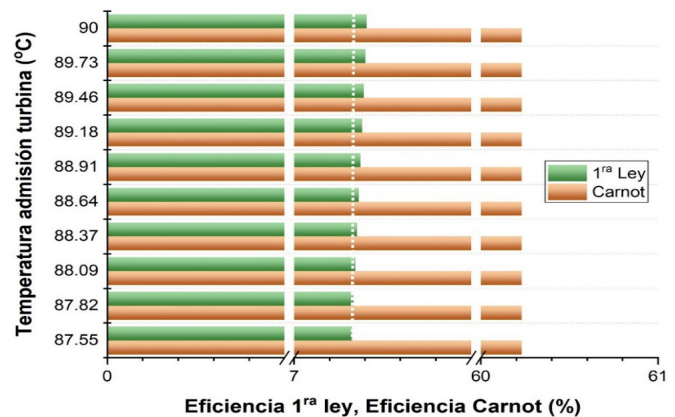


Figura 4. Comportamiento de la eficiencia por 1ra ley y eficiencia de Carnot.

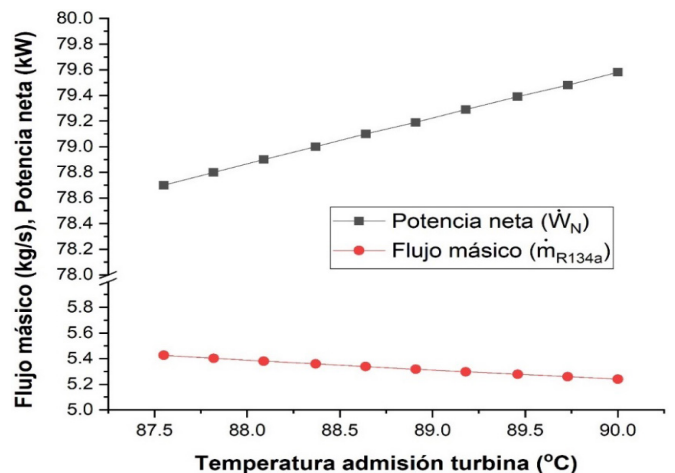


Figura 5. Comportamiento del flujo de R134a y potencia neta del ORC.

agua de enfriamiento y la potencia térmica del condensador, donde el primer parámetro depende del segundo. Sin embargo, también, debido a que la energía que disipa el condensador es función de la operación de la turbina. Una variación de la temperatura de admisión de la turbina, representa variaciones tanto en el flujo másico de agua de enfriamiento como de la potencia térmica que disipa el condensador. La potencia térmica del condensador y el flujo másico de agua de enfriamiento se disminuyen en 0.9 kW y 0.02 kg/s al variar la temperatura de la admisión de la turbina de 2 – 3 °C (**Figura 6**). Lo anterior se presenta a causa de una menor cantidad de energía necesaria a disipar por la disminución de flujo másico del ORC.

Resultados del sistema de agua caliente sanitaria

El número de viviendas abastecidas en ACS es otro de los beneficios del sistema de cogeneración. La cantidad de ACS depende directamente del calor total suministrado por el radiador más el postenfriador. En esta propuesta, la suma de potencia calorífica es de 640 kW, otorgando la capacidad de suministrar ACS a 1,846 viviendas, con un consumo promedio de agua caliente de 130 litros diarios. En la **Figura 7**, se grafica la tendencia proporcional entre el calor suministrado y el número de viviendas al que se le puede proveer este servicio. Se puede apreciar que el número de viviendas en función del calor recuperable del motor. En el caso de solamente recuperar el calor del radiador (352 kW), el número de viviendas se disminuye drásticamente hasta un valor ligeramente superior a las 1,000 viviendas.

Resultados del sistema global

Una concentración de resultados globales del sistema de cogeneración se detalla en la **Figura 8**. Se destaca una generación de potencia total entre el MCI y el ORC de 1,079.58 kW, donde el ORC aporta el 8% a partir de la energía recuperable de los gases de escape del motor. En esta dirección, mediante la potencia eléctrica y térmica se logra cubrir la demanda de 2,879 y 1,846 viviendas, en electricidad y agua caliente sanitaria, respectivamente. Debido a lo anterior, la eficiencia energética que logra el sistema global es de 59.38%. Cabe mencionar que, si el motor operara solamente en la generación de electricidad, alcanzaría una eficiencia eléctrica del 34.53%, mientras que operando de manera conjunta con el ORC alcanza una eficiencia eléctrica de 37.28%. Lo anterior representa un incremento en la eficiencia eléctrica del sistema de 2.75%, a partir del uso del calor residual contenido en los gases de escape del motor para activar el ORC.

Conclusiones

En este trabajo se presentó el análisis termodinámico de un sistema de cogeneración de electricidad y calor de

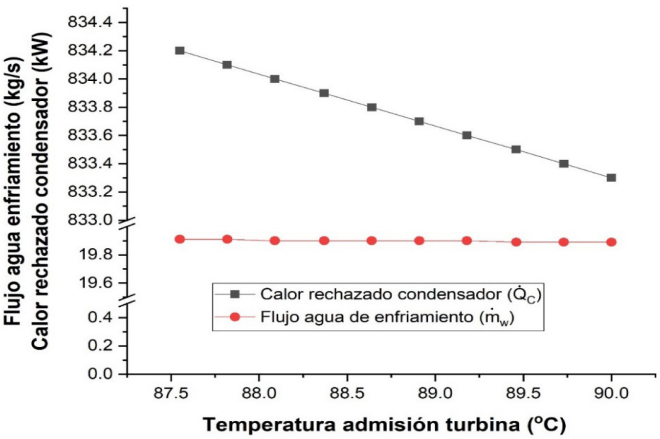


Figura 6. Comportamiento del flujo de agua de enfriamiento y calor de rechazo del condensador.

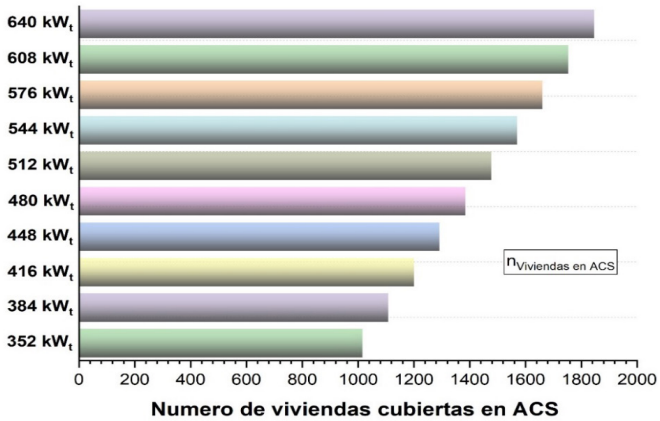


Figura 7. Número de viviendas cubiertas de ACS respecto del calor del radiador.

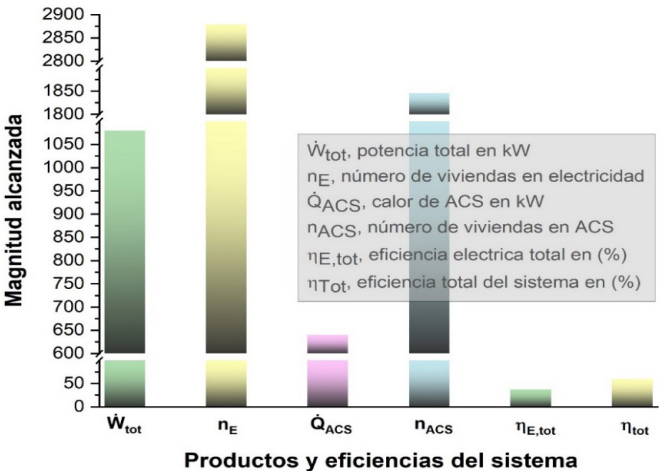


Figura 8. Productos y desempeño termodinámico total del sistema de cogeneración.

ACS utilizando un motor de combustión interna y un ciclo Rankine orgánico. Derivado del análisis y de los resultados obtenidos se encontró que, la recuperación de calor de los gases de escape del motor Diésel mediante el ciclo ORC, permite incrementar la producción de potencia del sistema en 79.58 kW. Esto representa un aumento en la eficiencia eléctrica del sistema de 34.53% a 37.28%. También, representa suministrar electricidad de manera adicional a 215 viviendas. Además, la recuperación de calor del radiador y postenfriador del motor para aplicaciones de agua caliente sanitaria, incrementa también la viabilidad energética y termodinámica del sistema de cogeneración. Se puede lograr un flujo másico de agua caliente de 2.77 kg/s, suficientes para satisfacer la demanda de agua caliente sanitaria de más de 1,015 viviendas. Finalmente, el desempeño termodinámico de sistema de cogeneración resulta ser altamente atractivo debido a que el sistema puede lograr una eficiencia global de 59.38%. Además de que, en los productos energéticos generados puede alcanzar una producción de potencia total de 1,079.58 kW y una cantidad de energía térmica de 640 kW para su uso en ACS. Esto equivale a satisfacer en electricidad y calor a 2,879 viviendas en electricidad y 1,846 viviendas en ACS.

Finalmente, un aspecto importante a considerar para implementar este tipo de sistemas en la práctica, es la parte económica. En este punto, las tecnologías más costosas del sistema de cogeneración son el motor de combustión interna y el ORC. En esta dirección, la recuperación de calor residual mediante el ORC es bastante atractiva debido a que el ORC representa solo el 10.25% del costo de inversión del motor, por lo que el incremento de potencia total del sistema no solamente es atractivo desde el punto de vista energético, también lo es desde el punto de vista económico, y si a esto se le suma el menor impacto ambiental, se obtiene una tecnología que es realmente eficiente, económica y amigable con el medio ambiente.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido desarrollado en el marco de los proyectos de Investigación Científica, Desarrollo Tecnológico e Innovación del Tecnológico Nacional de México (TecNM) – Proyecto: 19424.24-P. Los autores agradecen el apoyo para la realización de esta investigación.

Referencias

- Abed H, Atashkari K, Niazmehr A, Jamali A (2013). Thermodynamic optimization of combined power and refrigeration cycle using binary organic working fluid. *International Journal of Refrigeration* 36(8):2160–2168. doi:10.1016/j.ijrefrig.2013.06.013
- Abusoglu A, Kanoglu M (2008). First and second law analysis of diesel engine powered cogeneration systems. *Energy Conversion and Management* 49(8):2026–2031. doi:10.1016/j.enconman.2008.02.012
- Açikkalp E, Aras H, Hepbasli A (2014). Advanced exergoeconomic analysis of a trigeneration system using a diesel-gas engine. *Applied Thermal Engineering* 67(1):388-395. doi:10.1016/j.applthermaleng.2014.03.005
- Ambriz-Díaz VM, Rubio-Maya C, Ruiz-Casanova E, Martínez-Patiño J, Pastor-Martínez E (2020). Advanced exergy and exergoeconomic analysis for a polygeneration plant operating in geothermal cascade. *Energy Conversion and Management* 203:112227. doi:10.1016/j.enconman.2019.112227
- Barelli L, Barluzzi E, Bidini G (2011). Modeling of a 1 MW cogenerative internal combustion engine for diagnostic scopes. *Applied Energy* 88(8):2702–2712. doi:10.1016/j.apenergy.2011.02.021
- CAT. (2024). Diesel Generator Sets D100 GC. https://www.cat.com/en_US/products/new/power-systems/electric-power/diesel-generator-sets/114080.html
- Caton JA (2018). The thermodynamics of internal combustion engines: examples of insights. *Inventions* 3(2). doi:10.3390/inventions3020033
- CFE. (2024). CFE Consmo. <https://recibodeluzcfe.mx/blog/cuantos-kwh-por-dia-es-normal/>
- Daghighi R, Shafieian A (2016). An investigation of heat recovery of submarine diesel engines for combined cooling, heating and power systems. *Energy Conversion and Management* 108:50–59. doi:10.1016/j.enconman.2015.11.004
- Debnath BK, Sahoo N, Saha UK (2013). Thermodynamic analysis of a variable compression ratio diesel engine running with palm oil methyl ester. *Energy Conversion and Management* 65:147–154. doi:10.1016/j.enconman.2012.07.016
- Dibazar SY, Salehi G, Davarpanah A (2020). Comparison of exergy and advanced exergy analysis in three different organic rankine cycles. *Processes* 8(5). doi:10.3390/PR8050586
- Ebrahimi-Moghadam A, Moghadam AJ, Farzaneh-Gord M, Aliakbari K (2020). Proposal and assessment of a novel combined heat and power system: Energy, exergy, environmental and economic analysis. *Energy Conversion and Management* 204. doi:10.1016/j.enconman.2019.112307
- Fuentes E, Arce L, Salom J (2018). A review of domestic hot water consumption profiles for application in systems and buildings energy performance analysis. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 81:1530-1547. doi:10.1016/j.rser.2017.05.229
- Ganesh NS, Omprakash M (2022). Comprehensive review on cogeneration systems for low and medium temperature heat

- recoveries. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects* 44(3):6404-6432. doi:10.1080/15567036.2022.2098420
- Hassan R, Barua H, Das BK (2021). Energy, exergy, exergo-environmental, and exergetic sustainability analyses of a gas engine-based CHP system. *Energy Science and Engineering* 9(12):2232–2251. doi:10.1002/ese3.979
- Hemadri VB, Subbarao PMV (2021). Thermal integration of reheated organic Rankine cycle (RH-ORC) with gas turbine exhaust for maximum power recovery. *Thermal Science and Engineering Progress* 23. doi:10.1016/j.tsep.2021.100876
- Hernández-Fernández NJ, Zumalacárregui-de Cárdenas L, Pérez-Ones O (2020). Simulación de condiciones de operación y fluidos de trabajo para ciclos Rankine orgánicos. *Revista de Investigación, Desarrollo e Innovación* 10(2):349–358. doi:10.19053/20278306.v10.n2.2020.10213
- Isa NM, Tan CW, Yatim AHM (2018). A comprehensive review of cogeneration system in a microgrid: A perspective from architecture and operating system. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 81:2236-2263. doi:10.1016/j.rser.2017.06.034
- Khaljani M, Saray RK, Bahlouli K (2016). Evaluation of a combined cycle based on an HCCI (Homogenous Charge Compression Ignition) engine heat recovery employing two organic Rankine cycles. *Energy* 107:748–760. doi:10.1016/j.energy.2016.03.142
- Kong R, Deethayat T, Asanakhm A, Vorayos N, Kiatsiriroat T (2019). Thermodynamic performance analysis of a R245fa organic Rankine cycle (ORC) with different kinds of heat sources at evaporator. *Case Studies in Thermal Engineering* 13. doi:10.1016/j.csite.2018.100385
- Leal-Chavez D, Beltran-Chacon R, Cardenas-Terrazas P, Islas S, Velázquez N (2019). Design and analysis of the domestic micro-cogeneration potential for an ORC system adapted to a solar domestic hot water system. *Entropy* 21(9). doi:10.3390/e21090911
- Mansoury M, Jafarmadar S, Khalilarya S (2018). Energetic and exergetic assessment of a two-stage Organic Rankine Cycle with reactivity controlled compression ignition engine as a low temperature heat source. *Energy Conversion and Management* 166:215–232. doi:10.1016/j.enconman.2018.04.019
- Mohammadkhani F, Yari M (2019). A 0D model for diesel engine simulation and employing a transcritical dual loop Organic Rankine Cycle (ORC) for waste heat recovery from its exhaust and coolant: Thermodynamic and economic analysis. *Applied Thermal Engineering* 150:329–347. doi:10.1016/j.applthermaleng.2018.12.158
- Mostafavi M, Agnewt B (1997). Thermodynamic analysis of combined diesel engine and absorption refrigeration unit—naturally aspirated diesel engine. *Applied Thermal Engineering* 17 (5):471-478. doi:10.1016/S1359-4311(96)00036-1.
- Neto R de O, Sotomonte CAR, Coronado CJR (2021). Off-design model of an ORC system for waste heat recovery of an internal combustion engine. *Applied Thermal Engineering* 195. doi:10.1016/j.applthermaleng.2021.117188
- Parsa S, Neshat E (2022). Thermodynamic and statistical analysis on the effect of exhaust gas recirculation on waste heat recovery from homogeneous charge compression ignition engines. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry* 147(11):6349–6361. doi:10.1007/s10973-021-10923-y
- Prada D, Noriega Y (2022). *Estudio económico de la implementación del ciclo binario combinado para la generación de energía eléctrica mediante “Tufiño-chiles-cerro negro”* [Tesis]. Universidad Autónoma de Bucaramanga.
- Salek F, Moghaddam AN, Naserian MM (2017). Thermodynamic analysis of diesel engine coupled with ORC and absorption refrigeration cycle. *Energy Conversion and Management* 140:240-246. doi:10.1016/j.enconman.2017.03.009
- Sanchez M, Tovar A, Samblas J (2024). *Diagnóstico de gases de escape*. https://www.todomecanica.com/recursos/diagnostico_gases_escape.pdf
- Seyedkavoosi S, Javan S, Kota K (2017). Exergy-based optimization of an organic Rankine cycle (ORC) for waste heat recovery from an internal combustion engine (ICE). *Applied Thermal Engineering* 126:447–457. doi:10.1016/j.applthermaleng.2017.07.124
- Shankar V, Sebastian C (2014). Computation of exhaust gas constituents of diesel engine. *Journal of Advanced Engineering Research* 1:66-76.
- Slavica P, Ivica M, Dragica R, Milios J, Slobodan J, Vladislav N (2023). Testing the energy efficiency of CHP engines and cost-effectiveness of biogas plant operation. *IET Renewable Power Generation* 17(3):555–562. doi:10.1049/rpg2.12614
- Srinivasan KK, Mago PJ, Krishnan SR (2010). Analysis of exhaust waste heat recovery from a dual fuel low temperature combustion engine using an Organic Rankine Cycle. *Energy* 35(6):2387–2399. doi:10.1016/j.energy.2010.02.018
- Tocci L, Pal T, Pesmazoglou I, Franchetti B (2017). Small scale Organic Rankine Cycle (ORC): a techno-economic review. *Energies* 10(4). doi:10.3390/en10040413
- Wang J, Xie X, Lu Y, Liu B, Li X (2018). Thermodynamic performance analysis and comparison of a combined cooling heating and power system integrated with two types of thermal energy storage. *Applied Energy* 219:114–122. doi:10.1016/j.apenergy.2018.03.029
- Zhang R, Su W, Lin X, Zhou N, Zhao L (2020). Thermodynamic analysis and parametric optimization of a novel S–CO₂ power cycle for the waste heat recovery of internal combustion engines. *Energy* 209. doi:10.1016/j.energy.2020.118484

Nomenclatura

Símbolos

C_E	Consumo unitario de electricidad (kWh/día)
C_p	Calor específico a presión constante (kJ/kg-K)

E	Energía (kJ)
$\dot{E}$	Energía por unidad de tiempo (kJ/s)
$\dot{m}$	Flujo másico (kg/s)
n	Número de viviendas
PCI	Poder calorífico inferior (kJ/kg)
	Potencia térmica (kW)
$R_{Q/E}$	Relación calor-electricidad
T	Temperatura (°C)
$\dot{V}$	Flujo volumétrico (m³/s)
$\dot{W}$	Potencia (kW)

Letras griegas

Γ	Relación pérdida de energía - energía primaria (%)
ε	Efectividad de intercambio de calor (%)
η	Eficiencia (%)
ρ	Densidad (kg/m³)

Subíndices

1 ... 8, i	Referente a estados termodinámicos
ACS	Agua Caliente Sanitaria
B	Bomba
C	Condensador
E	Electricidad
EVP	Evaporador
h	Entalpia
I	Eficiencia 1ra ley
II	Eficiencia Carnot
L	Temperatura del límite inferior
M	Motor
N	Neto
Q	Calor
s	Sistema
T	Turbina
Tot	Total
w	Agua de enfriamiento



Evaluación de la erosión del suelo en la cuenca del Lago de Pátzcuaro mediante la ecuación universal de pérdida de suelo

Evaluation of soil erosion in the Lake Patzcuaro basin using the universal soil loss equation

Jorge Luis Bedolla Cervantes, José Jaime Madrigal Barrera, Sonia Tatiana Sánchez Quispe* 

Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Morelia, México.

Historial

Manuscrito recibido: 9 de enero de 2024
Manuscrito aceptado: 11 de marzo de 2025
Manuscrito publicado: abril 2025

*Autor para correspondencia

Sonia Tatiana Sánchez Quispe
e-mail: quispe@umich.mx
ORCID: 0000-0002-8394-495X

Resumen

La cuantificación de la erosión hídrica de los suelos en cuencas hidrográficas sirve para conocer el grado de su deterioro y para implementar medidas de conservación que minimicen la pérdida del suelo. Dada la carencia de información para cuantificar con precisión la erosión en México, es necesario estudiar su estimación con la información disponible mediante metodologías validadas con información experimental. El objetivo principal de este estudio es cuantificar la magnitud de la erosión hídrica en la cuenca del lago de Pátzcuaro e identificar áreas críticas mediante la aplicación de la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (USLE). La implementación de la USLE ha permitido identificar áreas vulnerables a la erosión y focalizar los esfuerzos de conservación en sectores críticos. Asimismo, proporciona una base científica para la toma de decisiones informadas en términos de planificación territorial, promoción de prácticas agrícolas sostenibles y protección de los recursos hídricos del lago. Los resultados obtenidos se utilizarán para diseñar estrategias de gestión y conservación, contribuyendo así a la sostenibilidad ambiental de la cuenca.

Palabras clave: Erosión hídrica, Lago de Pátzcuaro, USLE

Abstract

The quantification of water erosion of soils in watersheds is useful to know the degree of soil deterioration and to implement conservation measures to minimize soil loss. Given the lack of information to accurately quantify erosion in Mexico, it is necessary to study its estimation with available information using methodologies validated with experimental information. The main objective of this study is to quantify the magnitude of water erosion in the Lake Patzcuaro basin and identify critical areas by applying the Universal Soil Loss Equation (USLE). The implementation of the USLE has made it possible to identify areas vulnerable to erosion and to focus conservation efforts on critical sectors. It also provides a scientific basis for informed decision-making in terms of territorial planning, promotion of sustainable agricultural practices and protection of the lake's water resources. The results obtained will be used to design management and conservation strategies, thus contributing to the environmental sustainability of the watershed.

Keywords: Water erosion, Patzcuaro Lake, USLE

Introducción

La erosión es la remoción de suelo por agentes como la lluvia o el viento y constituye un problema muy severo de degradación ambiental, ya que aproximadamente el 80% de la superficie del planeta presenta este fenómeno, lo que ha provocado que cada año los ríos transporten a los océanos unos 24,000 millones de toneladas de tierra cultivable (Alvarado-Cardona *et al.*, 2007). La Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales indica que las causas más comunes de esta degradación

son el pastoreo, la deforestación y las malas prácticas agrícolas (SEMARNAT; 2002).

México tiene graves pérdidas de suelo ocasionadas por la erosión hídrica. Uribe y col. (2002) consideran que el mayor impacto ocurre en terrenos agrícolas de ambientes tropicales y relieve accidentado. Alrededor de 144 millones de hectáreas equivalentes al 75% del total nacional, están afectadas por la erosión; de las cuales 15.9 millones presentan daños severos (Nieves *et al.*, 2001). La recuperación del suelo y su cubierta vegetal es

una tarea urgente por su impacto en el clima, así como la implementación de prácticas agrícolas sustentables a corto, mediano y largo plazo (Giller *et al.*, 2015; Lal *et al.*, 2021).

El riesgo de erosión o erosión potencial se define como el efecto combinado de los factores causales como lluvia, escurrimiento, suelo y topografía (Wischmeier y Smith, 1978). La combinación de estos factores se integra en la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (USLE, por sus siglas en inglés), aunque los mismos autores reconocen que la USLE fue desarrollada para aplicarse en parcelas, su empleo en áreas mayores como es el caso de una cuenca hidrográfica requeriría de algunas modificaciones. En este sentido, Montes-León (2002), presentó una metodología basada en una modificación de la USLE, utilizand un Sistema de Información Geográfica (SIG) para realizar interpolaciones de mapas representativos de los factores que provocan la erosión, con el propósito de generar un mapa de erosión potencial. De acuerdo con Fu *et al.* (2005), la USLE presenta algunas limitaciones, debido a la heterogeneidad espacial, la precisión, el factor de escala, entre otros.

La cuenca del Lago de Pátzcuaro representa un ecosistema relevante en términos de biodiversidad, recursos hídricos, importancia medioambiental y cultural, y es la fuente principal de sustento para las comunidades locales. Por lo tanto, es esencial entender como los sistemas de cultivo, la intensidad de la labranza y la presencia de cobertura vegetal puede afectar la erosión, y en consecuencia, la calidad del agua (Fisher *et al.*, 2003; Carro *et al.*, 2008).

Este estudio propone examinar como diferentes enfoques de manejo agrícola influyen en los niveles de erosión en la cuenca del Lago de Pátzcuaro. La relevancia de este análisis radica en la necesidad de preservar la salud del suelo y la calidad del agua en una región que desempeña un papel crucial tanto en términos ecológicos como socioeconómicos. Al abordar esta relación entre la actividad humana y la salud del ambiente, se busca promover prácticas sostenibles y contribuir al bienestar tanto de la naturaleza como de las comunidades que dependen de ella.

Materiales y métodos

Área en estudio

Este trabajo se realizó en la cuenca del Lago de Pátzcuaro, la cual se localiza en la zona centro-occidente de México, en el estado de Michoacán, en la provincia fisiográfica conocida como Cinturón Volcánico Transmexicano (Figura 1; Medina, 2006).

Estimación de los factores de la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (USLE)

La ecuación utilizada para este cálculo es:

$$A = R K (LS) C P \quad (1)$$

donde A es la estimación promedio anual de pérdida de suelo (MG ha⁻¹); R es el factor de erosividad anual de la lluvia [Mj mm (ha hr)⁻¹]; K es el factor de erosionabilidad del suelo [Mg ha hr (ha Mj mm)]; LS representa el factor topográfico (adimensional); C es un factor de manejo y cobertura (adimensional) y P es el factor de prácticas mecánicas de conservación (adimensional).

Factor erosividad de la lluvia (R). La erosividad de la lluvia se determinó con base en registros de ocho estaciones climatológicas ubicadas alrededor de la cuenca en un radio aproximado de 35 km (Tabla 1).

Los datos fueron recopilados de la base de datos de clima computarizado: Climate Computing Project (CLICLOM). Para la obtención de los valores se aplicó la formula del Índice Modificado de Fournier (IMF) que está dado por la relación entre la suma del cuadrado de las precipitaciones mensuales para un año, respecto de la precipitación media anual, tal como se expresa en la siguiente ecuación:

$$IMF = (\Sigma [PP_{mensual}]^2) / PP_{anual} \quad (2)$$

donde: $\Sigma PP_{mensual}$ es la suma de las precipitaciones promedio mensuales de cada estación. PP_{anual} es la precipitación promedio anual.

Para encontrar la erosividad total de la cuenca solo es la sumatoria del índice de Fournier.

$$R = \Sigma IMF \quad (3)$$

Tabla 1. Estaciones meteorológicas seleccionadas.

ID	Estación	Nombre
1	16050	Huaniqueo
2	16055	Jesús del Monte
3	16084	Panindicuaro
4	16087	Pátzcuaro
5	16123	Tacámbaro
6	16127	Taretan (CFE)
7	16142	Zacapu (DGE)
8	16146	Zirahuén

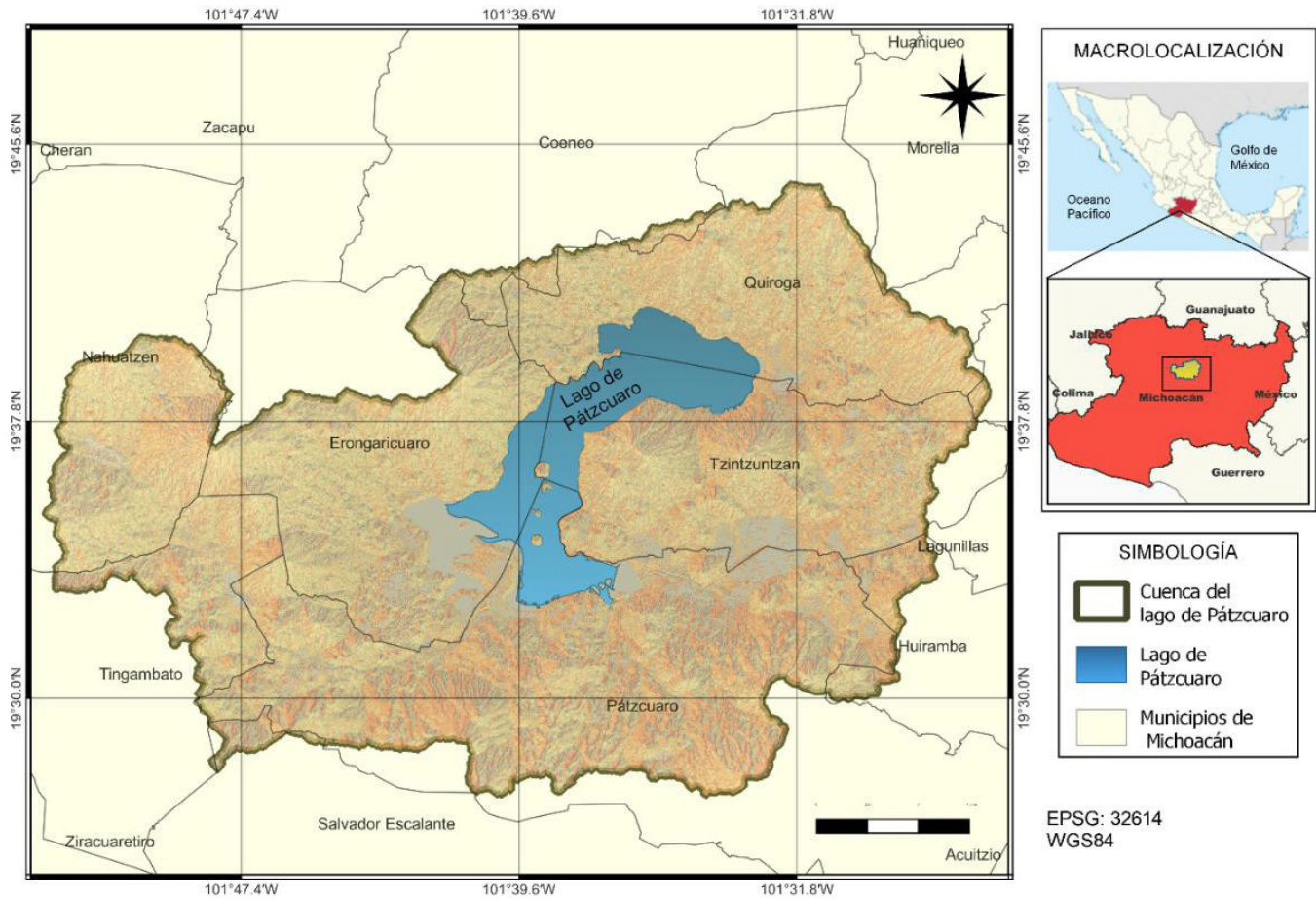


Figura 1. Ubicación del área en estudio. En el centro del mapa se contrasta en color azul el embalse y se indican los municipios circunvecinos.

Factor de erodabilidad del suelo (*K*). Se define como la tasa de pérdida de suelo por unidad de tiempo y por unidad de longitud de pendiente. En otras palabras, representa la erosividad potencial del suelo. El valor “*K*” esta influenciado por diversas propiedades físicas del suelo, como su textura, estructura, contenido de materia orgánica y cohesión.

La metodología empleada tradicionalmente es el nomograma de Wischmeier y Smith, una herramienta gráfica que facilita la determinación de este factor. Este nomograma toma en cuenta la textura del suelo (proporciones de arena, limo y arcilla) y el contenido medio de materia orgánica del suelo.

Debido que no se cuenta con información detallada para la aplicación de la metodología tradicional, se aplicó la metodología descrita por la FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación). Para la determinación de este factor se utilizó la información edafológica más reciente de la Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO) para posteriormente emplear la clasificación de suelos del WRB (World Reference Base for

Soil Resources). Una vez clasificados los tipos de suelo para la zona de estudio, se le asigna el factor *K* de acuerdo con la (Tabla 2).

Tabla 2. Factor *K*, de acuerdo con el tipo de suelo de la clasificación desarrollada por la WRB.

Orden	Textura		
	G	M	F
Acrisol (AC)	0.026	0.04	0.013
Albeluvisol (AL)	0.026	0.04	0.013
Andosol (AN)	0.026	0.04	0.013
Arenosol (AR)	0.013	0.02	0.007
Chernozem (CH)	0.013	0.02	0.007
Calcisol (CL)	0.053	0.079	0.026
Cambisol (CM)	0.026	0.04	0.013
Durisol (DU)	0.053	0.079	0.026
Fluvisol (FL)	0.026	0.04	0.013
Ferrasol (FR)	0.013	0.02	0.007
Gleysol (GL)	0.026	0.04	0.013

Tabla 2. Continuación.

Orden	Textura		
	G	M	F
Gypsisol (GY)	0.053	0.079	0.026
Histosol (HS)	0.053	0.02	0.007
Kastanozem (KS)	0.026	0.04	0.013
Leptosol (LP)	0.013	0.02	0.007
Luvisol (LV)	0.026	0.04	0.013
Lixisol (LX)	0.013	0.02	0.007
Nitisol (NT)	0.013	0.02	0.007
Phaeozem (PH)	0.013	0.02	0.007
Planosol (PL)	0.053	0.079	0.026
Plinthosol (PT)	0.026	0.04	0.013
Regosol (RG)	0.026	0.04	0.013
Solanchak (SC)	0.026	0.04	0.013
Solonetz (SN)	0.053	0.079	0.026
Umbrisol (UM)	0.026	0.04	0.013
Vertisol (VR)	0.053	0.079	0.026

Factor de longitud y grado de pendiente (LS). El factor L representa la distancia a lo largo del flujo de agua desde el inicio del declive hasta el punto de interés. Cuanto mayor es la longitud del declive, mayor es la contribución a la erosión. El factor S indica la inclinación del terreno. Pendientes más pronunciadas tienden a aumentar la velocidad del agua, lo que puede llevar a una mayor erosión. La metodología empleada para la determinación de este factor utiliza un modelo digital de elevaciones para conocer primero el factor L posteriormente el factor S, para finalmente obtener el producto de estos dos factores (Renard, 1997).

Factor de cobertura vegetal (C). Este factor tiene en cuenta la presencia y eficiencia de la vegetación en la reducción de la erosión del suelo. El factor C varía entre 0 y 1, donde 0 indica ninguna protección por vegetación y 1 indica una protección completa. Este factor destaca la importancia de mantener y fomentar la cobertura vegetal como una estrategia eficaz para reducir la pérdida de suelo debido a la erosión. La vegetación actúa como una barrera natural, mitigando el impacto de las fuerzas erosivas del agua y el viento.

Para la determinación de este factor se utilizó la información de uso de suelo y vegetación, escala 1:250000 del año 2021 de la Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO) para posteriormente clasificar cada tipo de vegetación, agricultura e información ecológica de acuerdo con la **Tabla 3**.

Una vez obtenidos los mapas de valores de los factores involucrados se procede a reclasificar los mapas en clase normal (<0.5 T/ha/año), ligera (0.5-5 T/ha/año), moderada (5-15 T/ha/año), severa (15-50 T/ha/año), muy alto (50-200 T/ha/año) y catastrófica (>200 T/ha/año) de pérdida de suelo. Esto con la finalidad de observar las zonas con mayor afectación.

Esquema de integración de la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (USLE) a un SIG

El SIG utilizado para este estudio fue Qgis, ya que es un software libre y de código abierto para cualquier plataforma. Para el correcto uso de este SIG primero se reúnen los datos necesarios que involucran la ecuación USLE para continuar con la rasterización y por último utilizar herramientas de análisis especial para combinar los factores y generar la estimación de la erosión del suelo.

Tabla 3. Factor C para vegetación y/o uso de suelo.

Vegetación y/o uso de suelo	C	Vegetación y/o uso de suelo	C
Bosque de ayarín	0.01	Pastizal gipsófilo	0.25
Bosque de cedro	0.01	Pastizal halófilo	0.25
Bosque de encino	0.1	Pastizal inducido	0.02
Bosque de encino-pino	0.01	Pastizal natural	0.07
Bosque de galería	0.1	Popal	0.85
Bosque de oyamel	0.01	Pradera de alta montaña	0.05
Bosque de pino	0.01	Sabana	0.54
Bosque de pino-encino	0.01	Sabanoide	0.54
Bosque de tascate	0.01	Selva alta perennifolia	0.45
Bosque mesófilo de montaña	0.01	Selva alta subperennifolia	0.45
Chaparral	0.65	Selva baja caducifolia	0.5
Manglar	0.1	Selva baja espinosa caducifolia	0.5

Tabla 3. Continuación.

Vegetación y/o uso de suelo	C	Vegetación y/o uso de suelo	C
Matorral crasicaule	0.65	Selva baja espinosa subperennifolia	0.5
Matorral de coníferas	0.2	Selva mediana caducifolia	0.45
Matorral desértico micrófilo	0.25	Selva mediana subcaducifolia	0.45
Matorral desértico roetófilo	0.25	Tular	0.45
Matorral espinoso tamaulipeco	0.45	Vegetación de desiertos arenosos	0.1
Matorral rosetófilo costero	0.25	Vegetación de dunas costeras	0.85
Matorral sarcocaule	0.25	Vegetación de galería	0.85
Matorral sarco-crasicaule	0.25	Vegetación halófila	0.85
Matorral sarco-crasicaule de neblina	0.25	Zona urbana	0.005
Matorral submontano	0.35	Cuerpos de agua	1
Matorral subtropical	0.12	Agricultura en riego	0.55
Mezquital	0.65	Agricultura de temporal	0.75
Palmar inducido	0.75	Agricultura de humedad	0.25
Palmar natural	0.75	Costero	1

Resultados y discusión

La cuenca del Lago de Pátzcuaro es una cuenca endorreica con una superficie de 929 km², sus niveles sobre el nivel medio del mar van desde 2035 m.s.n.m. en la parte más baja de la cuenca y hasta 3300 m.s.n.m. en el parteaguas de la cuenca. De acuerdo con INEGI (2020), la cuenca se encuentra en el territorio de 9 municipios del estado de Michoacán (Tabla 4).

La población en la cuenca es aproximadamente de 141,239 personas según el último censo de población INEGI (2020). El clima predominante en la cuenca es C (w2), clima templado subhúmedo con temperatura media anual entre 14 a 20 °C y precipitación anual de 800 a 1,200 mm.

Tabla 4. Porcentaje de territorio por cada municipio.

Estado	Municipio	Porcentaje	
		Total	Parcial
Michoacán de Ocampo		100.00	
	Pátzcuaro		31.34
	Erongarícuaro		17.84
	Tzintzuntzan		17.77
	Quiroga		16.6
	Nahuatzen		7.31
	Tingambato		5.15
	Huiramba		1.68
	Coeneo		1.4
	Salvador Escalante		0.91

La cuenca del Lago de Pátzcuaro presenta una gran variedad de tipos de suelo debido a su diversidad geográfica y climática, incluyendo andosoles, que son suelos volcánicos ricos en nutrientes; vertisoles, que tienen alta capacidad de retención de agua; cambisoles, que se forman en suelos jóvenes y pueden ser fértiles; y luvisoles, que se encuentran en zonas más altas y tienen horizontes de lixiviación. Estos diferentes tipos de suelo influyen en la vegetación, la agricultura y la biodiversidad en la cuenca del Lago de Pátzcuaro (Tabla 5).

Tabla 5. Tipos de suelo en la cuenca del lago de Pátzcuaro.

Código	Descripción
LC	Luvisol crómico
AH	Acrisol húmico
AO	Acrisol órtico
TH	Andosol húmico
TO	Andosol ócrico
BD	Cambisol dístrico
BE	Cambisol éutrico
HL	Feozem lúvico
GM	Gleysol mólico
I	Litosol
LO	Luvisol órtico
LV	Luvisol vértico
WM	Planosol mólico
U	Rankel
VP	Vertisol pélico

La cuenca presenta una variada gama de usos de suelo y tipos de vegetación debido a su topografía, clima y actividades humanas, existen aquí áreas agrícolas, zonas urbanas y suburbanas, bosques y pastizales. De acuerdo con la metodología descrita, los valores del factor de erosividad (R) varían entre 154.24 MJ.mm/ha.h para una PMA de 899.10 mm, y 167.66 MJ.mm/ha.h para una PMA de 997.35 (Tabla 6; Figura 2a).

El factor de erodabilidad del suelo K fue determinado mediante la descarga del mapa de edafología en el portal de CONABIO. Fue necesario hacer una reclasificación para cada uno de los tipos de suelos existentes en la zona. Dicho factor presenta una variación de 0.013 hasta 0.079

Tabla 6. Valor de R para cada estación meteorológica

ID	Estación	Nombre	Pmm Anual	Factor R
1	16050	Huaniqueo	899.10	154.24
2	16055	Jesús del Monte	1044.82	168.89
3	16084	Panindicuaro	916.70	154.11
4	16087	Pátzcuaro	1021.77	164.35
5	16123	Tacámbaro	1104.39	189.00
6	16127	Taretan (CFE)	1019.34	169.73
7	16142	Zacapu (DGE)	905.86	153.51
8	16146	Zirahuén	997.35	167.66

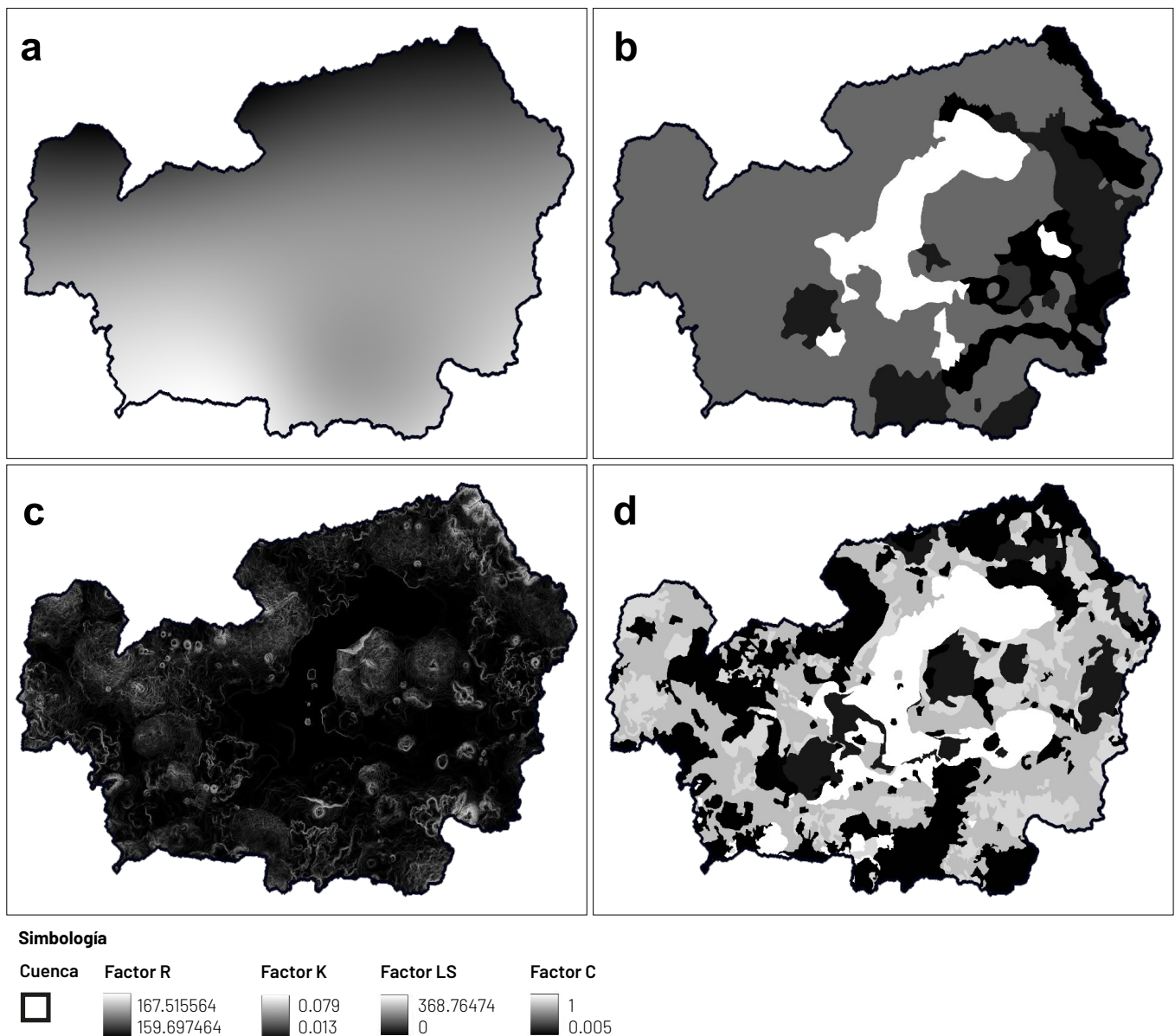


Figura 2. Factores de la Ecuación Universal de Perdida de Suelo a) Factor R (MJ.mm/ha.h), b) Factor K (ton.h/MJ.mm), c) Factor LS, d) Factor C.

ton.h/MJ.mm. Para los cuerpos de agua se considera un valor de 1.00 (**Figura 2b**).

Referente al factor LS (**Figura 2c**), los valores más altos representan las pendientes pronunciadas y los valores más bajos son las zonas de planicie. Para este caso, en las partes altas presentan un valor de 368.76 y en las partes bajas de 0.013.

El factor de cobertura vegetal C (**Figura 2d**) se obtuvo de la información de uso de suelo y vegetación, escala 1:250000 del año 2021 de la CONABIO, este factor presenta valores desde 0.005 a 0.85. Teniendo en cuenta que para los cuerpos de agua el valor es 1.00.

Con todos los factores que integran la ecuación USLE debidamente recopilados, solo resta multiplicar estos valores en un solo producto para obtener la erosión hídrica. Los valores resultantes se dividieron en 6 rangos de acuerdo con la **Tabla 7** y se muestran en la **Figura 3**.

En la **Tabla 8**, se puede ver cómo está distribuida la erosión hídrica en toda la cuenca del Lago de Pátzcuaro.

Tabla 7. Tolerancias establecidas por la FAO

Nivel de erosión	T/ha/año
Normal	<0.5
Ligera	0.5-5
Moderada	5-15
Severa	15-50
Muy Alto	50-200
Catastrófica	>200

Tabla 8. Distribución de la erosión hídrica en la cuenca

Nivel de erosión	T/ha/año	Superficie afectada en km ²	Superficie afectada en %
Normal	<0.5	32.48	4.44%
Ligera	0.5-5	174.35	23.83%
Moderada	5-15	114.8	15.69%
Severa	15-50	123.67	16.91%
Muy Alto	50-200	168.09	22.98%
Catastrófica	>200	118.13	16.15%

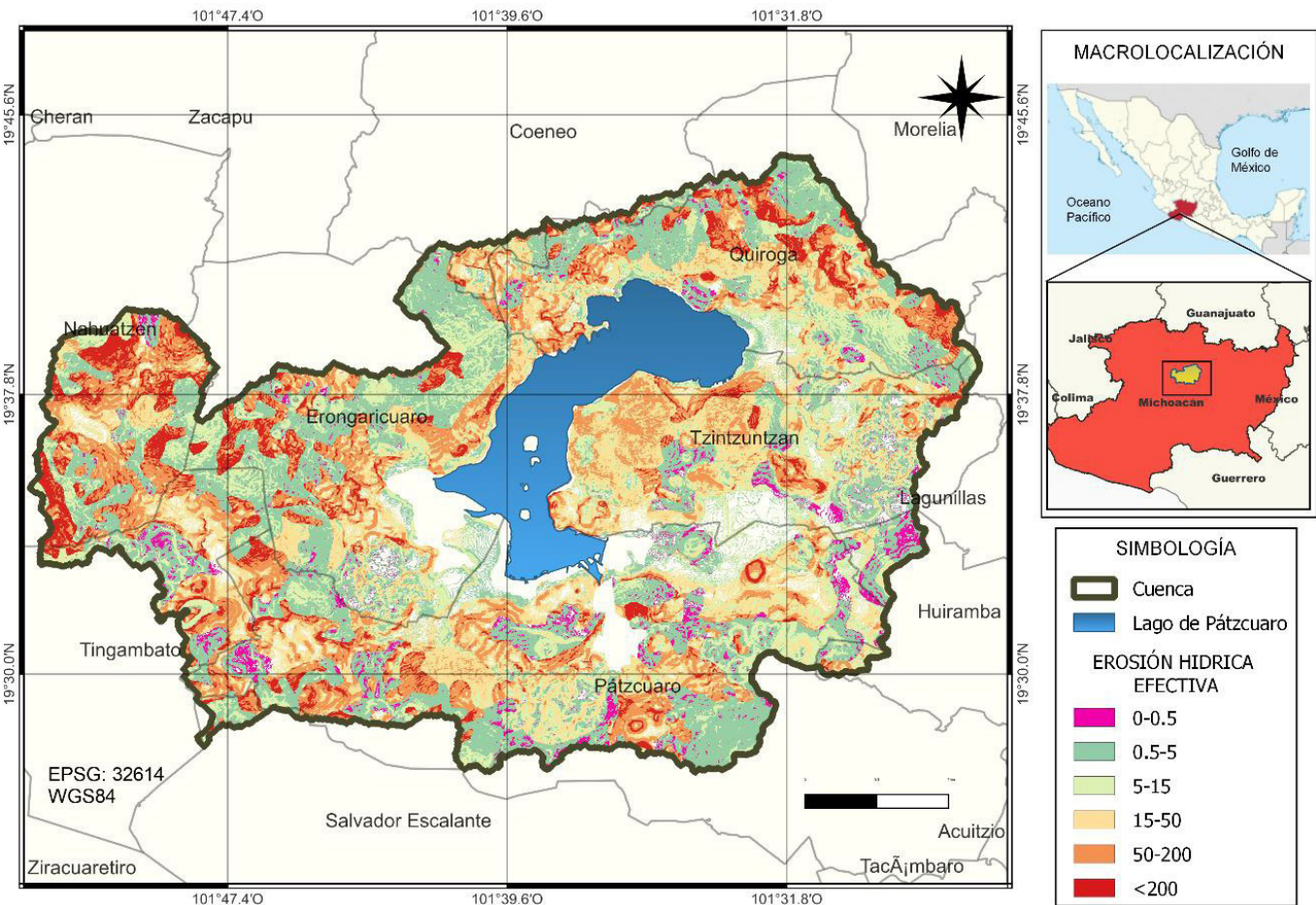


Figura 3. Mapa Erosión Hídrica Efectiva.

Conclusiones

La aplicación de la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (USLE) en la cuenca del Lago de Pátzcuaro ha arrojado luz sobre los desafíos y las oportunidades para la conservación y el manejo sostenible de este ecosistema. Mediante la evaluación de los factores de erosión, como la erosividad de la lluvia, la pendiente y el uso del suelo, se ha logrado comprender mejor los procesos que influyen en la pérdida de suelo en la región. También ha permitido identificar áreas vulnerables a la erosión y focalizar los esfuerzos de conservación en sectores críticos, y proporciona una base científica para la toma de decisiones informadas en términos de planificación territorial, promoción de prácticas agrícolas sostenibles y protección de los recursos hídricos del lago.

Los resultados de esta aplicación han sido cruciales para sensibilizar a las comunidades locales y a las partes interesadas sobre la importancia de abordar la erosión del suelo en un entorno de crecimiento económico y desarrollo. No obstante, es esencial destacar que la aplicación de la USLE es solo un componente de un enfoque integral para la gestión de la cuenca del Lago de Pátzcuaro. Las soluciones efectivas deben ser multidisciplinarias e involucrar a las partes interesadas, desde agricultores hasta autoridades gubernamentales. Además, la recopilación continua de datos precisos y la actualización de los factores de la USLE son cruciales para mantener la eficacia de las estrategias de conservación a lo largo del tiempo. Su éxito dependerá de la colaboración continua y la implementación de medidas holísticas que promuevan la sostenibilidad ambiental y el bienestar de las comunidades locales en esta región emblemática.

Agradecimientos

Se agradece al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías (CONAHCYT), por el apoyo económico de una Beca para realizar estudios de posgrado en la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.

Referencias

Alvarado-Cardona M, Colmenero RJA, Valderrábano AML (2007). La erosión hídrica del suelo, en un contexto ambiental, en el estado de Tlaxcala. *Ciencia ergo sum* 14(3):317-326.

Carro MM, Dávila JI, Balandra AG, López RH, Delgadillo RH, Chávez JS, Inclán LB. (2008). Importance of diffuse pollution control in the Patzcuaro Lake Basin in Mexico. *Water Sci Technol*. 58(11):2179-86. doi: 10.2166/wst.2008.820.

CLICOM. (2018). Climate Computing Project. CICESE. <http://cli-com-mex.cicese.mx/>

Fisher CT, Pollard HP, Israde-Alcántara I, Garduño-Monroy VH, Banerjee SK (2003). A reexamination of human-induced environmental change within the Lake Pátzcuaro Basin, Michoacán, Mexico. *Proc Natl Acad Sci U S A*. 100(8):4957-62. doi: 10.1073/pnas.0630493100.

Fu BJ, Zhao WW, Chen LD, Zhang QJ, Lü YH, Gulinek H, Poesen J (2005). Assessment of soil erosion at large watershed scale using RUSLE and GIS: a case study in the Loess Plateau of China. *Land Degradation & Development* 16 (1):73-85.

Giller KE, Andersson JA, Corbeels M, Kirkegaard J, Mortensen D, Erenstein O, Vanlauwe B. (2015). Beyond conservation agriculture. *Front Plant Sci*. 6:870. doi: 10.3389/fpls.2015.00870.

INEGI. (2020). Cuenca hidrológica Lago de Pátzcuaro. www.inegi.org.mx

Lal R, Monger C, Nave L, Smith P. The role of soil in regulation of climate (2021). *Philos Trans R Soc Lond B Biol Sci*. 376(1834):20210084. doi: 10.1098/rstb.2021.0084.

Medina H (2006). Dinámica de nutrientes en el litoral lacustre del Lago de Pátzcuaro, michoacán. Tesis de Maestría, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Morelia.

Montes León MAL (2002) Predicción de la Erosión Hídrica para la Elaboración de Planes de Conservación de Suelos a Nivel Cuenca. Tesis de Maestría en Ciencias en Ingeniería. División de Estudios de Posgrado, Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Querétaro 110 pp.

Nieves J, García L, Cardoza R (2001). La degradación de los suelos en México. In: Palacio P JL, González LL, Vázquez-Selem L, Bocco G, McClung E, Alcántara I, Imbar M, Sala M (Organizing committee). *Proceeding of the International Symposium on Land Degradation*. May 7-14. IGV. Commission on Land Degradation and Desert of Geography (COMLAND), Institute of Geography, Institute of Ecology, Institute of Anthropology, and National Autonomous University of Mexico (UNAM), México.

Renard KG, Foster GR, Weesies GA, McCool DK, Yoder DC (1997). Predicting soil erosion by water: a guide to conservation planning with the revised universal soil loss equation (RUSLE). *Agriculture Handbook Number 703*. Washington, D.C.: USDA-ARS.

SEMARNAT (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales) (2002). Evaluación de la degradación del suelo causado por el hombre en la República Mexicana Escala 1:250.000. Memoria Nacional. México, D. F. 76 pp.

Uribe GS, Nicolás N, Turrent A (2002). Pérdida de suelo y nutrimentos en un entisol con prácticas de conservación en los Tuxtlas, Veracruz, México. *Agrociencia* 36: 161-168.

Wischmeier W y Smith D (1978). "Predicting rainfall erosion losses", *Agriculture Handbook 537*, U.S. Department of Agriculture, Agricultural Research Service, Washington, D. C.



Glicerol renovable: retos y oportunidades para su valorización en México

Renewable glycerol: challenges and opportunities for its valorization in Mexico

Jahaziel Alberto Sánchez Gómez, Fernando Israel Gómez Castro* , Salvador Hernández

Universidad de Guanajuato, Campus Guanajuato, División de Ciencias Naturales y Exactas, Departamento de Ingeniería Química, Noria Alta S/N Col. Noria Alta, Guanajuato, Guanajuato, México 36050.

Historial

Manuscrito recibido: 15 de noviembre de 2024

Manuscrito aceptado: 29 de marzo de 2025

Manuscrito publicado: abril 2025

*Autor para correspondencia

Fernando Israel Gómez Castro

fgomez@ugto.mx

ORCID: 0000-0003-4906-063X

Resumen

El glicerol se puede obtener a partir en los procesos de producción de biodiésel, en constante aumento. Como ejemplo, la producción mundial de biodiésel en 2021 generó más de 4.5 billones de litros de glicerol. Debido al exceso en el volumen de glicerol producido, se le ha llegado a considerar como un inconveniente financiero y medioambiental para la industria del biodiésel, surgiendo la necesidad de buscar alternativas para aprovechar el glicerol como una fuente renovable para la obtención de productos químicos que representen un considerable beneficio económico. Por otra parte, México cuenta con un gran potencial para producir biodiésel a partir de aceites de palma africana, higuera y *Jatropha*, estimándose un potencial de producción de hasta 368 millones de litros de biodiésel para el año 2030. Por ello, en este artículo se presentan algunos de los retos y oportunidades que ofrece la valorización del glicerol en México, un país que busca impulsar el uso de biocombustibles y desarrollar una industria química verde y sustentable.

Palabras clave: Glicerol, biodiésel, biocombustibles, industria química, sustentabilidad

Abstract

Glycerol can be obtained from biodiesel production processes, which are constantly increasing. To exemplify it, global biodiesel production generated more than 4.5 billion liters of glycerol in 2021. Due to the excessive volume of produced glycerol, it has come to be considered a financial and environmental challenge for the biodiesel industry. Therefore, it has become necessary to look for alternatives to use glycerol as a renewable source for obtaining chemical products that represent a considerable economic profit. On the other hand, Mexico has great potential to produce biodiesel from African palm, castor and *Jatropha* oils, with estimations of a production potential of up to 368 million litres of biodiesel by 2030. This article therefore presents some of the challenges and opportunities offered by the valorization of glycerol in Mexico, a country that seeks to promote the use of biofuels and develop a green and sustainable chemical industry.

Keywords: Glycerol, biodiesel, biofuels, chemical industry, sustainability.

Producción de biodiésel

El agotamiento de las reservas de petróleo y la contribución al calentamiento global asociada a la constante emisión de gases de efecto invernadero han orientado a los países a realizar ajustes en sus políticas energéticas (Nordin *et al.*, 2024). Los biocombustibles representan una alternativa al uso de combustibles fósiles, con la finalidad de reducir el impacto ambiental asociado a la satisfacción de la demanda de energía en los sectores de transporte e industrial. Debido a estas nuevas políticas, la producción de bioetanol y biodiésel ha incrementado

drásticamente (Osman *et al.*, 2024, Sandid *et al.*, 2024). Sin embargo, uno de los principales problemas asociados con la generación de biocombustibles es su alto costo de producción, lo cual se refleja en el precio final al usuario (Karimi *et al.*, 2024). Estos costos pueden reducirse si los residuos de los procesos de producción se aprovechan para la obtención de productos adicionales, los cuales tengan un alto valor en el mercado.

Uno de los biocombustibles más conocidos es el biodiésel, el cual se obtiene a partir de aceites vegetales o grasas animales mediante una reacción química llamada

transesterificación (Asfaw *et al.*, 2025; Kosuru *et al.*, 2024). El biodiésel suele ser utilizado como sustituto o aditivo del diésel convencional con beneficios medioambientales, ya que se obtiene a partir de fuentes renovables y, por otra parte, al emplearse en motores diésel se libera una menor cantidad de gases de efecto invernadero (Naseef y Tulaimat, 2025).

Los recursos renovables que son utilizados para la producción de biodiésel se clasifican en aceites vegetales comestibles (de soya, canola, palma y girasol), aceites vegetales no comestibles (de *Jatropha*, higuierilla, piñón mexicano, entre otros), grasas animales (sebo bovino, manteca porcina, etcétera) y aceites de microalgas (Asfaw *et al.*, 2025; Moreno-Cruz *et al.*, 2025; Anil *et al.*, 2024). En la **Figura 1** se ilustran algunas de las fuentes de materia prima para la generación de biodiésel. Entre estas fuentes renovables, los cultivos con mayor potencial para la producción de biodiésel en México son la *Jatropha*, higuierilla, sorgo dulce y palma africana (Sosa-Rodríguez, 2021). Estos cultivos cuentan con la ventaja de poder crecer en zonas áridas o marginales, sin afectar la producción de cultivos alimenticios (Vega *et al.*, 2024). Asimismo, tienen un alto contenido de aceite. Por ejemplo, se ha reportado que por cada kilogramo de *Jatropha* cultivada es posible obtener hasta 2.6 litros de aceite, los cuales podrían ser aprovechados para la obtención de biodiésel (Sosa-Rodríguez, 2021).

De acuerdo con información reportada por SAGARPA, se estima que México cuenta con un gran potencial para producir biodiésel a partir de aceite de palma africana, higuierilla y *Jatropha*. Se estima, que para el 2030, México podría contar con un potencial de producción de

más de 368 millones de litros de biodiésel (SAGARPA, 2017). Sin embargo, en la actualidad la producción de biocombustibles en México afronta varios impedimentos ocasionados principalmente con la falta de políticas que establezcan marcos regulatorios y normativos que incentiven la inversión y comercialización (Aguilar-Aguilar *et al.*, 2025). Asimismo, es necesario el desarrollo de tecnologías e infraestructura adecuadas para su producción a gran escala (Sosa-Rodríguez *et al.*, 2021). Por ello, en México la producción de biodiésel es aún incipiente y existen muy pocos proyectos y plantas que busquen aprovechar el potencial de producción de este combustible renovable.

Glicerol: un sub-producto de la producción de biodiésel

El glicerol, también conocido como glicerina, es un importante co-producto en la industria de biodiesel (Lai *et al.*, 2025; Kaur *et al.*, 2020). Se estima que, por cada 10 litros de biodiésel generado, se obtiene 1 litro de glicerol. Con base en la producción mundial de biodiésel en el 2021, se estima que solo en ese año, se generaron más de 4.5 billones de litros de glicerol crudo. El glicerol es un compuesto valioso que se utiliza en una variedad de áreas como alimentos, bebidas, productos farmacéuticos y cosméticos (REN21, 2022), y posee una excelente capacidad humectante, la cual se ha aprovechado para la producción de jabones y cremas para el cuidado de la piel.

El rápido desarrollo de la industria del biodiésel en el mundo ha generado una gran cantidad de glicerol crudo como co-producto, ocasionando una sobreoferta y la

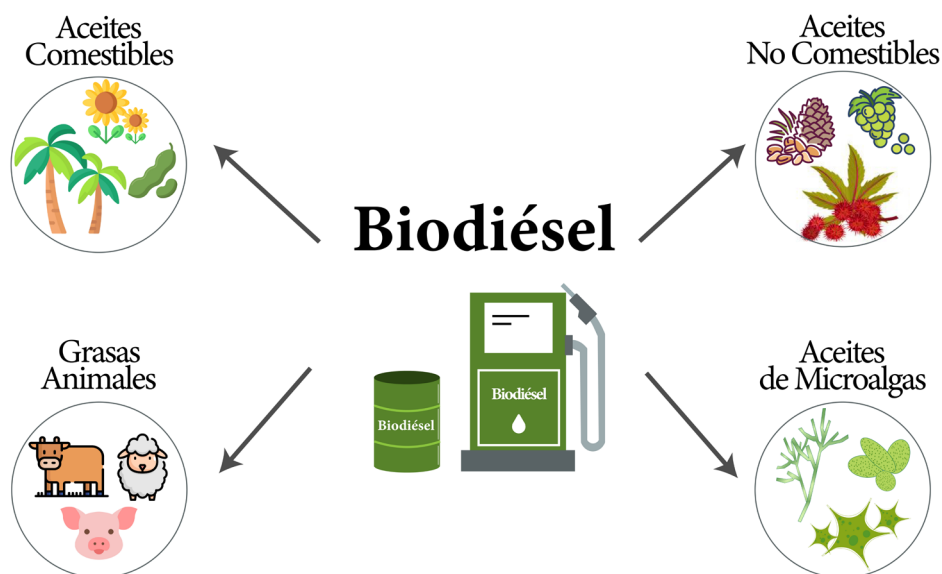


Figura 1. Fuentes de materia prima para la producción de biodiésel.

consecuente reducción en los precios de venta, lo cual a su vez afecta la economía del proceso de producción de biodiésel (Kumawat *et al.*, 2024; Sandid *et al.*, 2024). Con la finalidad de reducir las grandes cantidades de glicerol producidas, se han buscado alternativas para el uso de este subproducto (Tomatis *et al.*, 2024). Entre los usos directos del glicerol crudo (de baja pureza) se incluyen su combustión directa para la generación de calor y energía; y su utilización como alimento de rumiantes debido a su aporte energético (Zacaroni *et al.*, 2022; Zhang *et al.*, 2022). Sin embargo, dichos usos no representan un beneficio económico.

Por otra parte, el glicerol crudo contiene principalmente glicerol y agua, junto con pequeñas cantidades de catalizador, metanol y ésteres metílicos de ácidos grasos en diferentes proporciones (Bansod *et al.*, 2024; Tomatis *et al.*, 2024). Por ello, es necesario remover las impurezas presentes en el glicerol crudo con la finalidad de utilizarse en las industrias de alimentos, farmacéutica, cosméticos y tabaco. Sin embargo, dicha purificación implica complicados procesos de filtración y destilación que consumen grandes cantidades de energía, aumentando así los costos de producción (Jayabal, 2024). Por otra parte, las grandes cantidades de glicerol crudo producidas cada año han impactado en el mercado del glicerol, dando como resultado una disminución significativa en los precios de venta (Elsayed *et al.*, 2024). Ante estos

escenarios, se ha llegado a considerar al glicerol como un inconveniente financiero y medioambiental para la industria del biodiésel y, surge la necesidad de buscar alternativas para el aprovechamiento y utilización del glicerol como una fuente renovable para la obtención de productos químicos que representen un considerable beneficio económico. Algunos derivados del glicerol con potencial económico se describen en la siguiente sección.

Productos de alto valor agregado

Entre los productos químicos que pueden obtenerse del glicerol, se encuentran combustibles como hidrógeno, etanol o metano; solventes como el ácido láctico, la acetona o el propilenglicol; o precursores para la síntesis de polímeros como la epiclorhidrina (Sandid *et al.*, 2024; Wang *et al.*, 2024a; Muraza, 2019). En la **Figura 2** se resumen algunos de los derivados químicos más interesantes de glicerol. El carbonato de glicerol es un compuesto químico ecológico, biodegradable, de baja toxicidad y alta versatilidad, con aplicaciones industriales como solvente para detergentes, cosméticos y en baterías de iones de litio (Pattanaik *et al.*, 2025). Alternativamente, el carbonato de glicerol es también utilizado como materia prima en la producción de glicidol, el cual es un compuesto de gran importancia en la industria farmacéutica, cosmética y de plásticos (Lai

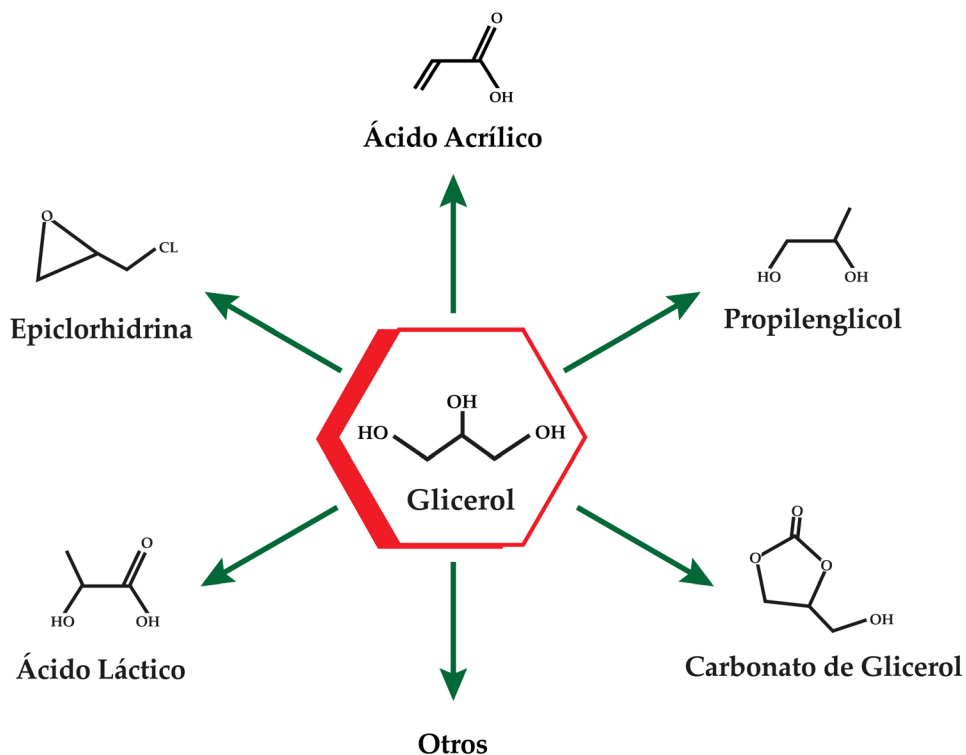


Figura 2. Derivados químicos del glicerol.

et al., 2025).

Por otra parte, el ácido acrílico es utilizado para la síntesis de adhesivos, pinturas, plásticos y polímeros superabsorbentes (Rasrendra *et al.*, 2024; Sandid *et al.*, 2023). En 2020, se estima que la producción mundial de ácido acrílico ascendió a más 7.2 millones de toneladas, de los cuales la mayor parte fue producida mediante la oxidación parcial de propileno (Rasrendra *et al.*, 2024). Teniendo en cuenta que el propileno es producido a partir de fuentes fósiles, la producción selectiva de ácido acrílico a partir de glicerol aparece como una alternativa sostenible y más económica que la producción convencional.

El ácido láctico es un importante producto químico utilizado como disolvente ecológico, neutralizante y agente de limpieza (Song *et al.*, 2024; Akbulut *et al.*, 2022). Además, el ácido láctico es utilizado como materia prima para la producción de polímeros biodegradables como el poli (ácido láctico). En la actualidad, el ácido láctico se produce mediante procesos de fermentación, los cuales han demostrado tener bajos rendimientos y elevados costos de purificación (Li *et al.*, 2021). Otro producto químico de interés es el propilenglicol, un líquido con baja toxicidad utilizado como anticongelante automotriz y solvente industrial, y también como solvente farmacéutico, ingrediente en cosméticos y aditivo en alimentos procesados para consumo humano y animal (Brobbe *et al.*, 2024).

La epíclorhidrina es un precursor en la síntesis de muchos compuestos orgánicos, utilizada principalmente en la fabricación de glicerol sintético y resinas epoxi (Lari *et al.*, 2018). Tradicionalmente, la epíclorhidrina se produce por la epoxidación del propileno. Sin embargo, su síntesis de dos pasos a partir de glicerol está siendo cada vez más utilizada debido a la utilización de glicerol renovable y el bajo costo de este (Almena y Martín, 2016).

Según información de Data México, en el 2022, las compras internacionales de ácido acrílico, propilenglicol, ácido láctico y epíclorhidrina fueron de más de 151 millones de dólares, siendo las compras internacionales mucho mayores que las ventas (151.7 millones de dólares frente a 10.6 millones de dólares) (Gobierno de México, 2024). Esto es un indicador de la necesidad y oportunidad para la producción y venta de estos productos a nivel nacional. La **Tabla 1** resume las compras y ventas internacionales de dichos productos químicos en México. Si consideramos las estimaciones dadas por SAGARPA, en el 2030 se podrían obtener más de 36 millones de litros de glicerol crudo, los cuales pueden ser aprovechados para la generación de

Tabla 1. Compras y ventas internacionales de productos químicos en México en el 2022.

Producto químico	Compras, millones de dólares	Ventas, millones de dólares
Ácido acrílico	44.7	2.51
Propilenglicol	69.7	7.54
Ácido láctico	32.7	0.554
Epíclorhidrina	4.59	0.003

productos químicos de alto valor agregado, abriendo la oportunidad para cubrir la demanda nacional de algunos productos químicos como el propilenglicol y ácido acrílico.

Como se observa, la alta abundancia y bajo precio hacen del glicerol una materia prima atractiva para el desarrollo de una biorrefinería, es decir, un conjunto de procesos de producción de una diversidad de derivados de materias primas renovables. Además, existe una gran variedad de productos químicos para la valorización del glicerol, así como una buena oportunidad económica en su generación y venta. Sin embargo, es necesario determinar qué productos y rutas de procesamiento son los más adecuados no solo desde un punto de vista económico, sino también considerando el aspecto ambiental.

Rutas de valorización de glicerol

La transformación de glicerol en productos de alto valor agregado es posible de realizar mediante rutas de conversión biológicas, termoquímicas y químicas (Asopa *et al.*, 2022; Alashek *et al.*, 2022; Raza *et al.*, 2021). Los métodos de transformación biológica se centran en la utilización de microorganismos y enzimas para la conversión de glicerol en productos útiles como etanol, ácido cítrico, ácido láctico, entre otros compuestos (Asopa *et al.*, 2022). En comparación con las rutas químicas y termoquímicas, las rutas biológicas tienen varias ventajas como una mayor tolerancia a las impurezas, ser más amigables al ambiente y su operación a condiciones ambientales de temperatura y presión (Zhu *et al.*, 2024). Sin embargo, si bien la ruta bioquímica es una ruta prometedora, existen algunos desafíos asociados al bajo rendimiento a los productos de interés, los tiempos de reacción considerablemente largos y la dificultad de utilizar microorganismos a una escala industrial.

Por otro lado, la ruta termoquímica consiste en la transformación del glicerol mediante la integración de energía en forma de calor (Raza *et al.*, 2021). Un buen ejemplo de un proceso termoquímico es la combustión. Si

bien esta ruta de conversión permite transformar grandes cantidades de glicerol, dicha degradación térmica conduce a la emisión de gases tóxicos a la atmósfera. Es por ello por lo que los métodos termoquímicos de pirólisis, gasificación o reformado de vapor son más apropiados para la transformación de glicerol en hidrogeno y metano, los cuales a su vez se emplean en la generación de energía (Mourão *et al.*, 2023).

Entre los diferentes procesos químicos para la valorización de glicerol se encuentran las reacciones de oxidación, hidrogenólisis, deshidratación, esterificación, polimerización y carboxilación (Alashek *et al.*, 2022, Akbulut *et al.*, 2022). Por ejemplo, en la reacción de oxidación, los principales derivados químicos a obtener del glicerol son el ácido glicérico, la dihidroxiacetona, el ácido láctico, el ácido mesoxálico y el ácido oxálico, además de algunos productos intermedios como gliceraldehído y ácido glicólico (Wang *et al.*, 2024b).

Como se comentó anteriormente, las grandes cantidades de glicerol crudo producidos cada año han generado la disminución del precio de venta del glicerol. Sin embargo, la valorización del glicerol generado por la industria del biodiésel podría compensar el costo de producción del biocombustible y fomentar un crecimiento del mercado. Además, aunque se ha estudiado ampliamente la utilización de glicerol crudo para la generación de productos de alto valor, las rutas de procesamiento aún requieren de mayor investigación y desarrollo para su implementación a escala industrial. Asimismo, en pro de mejorar la sostenibilidad económica de una biorrefinería de glicerol, se deben desarrollar rutas químicas selectivas, con bajos requerimientos de energía, poca producción de residuos, y que proporcionen un considerable aporte económico y cuenten con un mercado potencial.

Ventajas y retos en la valorización de glicerol

La valorización del glicerol se presenta como una estrategia prometedora para aprovechar el excedente de este subproducto del biodiésel y convertirlo en productos químicos útiles para diversas industrias. Entre las ventajas de la valorización del glicerol renovable se encuentran:

- Impulsa la sostenibilidad económica de la industria del biodiésel. La valorización del glicerol como subproducto del biodiésel permite mejorar la rentabilidad de la industria del biodiésel. Al transformar el glicerol en productos de alto valor agregado como ácido acrílico o propilenglicol, por mencionar alguno, se genera

una nueva fuente de ingreso e incrementa la eficiencia de los procesos.

- El desarrollo de una industria química verde y sostenible en México. El aprovechar el glicerol como materia prima no solo mejora la rentabilidad de la industria del biodiésel, también contribuye a la reducción de residuos y permite que otras empresas adopten procesos productivos más sustentables.
- Fortalece la competitividad del sector químico en México. La integración del glicerol en la economía circular adopta prácticas responsables que cumplen con los estándares internacionales y promueven el uso de materias primas amigables al ambiente. Por otra parte, la colaboración entre el gobierno, el sector privado y el ámbito académico es esencial para el desarrollo de nuevas tecnologías y avanzar hacia una industria químicas más innovadora, rentable y responsable con el medio ambiente.

Sin embargo, la valorización del subproducto del biodiésel también implica varios retos económicos, ambientales y tecnológicos que deben ser abordados para lograr una implementación exitosa. Algunos de estos retos son:

- Diseñar procesos de transformación eficientes, selectivos y estables que permitan obtener los productos deseados con altos rendimientos y bajos costos. Como se mencionó en el documento, existen diversas rutas químicas, biológicas y hasta termoquímicas para la valorización del glicerol. En muchas de ellas se obtiene el producto deseado junto con algunos coproductos, impactando directamente en la cantidad del producto final.
- Desarrollar procesos integrados que optimicen el uso de energía, agua y materias primas, así como la separación y recuperación de los productos. Debido a la presencia de impurezas en el glicerol crudo y la generación de productos no deseados en las rutas químicas de valorización, es necesario el desarrollo de procesos tecnológicos que permitan una reducción significativa de los costos de producción, generen una menor cantidad de residuos y sean energéticamente más eficientes que los procesos convencionales.
- Evaluar el impacto económico y ambiental de los diferentes productos y procesos mediante análisis de ciclo de vida y análisis multicriterio. Ya que el glicerol

es un coproducto generado en la producción de biodiésel, el aspecto ambiental no debe dejarse de lado. En este sentido, es necesario determinar qué productos de alto valor agregado son más favorables y no solo desde un punto de vista económico sino también considerar el impacto ambiental de este. Además, este tipo de análisis multicriterio permite contar con una perspectiva más amplia de las ventajas y desventajas entre los múltiples productos de alto valor agregado.

Conclusiones

En este trabajo se ha analizado el potencial de valorización del glicerol obtenido como co-producto en la producción de biodiésel, a través de su conversión en productos de valor agregado, tales como el ácido láctico, el ácido acrílico, y el propilenglicol. Estos derivados presentan diversas aplicaciones en industrias como la cosmética, farmacéutica, alimenticia, entre otras. El uso del glicerol como materia prima para la generación de dichos productos se percibe como una estrategia para incrementar el potencial económico de la industria de biodiésel en México, aumentando así el interés por fomentar su crecimiento. Es necesario continuar con la innovación tecnológica con el fin de mejorar la eficiencia de los procesos de conversión del glicerol, así como reducir sus costos, también es de gran importancia asegurar que dichas rutas de conversión no representan un impacto ambiental significativo.

Referencias

- Aguilar-Aguilar FA, Mena-Cervantes VY, Hernández-Altamirano R (2025). Analysis of public policies and resources for biodiesel production in México. *Biomass and Bioenergy* 196:107762.
- Akbulut D, Özkar S (2022). A review of the catalytic conversion of glycerol to lactic acid in the presence of aqueous base. *RSC advances* 12(29):18864-18883.
- Alashek F, Keshe M, Alhassan G (2022). Preparation of glycerol derivatives by entered of glycerol in different chemical organic reactions: a review. *Results in Chemistry* 4:100359.
- Almena A, Martín M (2016). Technoeconomic analysis of the production of epichlorohydrin from glycerol. *Industrial Engineering Chemistry Research* 55(12):3226-3238.
- Anil N, Rao PK, Sarkar A, Kubavat J, Vadivel S, Manwar NR, Paul B (2024). Advancements in sustainable biodiesel production: A comprehensive review of bio-waste derived catalysts. *Energy Conversion and Management* 318:118884.
- Asfaw MD, Yadeta AT, Yewalie BG, Negash YW (2025). Production and characterization of biodiesel from *Argemone mexicana* seed oil. *Results in Chemistry* 102055.
- Asopa RP, Bhoi R, Saharan VK (2022). Valorization of glycerol into value-added products: a comprehensive review on biochemical route. *Bioresource Technology Reports* 20:101290.
- Bansod Y, Crabbe B, Forster L, Ghasemzadeh K, D'Agostino C (2024). Evaluating the environmental impact of crude glycerol purification derived from biodiesel production: A comparative life cycle assessment study. *Journal of Cleaner Production* 437:140485.
- Brobbey MS, Louw J, Görgens, JF (2024). Biobased propylene glycol production in a sugarcane biorefinery through lactic acid, glycerol, or sorbitol: a techno-economic and environmental evaluation of intermediates and downstream processing methods. *Biochemical Engineering Journal* 205:109292.
- Elsayed M, Eraky M, Osman AI, Wang J, Farghali M, Rashwan A, Yacoub IH, Hanelt D, Abomohra A (2024). Sustainable valorization of waste glycerol into bioethanol and biodiesel through biocircular approaches: a review. *Environ Chem Lett.* 22:609-634.
- Gobierno de México. (2024). "Data México", <https://www.economia.gob.mx/datamexico/es/explore?profile=product>, [consultado el 14 de agosto de 2024].
- Jayabal R (2024). Advancements in catalysts, process intensification, and feedstock utilization for sustainable biodiesel production. *Results in Engineering* 103668.
- Karimi M, Simsek H, Kheiralipour K (2024). Advanced biofuel production: A comprehensive techno-economic review of pathways and costs. *Energy Conversion and Management: X* 100863.
- Kaur J, Sarma AK, Jha MK, Gera P (2020). Valorisation of crude glycerol to value-added products: Perspectives of process technology, economics and environmental issues. *Biotechnology Reports* 27:e00487.
- Kosuru SMY, Delhiwala Y, Koorla PB, Mekala M (2024). A review on the biodiesel production: Selection of catalyst, pre-treatment, post treatment methods. *Green Technologies and Sustainability* 2(1):100061.
- Kumawat S, Singh S, Bhatt T, Maurya A, Vaidyanathan S, Natte K, Jagadeesh RV (2024). Valorization of bio-renewable glycerol by catalytic amination reactions. *Green Chemistry* 26(6):3021-3038.
- Lai LY, Lau PC, Kwong TL, Yung KF (2025). Transesterification of glycerol with dimethyl carbonate for the synthesis of glycerol carbonate and glycidol by Iron (III) salen complex. *Journal of Organometallic Chemistry* 1025:123467.
- Lari GM, Pastore G, Mondelli C, Pérez-Ramírez J (2018). Towards sustainable manufacture of epichlorohydrin from glycerol using hydrotalcite-derived basic oxides. *Green Chemistry* 20(1):148-159.
- Li C, Gao M, Zhu W, Wang N, Ma X, Wu C, Wang Q (2021). Recent advances in the separation and purification of lactic acid from fermentation broth. *Process Biochemistry* 104:142-151.

- Pattanaik PP, Pradhan S, Bej A, Pradhan G (2025). Solid waste derived heterogeneous catalysts for synthesis of sustainable glycerol carbonate from glycerol. *Biomass and Bioenergy* 193:107598.
- Rasrendra CB, Culsum NT, Rafiani A, Kadja GT (2023). Glycerol valorization for the generation of acrylic acid via oxidehydration over nanoporous catalyst: Current status and the way forward. *Bioresource Technology Reports* 23:101533.
- REN21 (2022). Renewables 2022 Global Status Report (Paris: REN21 Secretariat). https://www.ren21.net/wp-content/uploads/2019/05/GSR2022_Full_Report.pdf
- Mourão LC, de Souza GBM, Dias IM, Oliveira SB, de Souza TL, Alonso CG (2023). Hydrogen production via supercritical water gasification of glycerol enhanced by simple structured catalysts. *International Journal of Hydrogen Energy* 48(72):27929-27943.
- Muraza O (2019). Peculiarities of glycerol conversion to chemicals over zeolite-based catalysts. *Frontiers in Chemistry* 7:233.
- NaseefHH, Tulaimat RH (2025). Transesterification and esterification for biodiesel production: A comprehensive review of catalysts and palm oil feedstocks. *Energy Conversion and Management: X* 100931.
- Nordin I, Elofsson K, Jansson T (2024). Cost-effective reductions in greenhouse gas emissions: Reducing fuel consumption or replacing fossil fuels with biofuels. *Energy Policy* 190:114138.
- Osman WNAW, Rosli MH, Mazli WNA, Samsuri S (2024). Comparative review of biodiesel production and purification. *Carbon Capture Science Technology* 13:100264.
- Raza M, Inayat A, Abu-Jdayil B (2021). Crude glycerol as a potential feedstock for future energy via thermochemical conversion processes: a review. *Sustainability* 13(22):12813.
- Sandid A, Esteban J, D'Agostino C, Spallina V (2023). Process assessment of renewable-based acrylic acid production from glycerol valorisation. *Journal of Cleaner Production* 418:138127.
- Sandid A, Spallina V, Esteban J (2024). Glycerol to value-added chemicals: State of the art and advances in reaction engineering and kinetic modelling. *Fuel Processing Technology* 253:108008.
- Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (2017). Planeación Agrícola Nacional 2017-2030: Bioenergéticos Higuierilla, Jatropha Curcas, Sorgo Dulce Mexicanos. Ciudad de México, SAGARPA.
- Song L, Cai C, Chen Z, Lin C, Lv Y, Ye X, ... Liu M (2024). Lactic acid production from food waste: Advances in microbial fermentation and separation technologies. *Bioresource Technology* 131635.
- Sosa-Rodríguez FS, Vazquez-Arenas J (2021). The biodiesel market in Mexico: Challenges and perspectives to overcome in Latin-American countries. *Energy Conversion and Management: X* 12:100149.
- Tomatis M, Jeswani HK, Azapagic A (2024). Environmental impacts of valorisation of crude glycerol from biodiesel production—A life cycle perspective. *Waste Management* 179:55-65.
- Vega LP, Bautista KT, Campos H, Daza S, Vargas G (2024). Biofuel production in Latin America: A review for Argentina, Brazil, Mexico, Chile, Costa Rica and Colombia. *Energy Reports* 11:28-38.
- Wang H, Li H, Lee CK, Nanyan NSM, Tay GS (2024a). A systematic review on utilization of biodiesel-derived crude glycerol in sustainable polymers preparation. *International Journal of Biological Macromolecules* 261:129536.
- Wang Z, Zhang Y, Wang Y, Li J, Jia X, Wu Z (2024b). Recent progress in glycerol oxidation to lactic acid and pyruvic acid with heterogeneous metal catalysts. *Carbon Resources Conversion* 100250.
- Zacaroni OF, Lopes NM, Júnior GSD, DeVries TJ, Pereira RA, Donkin SS, Pereira MN (2022). Complete replacement of corn grain with crude glycerin for dairy cows. *Livestock Science* 258:104893.
- Zhang J, Wang Y, Muldoon VL, Deng S (2022). Crude glycerol and glycerol as fuels and fuel additives in combustion applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 159:112206.
- Zhu S, Li S, Rene ER, Cheng X, Ma W (2024). Green directional conversion of food waste into glycerol in a two-step differentiation enzymolysis and facultative fermentation using *Saccharomyces cerevisiae*: Performance assessment and mechanism. *Biomass and Bioenergy* 189:107360.

Ciencia Nicolaita

Normas editoriales

Sólo se recibirán materiales originales, inéditos, exclusivamente postulados, en español o inglés, que hagan una aportación relevante al conocimiento de las ciencias físicas, de la vida, matemáticas, químicas, de la salud, ingenierías y arquitectura que en ningún modo difieran de la práctica editorial de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, estipulada en su normativa editorial y vigilada de manera permanente por el Comité Editorial de Ciencia Nicolaita y el Consejo Editorial de la UMSNH.

Las propuestas de contribuciones deberán cumplir con lo siguiente:

1.- El manuscrito siempre **deberá estar acompañada con una CARTA AL EDITOR**, indicando el tipo de contribución que se propone:

- a.- Volúmenes Monográficos** relacionados con las áreas del conocimiento mencionadas y a una **CONVOCATORIA ESPECÍFICA**.
- b.- Artículos extensos** con datos científicos originales que demuestren rigor en su metodología, resultados y discusión
- c.- Artículos de Revisiones** del trabajo científico de investigadores nicolaitas o de externos por invitación
- d.- Artículos de análisis** y debates científicos actuales.
- e.- Reseñas** de temas relevantes obtenidas a partir de obra (libros), entrevistas, congresos y simposios nacionales e internacionales.
- f.- Artículos de educación** de cada área científica con referencias críticas en el desarrollo de técnicas o materiales de enseñanza.
- g.- Noticias** de la comunidad científica universitaria (premios, congresos, patentes, logros).

2.- La presentación del **primer manuscrito deberá ser en formato PDF**, a doble espacio con fuente Times New Roman de 12 puntos. La extensión de los artículos propuestos en general no podrá sobrepasar las 25 cuartillas, y 7 figuras como máximo, incluyendo datos del autor (nombre, adscripción institucional, dirección profesional, correo electrónico, teléfono de contacto e identificador ORCID). Todas las colaboraciones deben contar con un título y resumen en español y otro en inglés (incluidos el título y las palabras clave) que no supere las 120 palabras, además de máximo 5 palabras clave en ambos idiomas.

3.- Las ilustraciones, gráficas, cuadros y tablas se enviarán intercaladas después de su primera mención en el texto en el lugar que corresponda.

4.- EN CASO DE SER ACEPTADO EL MANUSCRITO, las ilustraciones, gráficas, cuadros y tablas se podrán enviar por separado (formatos tiff o jpg a 300 dpi como mínimo), en un archivo “Lista de Figuras y Tablas” (Caption Figures) numerados consecutivamente, o bien incluir figuras de alta calidad en el texto en Word después de su primera mención, las tablas serán incluidas en formato de Word y no como imágenes.

5.- Los textos destinados **a la sección de reseñas y noticias** no podrán exceder las 5 cuartillas, ni comentar libros o artículos que hayan sido publicados hace más de tres años o que no cuenten con ISBN. Los autores de este tipo de colaboraciones deberán incluir una referencia bibliográfica detallada de la obra (autor, título, lugar de edición, editorial, colección, número de páginas e ISBN).

6.- Todo el material del manuscrito (texto y figuras) deberá subirse directamente a la plataforma OJS3/PKP y en paralelo **TAMBIÉN enviar la misma versión** digital a la dirección de correo electrónico: ciencianicolaita.publicaciones@umich.mx

7.- Referencias

Las **referencias a artículos** respetarán el siguiente modelo:

Apellido(s), nombre(s) abreviado seguidos por un punto, fecha, título seguido por una coma, seguido por el nombre de la revista o editorial en *itálicas* sin abreviación, seguido por el número de páginas, p. o pp. Si la referencia cuenta con el registro se deberá indicar el ISSN e incluir el DOI.

Ejemplo: Fitz-Díaz E, Lawton TF, Juárez-Arriaga E, Chávez-Cabello G (2018). The cretaceous-paleogene Mexican orogen: Structure basin development, magmatism and tectonics: *Earth Science Reviews* 183: 56–84.

Para las **referencias a libros o capítulos de libro** se seguirá una regla similar a los artículos, pero en este caso se deberá indicar en *itálica* la Editorial y se deberá indicar el ISBN.

Ejemplo: Fegley E (2013). Practical chemical thermodynamics for geoscientists: *Amsterdam, Academic Press (Elsevier), p. 674. ISBN: 9780128102701.*

Capítulos de libro: Apellidos, nombre(s) abreviados, fecha entre paréntesis, título en letra normal entrecomillado, nombre del autor o autores de la obra colectiva (libro), título de la obra en *itálicas*, lugar de edición, editorial, año de edición y páginas que comprende el capítulo. Se deberá indicar el ISBN.

Las **referencias de tesis** deben comprender lo siguiente:

Nombre y apellido(s) del autor (si lo hay), fecha, título, nombre de la Institución en *itálicas*, señalar el grado de la tesis, indicar si incluye mapas o material audiovisual, seguido por el número de páginas.

Ejemplo: Gómez-Rivera FJ (2019). Análisis petrológico e isotópico del Complejo Batolítico Aquila, suroccidente de México: Tesis de Maestría en Ciencias con especialidad en Geociencias, *Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo*, Pp.103.

Las **referencias hemerográficas** deben comprender lo siguiente:

Nombre y apellido(s) del autor (si lo hay), título abreviado de la nota o artículo (si cuenta con ella), nombre de la publicación en *itálicas*, lugar de impresión, fecha, p. o pp., seguido por el

número de páginas.

Ejemplos: Rafael Nieto Compeán, “Lo que México podría hacer”, *Excélsior*, Ciudad de México, 19 de septiembre de 1921, p. 2A; Sin autor, “La delincuencia en su apogeo”, *El Globo*, Ciudad de México, 23 de febrero de 1925, pp. 1-2.

Las **referencias electrónicas** observan la misma lógica y se integran como sigue:

Apellido(s) y nombre (s) del autor o de la entidad responsable, título en letra normal entrecomillado, título del portal, dirección electrónica y fecha de consulta entre corchetes.

Ejemplo: The United Nations Office at Geneva (Library & Archives), “Mandate of the Institutional Memory Section”, [http://www.unog.ch/80256EE60057D930/\(httpPages\)/555411BC07897556C1257C85004A5725?OpenDocument](http://www.unog.ch/80256EE60057D930/(httpPages)/555411BC07897556C1257C85004A5725?OpenDocument) [consultado el 14 de febrero de 2021].

8. No se aceptará ninguna contribución que no se ajuste a estas normas técnicas.

9.- Acerca de la Revisión

Todos los artículos serán enviados a dictamen doble ciego con especialistas externos y/o extranjeros (el formato de dictamen es público y puede consultarse en el sitio electrónico de la revista), cuyo resultado será sancionado por el editor de la publicación, quien, a través de un tercer dictamen, en el caso de ambigüedad o controversia, podrá determinar, solo o en compañía del Comité Editorial, el resultado del procedimiento. El Comité Editorial y el editor de la revista se reservan el derecho de solicitar modificaciones no previstas en los dictámenes para aprobar la publicación de estas colaboraciones. El autor será notificado del resultado de los anteriores en un periodo no mayor a dos meses.

10.- Todos los autores recibirán un ejemplar de la edición en formato PDF y al aceptar su publicación se acepta de manera implícita y legal otorgar los derechos de reproducción de sus respectivas colaboraciones a la revista *Ciencia Nicolaita* y a la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, a fin de que puedan ser editadas, publicadas y difundidas tanto en versión impresa como electrónica.

11.- El contenido de los artículos es responsabilidad exclusiva de los autores y no refleja en modo alguno el punto de vista de la Revista *Ciencia Nicolaita* o de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.

Artículos aceptados

Después del proceso de arbitraje, el dictamen sobre la aceptación o rechazo del trabajo será comunicado por el Editor al autor responsable, con las indicaciones correspondientes que sustenten la decisión emitida.

Página legal y créditos

CIENCIA NICOLAITA, año 33 no. 93, abril de 2025, es una publicación cuatrimestral editada por la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo a través de la Coordinación de la Investigación Científica, Av. Francisco J. Mújica, s/n, Ciudad Universitaria, C.P. 58030, Tel. 443 316 74 36, 443 327 23 66, y 443 322 35 00, <http://www.cic.cn.umich.mx>, ciencianicolaita.publicaciones@umich.mx. Editor: Dr. José López Bucio. Reserva de Derechos al Uso Exclusivo No. 04-2013-072913082200-203, ISSN: 2007-7068, ambos otorgados por el Instituto Nacional del Derecho de Autor. Responsable de la última actualización de este Número, Coordinación de la Investigación Científica, Edificio C-2., Av. Francisco J. Mújica, s/n, Ciudad Universitaria, C.P. 58030, Tel. 443 316 74 36y Fax 443 327 23 66. Responsable de la última actualización de este Número, Área de Tecnologías y Procesos de Información de la Coordinación de la Investigación Científica, Fidel Anguiano Rodríguez, fecha de última modificación, abril de 2025.

Ciencia Nicolaita No. 93 fue formada y preparada para su versión electrónica, en el Área Editorial del Departamento de Comunicación de la Ciencia de la Coordinación de Investigación Científica. Edificio C-2, Ciudad Universitaria, Morelia.

Fotografía de la portada

Autor: Bióloga Itzel Salas Prado

Descripción: macho de la mariposa *Heliconius hecale* consumiendo néctar de las flores blancas (*Pentas* sp) en el mariposario Siwiní, Xalapa, Veracruz.

Derechos de uso

Se permite la reproducción, publicación, transmisión, difusión en cualquier modo o medio de cualquier parte del material contenido en el archivo (únicamente texto sin imágenes) sin alterar o modificar el original, con fines de referencia y/o reproducción, académicos o educacionales, con excepción de los personales o comerciales, citando la fuente de referencia y otorgando el crédito correspondiente al autor y al editor.

Sitio web implementado por el equipo de la Coordinación de la Investigación Científica de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo sobre la plataforma OJS3/PKP.