

Año 12

Número 1

Enero – Julio 2026



RECURSOS NATURALES Y SOCIEDAD



REVISTA DIGITAL DE DIVULGACIÓN CIENTÍFICA

Ciencia y
Tecnología



CIB

CENTRO DE INVESTIGACIONES
BIOLÓGICAS DEL NOROCCIDENTE, S.C.



RECURSOS NATURALES Y SOCIEDAD, es una publicación arbitrada de divulgación científica digital iniciativa del **CENTRO DE INVESTIGACIONES BIOLÓGICAS DEL NOROESTE S.C. (CIBNOR-SECIHTI)**, Centro Público de Investigación de **SECIHTI**, Av. Instituto Politécnico Nacional 195, La Paz, Baja California Sur, C. P. 23096, Tel (612) 12 38484, <http://www.cibnor.gob.mx/revista-rns/> aortega@cibnor.mx. Editor en Jefe responsable Dr. Alfredo Ortega-Rubio. Editores Ejecutivos: Dra. Crisalejandra Rivera Pérez y Dr. José Arturo Sánchez Paz. Reservas de Derechos al Uso Exclusivo: 04-2016-100710152500-20; ISSN: 2448-7406. Ambos otorgados por el Instituto Nacional del Derecho de Autor. Las opiniones expresadas por los autores no necesariamente reflejan la postura de los editores de la publicación. Queda estrictamente prohibida la reproducción total o parcial de los contenidos e imágenes de esta publicación sin previa autorización de los autores de este número de **RECURSOS NATURALES Y SOCIEDAD**.

Con deferente gratitud **RECURSOS NATURALES Y SOCIEDAD** reconoce y agradece la colaboración de la Ing. Fca. Elizabeth Villegas Carrazco en la edición gráfica editorial para esta revista, de la Lic. Adriana Landa Blanco en la elaboración del Logotipo y del Lic. Oscar Fisher Dorantes en la elaboración y actualización de la página WEB.

Crédito Fotografía Portada: Imagen generada por Nano Banana

Editorial

Recursos Naturales y Sociedad
2026. Vol. 12(1): V-X.
<https://doi.org/10.18846/renaysoc.2026.12.12.01.0000>

Los desafíos ambientales actuales, como el cambio climático, la contaminación, la pérdida de biodiversidad, la sobreexplotación de los recursos y la inseguridad alimentaria, están estrechamente relacionados entre sí. Los trabajos reunidos en este número de **Recursos Naturales y Sociedad** muestran la importancia de abordarlos mediante el diálogo entre la ciencia, la innovación tecnológica y los conocimientos de las comunidades.

La adaptación de los seres vivos constituye uno de los ejes de esta edición. La historia genética de las palmeras de abanico permite comprender su evolución y reconocer su vulnerabilidad frente al cambio climático. El pasto salado nipa y las plantas de las dunas costeras muestran, por su parte, extraordinarias estrategias para sobrevivir a la salinidad, las altas temperaturas y la escasez de agua. A escala microscópica, las bacterias extremófilas y los virus del desierto revelan mecanismos de resiliencia de relevancia ecológica y de potencial biotecnológico.

Otro tema central es la contaminación. La detección de glifosato en cacerolitas de mar, el uso de lagartijas como especies centinela y la presencia de mercurio en tilapias de presas de Sonora evidencian que las sustancias liberadas al ambiente pueden afectar a la fauna silvestre, incorporarse a las cadenas alimentarias y representar riesgos para las personas. Estos estudios confirman que la salud ambiental y la salud humana son inseparables.

La producción sostenible de alimentos también exige nuevas estrategias. La fitopatología contribuye a proteger los cultivos y la seguridad alimentaria, mientras que los



bioinsecticidas ofrecen alternativas al uso intensivo de plaguicidas químicos. La verdolaga y el huauzontle destacan por su valor nutricional, cultural y agroecológico, así como por su capacidad para diversificar las dietas y los sistemas productivos. De manera complementaria, el manejo forestal comunitario en la Selva Maya demuestra que la conservación puede integrarse con el bienestar y la participación de las comunidades.

La vulnerabilidad de las poblaciones bentónicas frente a la sobrepesca subraya la necesidad de fortalecer su manejo. Para ello, el conocimiento científico puede complementarse con los saberes de la pesca artesanal, contruidos a lo largo de generaciones de observación del mar. Las nuevas herramientas para estudiar la alimentación de los pinnípedos y la información sobre la reproducción de la cabrilla sardinera aportan también bases para comprender y conservar mejor las poblaciones marinas.

En el ámbito acuícola, la suplementación con taurina y la modernización de las jaulas marinas ilustran cómo la nutrición y la tecnología pueden contribuir a sistemas productivos más eficientes. Sin embargo, su desarrollo debe acompañarse de monitoreo ambiental, bioseguridad, regulación y responsabilidad social. Asimismo, el aprovechamiento de subproductos pesqueros para obtener péptidos antioxidantes demuestra que los residuos pueden convertirse en recursos útiles en el marco de los modelos de economía circular. La revisión sobre la lisozima de Fleming complementa esta perspectiva al recordar el valor de los descubrimientos científicos y sus múltiples aplicaciones biotecnológicas.

Finalmente, el análisis del sarampión advierte sobre los riesgos de olvidar enfermedades que siguen representando una amenaza y reafirma la importancia de la prevención y de la divulgación basada en evidencia.

Los artículos de este número recorren desiertos, oasis, dunas, selvas, sistemas agrícolas y ambientes marinos. En conjunto, muestran que comprender las adaptaciones de los organismos, reducir la contaminación, promover efectivamente la salud, conservar la biodiversidad y producir alimentos de forma responsable son tareas inseparables.

Desde **Recursos Naturales y Sociedad**, esperamos que estas contribuciones fortalezcan el diálogo entre ciencia y sociedad y estimulen acciones para construir un futuro más saludable, más equitativo y más sostenible.



Sinceramente,

Dra. Crisalejandra Rivera Pérez

Editor Ejecutiva

Dr. José Arturo Sánchez Paz

Editor Ejecutivo

Dr. Alfredo Ortega-Rubio

Editor en Jefe

Verano 2026

Editorial

Recursos Naturales y Sociedad
2026. Vol. 12(1): V-X.
<https://doi.org/10.18846/renaysoc.2026.12.12.01.0000>

Current environmental challenges, including climate change, pollution, biodiversity loss, resource overexploitation, and food insecurity, are closely interconnected. The contributions featured in this issue of **Recursos Naturales y Sociedad** highlight the importance of addressing these challenges through dialogue among science, technological innovation, and community knowledge.

The adaptation of living organisms is one of the central themes of this issue. The genetic history of fan palms provides insights into their evolution and helps identify their vulnerability to climate change. Nipa salt-grass and coastal dune plants, in turn, display remarkable strategies for surviving salinity, high temperatures, and water scarcity. At the microscopic scale, extremophilic bacteria and desert viruses reveal resilience mechanisms of ecological significance and biotechnological potential.

Pollution is another major focus. The detection of glyphosate in horseshoe crabs, the use of lizards as sentinel species, and the presence of mercury in tilapia from reservoirs in Sonora demonstrate that substances released into the environment can affect wildlife, enter food chains, and pose risks to people. These studies confirm that environmental and human health are inseparable.

Sustainable food production also requires new strategies. Plant pathology helps protect crops and food security, while bioinsecticides provide alternatives to the intensive use of chemical pesticides. Purslane and huauzontle stand out for their nutritional, cultural, and agroecological value,



as well as their potential to diversify diets and production systems. In addition, community-based forest management in the Maya Forest demonstrates that conservation can be integrated with community well-being and participation.

The vulnerability of benthic populations to overfishing underscores the need to strengthen their management. To this end, scientific knowledge can be complemented by the traditional knowledge of artisanal fishing communities, built over generations of observing the sea. New tools for studying pinniped diets and information on the reproduction of the leopard grouper also provide a foundation for improving our understanding and conservation of marine populations.

In aquaculture, taurine supplementation and the modernization of marine cages illustrate how nutrition and technology can contribute to more efficient production systems. However, their development must be accompanied by environmental monitoring, biosecurity, regulation, and social responsibility. Likewise, the use of fishery by-products to obtain antioxidant peptides demonstrates that waste can be transformed into valuable resources within circular economy models. The review of Fleming's lysozyme complements this perspective by reminding us of the importance of scientific discoveries and their many biotechnological applications.

Finally, the analysis of measles warns of the risks of overlooking diseases that continue to pose a threat and reaffirms the importance of prevention and evidence-based science communication.

The articles in this issue span deserts, oases, dunes, forests, agricultural systems, and marine environments. Together, they demonstrate that understanding how organisms adapt, reducing pollution, effectively promoting health, conserving biodiversity, and producing food responsibly are inseparable tasks.

At **Recursos Naturales y Sociedad**, we hope these contributions will strengthen the dialogue between science and society and inspire action toward a healthier, more equitable, and more sustainable future.



Yours sincerely,

Dra. Crisalejandra Rivera Pérez

Executive Editor

Dr. José Arturo Sánchez Paz

Executive Editor

Dr. Alfredo Ortega-Rubio

Editor in Chief

Summer 2026

	Año 12	Número 1	Enero - Julio de 2026	
Dr. Alfredo Ortega Rubio Director General				
Dr. Bernardo Murillo Amador Director de Gestión y Desarrollo Institucional		Editorial.....		V
Dra. Alejandra Nieto Garibay Directora de Estudios de Posgrado y Formación de Recursos Humanos		Artículos		
Coordinadores Programas Académicos		La fitopatología y su importancia para lograr la seguridad y soberanía alimentaria de México y el mundo.		
Dra. Danitzia Adriana Guerrero Tortolero Acuicultura		María Goretty Caamal-Chan, Aarón Barraza, Abraham Loera-Muro	1	
Dra. Crisalejandra Rivera Pérez Ecología Pesquera		Glifosato en cacerolitas de mar: un contaminante moderno que amenaza a una especie de millones de años. Juan José Sandoval-Gío, Mariana Velloso Capparelli, Pedro Manuel Osorio-Montalvo	22	
Dra. Patricia Cortés Calva Planeación Ambiental y Conservación		Ecología alimentaria y uso del hábitat del venado bura (Odocoileus hemionus) en ecosistemas áridos y semiáridos: dinámica trófica, adaptaciones, suplementación y retos para el manejo. Uriel López-Yllescas, Juan A. Encina-Domínguez y Jorge E. Ramírez-Albores	34	
Dr. Luis Guillermo Hernández Montiel Agricultura Zonas Áridas		Verdolaga, un superalimento mexicano mejorado con fertilización inorgánica. Angelica Ancelmo-León, Eréndira Esmeralda Hernández-Andrade, César Omar Montoya-García	56	
Coordinaciones		La historia escrita en los genes: las palmeras icónicas de América del Norte. Anastasia Klimova, Jesús Neftalí Gutiérrez-Rivera, Alfredo Ortega Rubio	72	
MC. Jesús Alfredo De la Peña Morales Vinculación, Innovación y Transferencia de Conocimiento a la Sociedad (COVITECS)		¿Por qué las poblaciones bentónicas marinas son tan vulnerables a la sobrepesca?. Marlene Anaïd Luquin-Covarrubias y Enrique Morales-Bojórquez	93	
Dra. Paola Magallón Servín Programa de Acercamiento de la Ciencia a la Educación (PACE)		Saberes del mar: la ciencia en la pesca artesanal. Katherin Soto-López, Daniela Alejandra Murillo-Cisneros, Orlando Lugo-Lugo, Tania Zenteno-Savín	107	
MC. Tizoc Atenedoro Moctezuma Cano Coordinación de Atención Interna Especializada (CATIE)		Consumo de tilapia: ¿qué tan seguro es? Un estudio de exposición en presas de Sonora. Carolina León-Marín, Chrystian Mariana Rodríguez-Armenta, Christian Minjarez-Osorio, Enrique De La Re-Vega, Martín Enrique Jara-Marini, Ángel Martínez-Durazo	122	
Ing. Edgar Yuen Sánchez Unidad de Tecnología de la Información y Comunicaciones		Lagartijas y contaminantes químicos en México: Adaptaciones a un ambiente cambiante. Miranda C. Villa-Muñoz, Tania Zenteno-Savín, M. Carmen Blázquez-Moreno, Alfredo Ortega-Rubio	147	
Unidades Foráneas		La lisozima de Fleming. Martha Reyes-Becerril, Kevyn Guerra	161	
Dra. Claudia Adriana Ramírez Valdespino Unidad Guerrero Negro		Sarampión: Un riesgo olvidado. Arturo Sánchez-Paz, Tania Enríquez-Espinoza, Fernando Mendoza-Cano y Trinidad Encinas-García	173	
Dr. Ricardo García Morales Unidad Nayarit		Del desperdicio al valor: el poder antioxidante oculto en los subproductos marinos. Isaías de Jesús Llamas-López, Cynthia Esmeralda Lizárraga Velázquez, Amada Yerén Escobedo-Lozano, Asahel Benitez-Hernández	185	
Dr. Alfredo Arreola Lizárraga Unidad Guaymas				
Ing. Juan Bautista Vega Peralta Unidad Hermosillo				
Administración				
CP. Martha Verónica González Velázquez Unidad de Administración y Finanzas				
CP. Roberto Picos García Subdirector de Finanzas y Contabilidad				
Lic. Jesús Antonio Olachea León Subdirector de Recursos Materiales y de Servicios				
CP. Juan Carlos González Cota Subdirector de Recursos Humanos				
CP. Liz Aleida Cota Almazán Subdirectora de Contabilidad				
MC. Luis Gómez Castro Subdirector de Planeación				
Lic. Carlos Félix Subdirector Jurídico				
Lic. Guillermina Verdugo Apodaca Jefa del Departamento de Extensión y Divulgación Científica				
Lic. Dalia Villavicencio Siqueiros Jefa del Departamento de Eventos				

Taurina y su uso en la acuicultura: más allá del mito energético. <i>Marco A. Hernández-de Dios, Eunice D. Rodríguez-Rafael, Minerva C. Maldonado-García, Deneb Maldonado García, Roxana Inohuye-Rivera, Francisco Encarnación-Ramírez</i>	199
Las bacterias extremófilas: Hábitat, antecedentes, metabolitos y aplicaciones. <i>Ana Karen Armendáriz Marrón, María de Jesús Briseño López, Crystal Guluarte y Luis Guillermo Hernández Montiel.....</i>	217
El pasto salado nipa (<i>Distichlis palmeri</i>) como sistema modelo para el estudio de la tolerancia a salinidad y la microbiota asociada. <i>Carolina Gallardo-Ybarra, Corina Hayano-Kanashiro, Luis Fernando Olivarría-Arnold, Blanca Estela Romero-López, Jesse Poland</i>	238
Explorando el potencial de los bioinsecticidas derivados de organismos marinos y terrestres. <i>Mayra Pamela Becerra Amezcua, Fernando Misael Matadamas Guzmán, Xochitl Guzmán García</i>	259
Un repertorio de adaptaciones para florecer en las dunas costeras. <i>Arely V. Pérez López, Blanca E. Romero López, Alfonso Medel Narváez, Jorge G. Rocha Estrada</i>	273
Cuando llega el momento de reproducirse: ¿Cómo se reproduce la cabrilla sardinera en la Bahía de La Paz?. <i>Minerva Maldonado-García, José Antonio Estrada-Godínez, Francisco Encarnación-Ramírez, Roxana Inohuye-Rivera, Vicente Gracia-López, Cristian Machuca, Deneb Maldonado-García, Marco A. Hernández-de Dios</i>	284
Huauzontle: valor cultural, nutricional y agroecológico en México. <i>Eréndira Esmeralda Hernández-Andrade, Libia Iris Trejo-Téllez, Yolanda Leticia Fernández-Pavía</i>	301
La industrialización del Océano: Innovación y Tecnología en jaulas para cultivos marinos. <i>Carlos Humberto Hernández-López, Christian Eduardo Guzmán-Román, Juan Antonio Hernández-Yau</i>	319
El manejo forestal como respuesta eficaz a la degradación del ambiente en la Selva Maya. <i>Mayra Vázquez-Luna, Wendy Deyanira Sánchez-Méndez, María Angelica Navarro-Martínez</i>	334
Detectives del mar: cómo descubrimos lo que comen los pinnípedos. <i>Brenda Natasha Mejía Guarnizo, Claudia Hernández Camacho, Fernando R. Elorriaga Verplancken, Martha Patricia Rosas Hernández</i>	351
Virus del desierto: obras maestras de la resiliencia. <i>Tania Lizbeth Enríquez Espinoza, José Fernando Mendoza Cano, Trinidad Encinas García, Arturo Sánchez Paz</i>	360



Av. Instituto Politécnico Nacional 195.
Playa Palo de Santa Rita Sur
La Paz, B.C.S., México. C.P. 23096,
Tel. (52) (612) 123-8484

**Plant pathology and its importance
in achieving food security and sovereignty in Mexico and the world**

La fitopatología y su importancia para lograr la seguridad y soberanía alimentaria de México y el mundo

María Goretty Caamal-Chan^{1*}, Aarón Barraza¹, Abraham Loera-Muro¹

Resumen

Los conceptos de seguridad alimentaria y soberanía alimentaria, ambos relevantes en el discurso sobre sistemas alimentarios sostenibles, han experimentado un creciente interés en las últimas décadas. Las plantas son vitales para la supervivencia del ser humano y los animales, así, las enfermedades y plagas son factores que influye en su disponibilidad y seguridad para el consumo. Las estrategias para prevenir o manejar enfermedades, incluida la aplicación de plaguicidas, ponen en riesgo la salud humana y ambiental. La fitopatología moderna, es una disciplina que surgió de uno de los capítulos más oscuros de la historia: la Gran Hambruna en Irlanda. Esta tragedia subrayó el impacto de las enfermedades de las plantas e impulsó la investigación científica sobre sus causas. Investigadores como Berkeley y de Bary reconocieron la naturaleza tipo fúngica (oomiceto) del patógeno causante de esta tragedia irlandesa, un descubrimiento anterior a la teoría de los microorganismos estudiados por Pasteur. Actualmente, se reconoce la importancia de la sanidad vegetal para lograr la seguridad alimentaria y el logro de los objetivos de desarrollo sostenible. Se requiere la contribución de científicos en colaboración con especialistas en otros campos, para abordar los desafíos como el hambre, la pobreza y el deterioro ambiental. Al comprender y manejar las enfermedades de las plantas, se puede proteger los alimentos necesarios para el progreso de la humanidad.

¹Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste, S.C. (CIBNOR). Instituto Politécnico Nacional 195, Playa Palo Santa Rita Sur, La Paz, Baja California Sur, 23096, México.

* Autor de correspondencia: mcaamal@cibnor.mx



Palabras claves: seguridad alimentaria, soberanía alimentaria, enfermedades de las plantas, sanidad vegetal.

Abstract

The concepts of food security and food sovereignty, both relevant to the discourse on sustainable food systems, have experienced growing interest in recent decades. Plants are vital to the survival of humans and animals, with diseases and pests being one of the factors that influence their availability and safety for consumption. Measures to prevent or treat diseases, including the application of pesticides, put human and environmental health at risk. Modern plant pathology is a discipline that emerged from one of the darkest chapters in history: the Great Famine in Ireland. This tragedy highlighted the impact of plant diseases and prompted scientific research into their causes. Researchers such as Berkeley and de Bary recognized the fungal nature of the pathogen causing this Irish tragedy, a discovery that predates Pasteur's germ theory. Today, the importance of plant health in achieving food security and the Sustainable Development Goals is recognized. The contribution of scientists, working together with specialists in other fields, is needed to address challenges such as hunger, poverty, and environmental degradation. By understanding and managing plant diseases, we can protect the food needed for human development.

Keywords: food security, food sovereignty, plant diseases, plant health.

Introducción

Las plantas proporcionan al menos el 80% de los alimentos que consumen los seres humanos y son la fuente principal de nutrición del ganado (Rizzo *et al.* 2021). La seguridad alimentaria se ha definido como “una condición en la que todas las personas, en todo momento, tienen acceso físico, social y económico a suficientes alimentos inocuos y nutritivos para satisfacer sus necesidades y preferencias alimentarias a fin de llevar una vida activa y sana” (FAO, 1996). La soberanía alimentaria se refiere al derecho de las personas a alimentos saludables y culturalmente apropiados, producidos mediante métodos ecológicamente racionales y sostenibles. Esta definición de soberanía alimentaria se extiende además al derecho de las personas a definir sus propios sistemas alimentarios y agrícolas (Cadavid *et al.* 2024).

El crecimiento de la población mundial ha generado una mayor demanda, tanto de cantidad, como de calidad en la producción de alimentos. Se estima que dicha producción de alimentos deberá aumentar un 60 % para el 2050, para poder alimentar a los 10, 000 millones de personas que se estima habrá en la Tierra (Van Dijk *et al.* 2021; Hossain *et al.* 2024). Por otra parte, los fenómenos extremos causados por el cambio climático, las perturbaciones económicas o geopolíticas y las plagas o epidemias por enfermedades vegetales, pueden inducir, diseminar y prolongar la inseguridad alimentaria (Mehrabi *et al.* 2022).

Para garantizar la productividad y la seguridad alimentaria, un factor clave es la “salud vegetal” (Rizzo *et al.* 2021). La “salud vegetal” se define como el estado óptimo de las plantas para un crecimiento saludable, lo que requiere un control frente a diversos factores de estrés biótico (relacionado con las interacciones con los microorganismos) y abiótico (relacionados con los factores ambientales). Este concepto es de suma importancia en la seguridad alimentaria tanto que, las Naciones Unidas declararon el año 2020 como el Año Internacional de la “salud vegetal” (Ristaino *et al.* 2021; Acuña *et al.* 2023). Por otro lado, las enfermedades de las plantas se refieren a una serie de procesos fisiológicos anormales causados por la infección de las plantas por diversos patógenos, como hongos, bacterias y virus, que resultan en el retraso del crecimiento y desarrollo de las plantas, una disminución en el rendimiento y la calidad, e incluso la muerte en casos graves. (Del Moral de la Vega y Del Moral Martínez, 2023; Gai y Wang, 2024); se intensifican cuando se cultivan plantas, por lo que, el inicio de la historia de las enfermedades vegetales va de la mano con el inicio de la agricultura y, en consecuencia, con la prehistoria de la humanidad. La demanda exagerada de alimentos debido al aumento de la población generó la intensificación del cultivo y el comercio de plantas entre el Nuevo y el Viejo Mundo, lo que condujo a la aparición de severas enfermedades en los cultivos, que influyó en la disponibilidad y seguridad de alimentos y, que marcaron la historia de la humanidad (Sundstrom *et al.* 2014). Las enfermedades vegetales, tanto endémicas como emergentes, se están diseminando y exacerbando por el cambio climático, la transmisión a través de las redes mundiales de comercio de alimentos, la diseminación de patógenos y la evolución de nuevas cepas, variantes, razas fisiológicas o patovares, según el caso. Para afrontar estos grandes desafíos, se necesita un constante estudio de estas enfermedades mediante las diferentes áreas que aborda la fitopatología (Mehrabi *et al.* 2022; Cadavid *et al.* 2024; Hossain *et al.* 2024).



1. La Pérdida de cultivos, una realidad actual.

La seguridad alimentaria se ve amenazada por una serie continua de enfermedades que afecta a las plantas (Rizzo *et al.* 2021). Algunas de ellas, han persistido durante décadas o siglos, y otras más, han resultado ser oportunistas de la situación en la que se siembran ciertos cultivos. Las pérdidas globales de producción debidas a plagas y enfermedades en cultivos agrícolas son considerables. Estas pérdidas pueden ser de alrededor del 10.1 % al 28.1 % en trigo, del 24.6 % al 40.9 % en arroz, del 19.5 % al 41.4 % en maíz, del 8.1 % al 21 % en papa y del 11 % al 32.4 % en soja (Savary *et al.* 2019). En algunas regiones del mundo, las enfermedades de las plantas también causan pérdidas de producción significativas antes de la cosecha. Para los pequeños agricultores, por ejemplo, estas pérdidas pueden ser de casi el 50 % en frijol y maíz, de acuerdo con encuestas realizadas a productores de Centroamérica, y casi del 50 % en papa, de acuerdo con productores de Sudamérica (Ristaino *et al.* 2021). Esto pone en riesgo tanto la seguridad como la soberanía alimentaria en esas regiones, al tratarse de cultivos de importancia calórica y con una gran huella cultural.

Otro aspecto relevante, son las estrategias que se han implementado para prevenir o manejar enfermedades; entre estas, se incluye la aplicación de plaguicidas que implican impactos negativos en diversos puntos de la salud humana y ambiental (Vurro *et al.* 2010; Wan *et al.* 2025), con consecuencias graves como:

1. Aumento en los precios de producción, debido a los costos que implica la mitigación y control de los agentes fitopatógenos.
2. Efectos negativos en la salud de los trabajadores agrícolas y los consumidores al tener en los vegetales trazas de plaguicidas.
3. Los agentes fitosanitarios en constante contacto con los plaguicidas pueden desarrollar resistencia a éstos y agravar los retos para su control.
4. Puede existir un efecto negativo de los plaguicidas en el ambiente, por ejemplo, disminución de la biodiversidad del suelo del cultivo y de los insectos del área.

Este breve panorama, muestra que las enfermedades vegetales pueden causar una cadena de efectos adversos, que incluyen mermas del rendimiento de los cultivos, dificultades económicas debido a los bajos ingresos agrícolas, hambruna generalizada, desnutrición, migración masiva, contaminación por toxinas, pérdida de biodiversidad e incluso la muerte por efecto de alguno de los factores anteriores. Además, las medidas de control de enfermedades resultan en altos costos de insumos, riesgos para la salud y daños ambientales. Estas consecuencias interconectadas ponen

de relieve los riesgos críticos que representan las enfermedades de las plantas para la seguridad alimentaria y la estabilidad socioeconómica mundial (Hossain *et al.* 2024; Wan *et al.* 2025).

2. Rompiendo las barreras geográficas: el intercambio de cultivos.

Actualmente, los principales cereales cultivados a nivel mundial son: el arroz (*Oryza sativa*), el maíz (*Zea mays*), el trigo (*Triticum aestivum*) y la cebada (*Hordeum vulgare*). Son considerados cultivos básicos por su aporte calórico y proteico. Se sabe que el centro inicial de domesticación de cada uno de estos cultivos fue en áreas geográficas puntuales (Meyer *et al.* 2012; Pankin y von Korff, 2017). El evento histórico que es considerado por algunos autores como la “mayor intervención humana en la naturaleza desde la invención de la agricultura”, fue el arribo de Cristóbal Colón al continente americano en 1492. Este hecho alteró permanentemente la ecología de las áreas implicadas y facilitó la transferencia entre el Viejo y el Nuevo Mundo de cultivos alimentarios, especialmente maíz, frijol, trigo, papa y yuca. Esto permitió que dichos cultivos se expandieran a varias regiones del mundo. El tránsito masivo de plantas y animales a través del Océano Atlántico en ambas direcciones se ha denominado el Intercambio Colombino. Este intercambio alteró el tipo de alimentos que se consumen en ambos mundos. Los mexicanos están orgullosos de su gastronomía moderna, que ya es una huella cultural; es difícil pensar no tener tacos rellenos de carne, frijoles refritos en grasa animal, queso en enchiladas y azúcar, canela y leche en chocolate. Sin embargo, México antes de 1492 no contaba con algunos de estos ingredientes (Grennes, 2007). El Viejo Mundo también obtuvo nuevos cultivos básicos, como la papa, el camote, el maíz y la yuca, los cuales fueron acogidos por ser calóricos y nutricionales con respecto a los alimentos básicos que existían anteriormente. También se introdujeron alimentos con menor contenido calórico, como el tomate, el chile, el cacao, el cacahuete y la piña, que ahora son platos estrella en muchos países del Viejo Mundo, como Italia, Grecia y otros países mediterráneos (tomates), India y Corea (chiles), Hungría (pimentón, elaborado con chiles), Malasia y Tailandia (chiles, cacahuetes y piñas) (Nunn y Qian, 2010). Para ese entonces, nadie imaginaba que uno de estos cultivos, introducido en una nueva área geográfica, con condiciones climáticas diferentes a su centro de origen, marcaría un nuevo hecho en la historia de la humanidad.

3. La papa del nuevo al viejo mundo: el impacto de un cultivo en la dieta de un país.

En la actualidad ¿quién no conoce las papas fritas o a la francesa? El nombre oficial de la papa en el área científica es *Solanum tuberosum* L. Los europeos no vieron papas antes de 1532, cuando Pizarro ascendió por primera vez los Andes del norte de Perú en Cajamarca, y, por lo tanto, unos 40



años después de la llegada de Colón, se inició su domesticación en el viejo mundo. La papa es originaria de Sudamérica, un tubérculo de los Andes peruanos, con una domesticación en microclimas del territorio y, su cultivo en otras partes del mundo fue un logro que requirió mucho esfuerzo (Hawkes y Francisco-Ortega, 1993). El cultivo de la papa se adaptó muy bien al clima y los suelos irlandeses, desde su introducción en el siglo XVI. La dieta irlandesa nativa, compuesta por cereales y productos lácteos, complementada con carne de cerdo, cambió ante la introducción de la papa. Este evento nos recuerda la importancia de la seguridad alimentaria, ya que, un solo cultivo puede impactar drásticamente a un país. De una isla despoblada de un millón de habitantes en la década de 1590 a 8,2 millones en 1840, convirtiéndola en el país más densamente poblado de Europa. Bourke (1993) mencionó cuatro fases de aceptación de la papa en la dieta irlandesa general. En la primera etapa (1590-1675), la papa se utilizó como alimento complementario y como medida de contención contra la hambruna; en la segunda etapa (1675-1750), la papa se considera un valioso alimento invernal para las clases más pobres; en la tercera etapa (1750-1810), las clases más pobres se vuelven peligrosamente dependientes de la papa como alimento básico durante la mayor parte del año y en la cuarta etapa (1810-1845), la situación se agrava a medida que las hambrunas localizadas y la escasez de papas se vuelven habituales (Mac Con lomaire y Gallagher, 2008).

4. Una de las enfermedades vegetales que marco la historia de la humanidad.

Mientras la papa estaba siendo introducida con éxito al viejo mundo, en América, para ser precisos, en México, se estaba gestando otro elemento importante que sería más tarde compartido a los campos de cultivo de Europa. En el valle de Toluca, México, parientes silvestres de la papa presentaban interacción con un organismo con reproducción sexual (apareamiento A1 y A2); cuya población migro y se expandió fuera de su centro de diversidad gracias al contacto entre americanos y europeos. Una pequeña metapoblación de este organismo empezó a afectar los cultivos de papas llevándolas a la muerte (Yoshida *et al.* 2013; Goss *et al.* 2014; Fry *et al.* 2015). Para ese tiempo, aún no se sabía con exactitud que las plantas se enfermaban por agentes patógenos, por lo que este problema fue de conocimiento local. Posteriormente, el problema de la papa se registra en Estados Unidos en 1843 en el estado de Filadelfia, extendiéndose a 5 estados más y a Canadá durante los dos años siguientes. Para 1845 el problema llega a Bélgica, Holanda, Alemania, Suiza, Francia, Italia, Inglaterra, Irlanda y Escocia (Ristaino, 2002). Para los irlandeses, que subsistían de la papa como principal fuente de alimento, las epidemias de tizón tardío de la papa fueron devastadoras.

Las epidemias de la papa aparecieron en Europa antes del trabajo pionero de Louis Pasteur sobre la teoría microbiana de la enfermedad. Por lo que, algunos creían que el clima era responsable de la

enfermedad en la papa. Otros culpaban al diablo o a la mala tierra. En un panfleto escrito sobre las epidemias de la papa en Escocia se decía: “Es cierto que un hongo aparece en las hojas, tallos y tubérculos de las plantas atacadas, pero no se sabe con certeza hasta qué punto el hongo es la causa o la consecuencia de la enfermedad; hasta qué punto debe considerarse un parásito de la patata viva o un simple devorador de sus partes moribundas” (Ristaino, 2002).

¿Qué está causando estas epidemias en la papa? fue la pregunta que algunos investigadores se centraron en responder. En 1842, en Alemania, Von Martius fue el primero en verificar la asociación entre el mildiú y un microorganismo, resultados similares fueron obtenidos por Berkeley en 1846. Ese mismo año, el francés Montagne aisló el hongo, al que denominó *Botrytis infestans*; aunque fue De Bary quien, a partir de un aislado del patógeno, reprodujo la enfermedad en hojas y tubérculos de la planta, al cual se ha denominado “*Phytophthora infestans* (Mont.) de Bary”. Esto esclareció que un organismo similar a un hongo era responsable de la enfermedad conocida como el tizón tardío de la papa. Estas investigaciones fueron de las primeras en documentar que los microorganismos eran capaces de causar enfermedades en las plantas y sentaron las bases de la fitopatología experimental (Ristaino, 2002; Del Moral de la Vega y Del Moral Martínez, 2023).

Si bien, las enfermedades de las plantas no causaron una gran hambruna como la que sufrió Irlanda en aquella época, fueron uno de los múltiples factores durante la crisis alimentaria mundial de 2007/2008, en donde se vio un aumento en los precios de los alimentos, que llevaron a millones de personas al hambre. Estos aumentos de precios se asociaron posteriormente con disturbios políticos y por alimentos en Oriente Medio y África. Esto llevó al exsecretario de Estado de EE. UU., John Kerry, a señalar que “el acceso a los alimentos y la agricultura debe ser la piedra angular de la estrategia de desarrollo” (Ristaino *et al.* 2021).

5. Algunas enfermedades vegetales alteran la disponibilidad y precios de los alimentos en México y su mercado internacional.

México cuenta con una superficie total de 196.5 millones de hectáreas, 32.1 millones de las mismas son la superficie agrícola del país. En 2008, de los 19.5 millones de personas en pobreza alimentaria, 7.2 millones se ubicaban en las ciudades y 12.2 millones en las zonas rurales. Los campesinos en México son quienes más padecen hambre a pesar de ser los productores de alimentos. México, siendo el 12° productor mundial de alimentos, enfrenta la amenaza de más de 200 especies de plagas agrícolas que ponen en riesgo la productividad del campo (García *et al.* 2024). Entre los



cultivos de importancia económica que han sido afectados por agentes fitopatógenos en las últimas décadas se encuentran los cítricos, el aguacate, y el café.

México, es uno de los países líderes en el mercado de cítricos, específicamente en naranjas dulces (*Citrus sinensis* L. Osbeck), limas (*C. aurantifolia* [Christm] Swingle y *C. latifolia* Tanaka) y limones (*C. limon* L. Burm.f.). Cuenta con una superficie cultivada de 678 mil hectáreas, una producción total de 9,3 millones de toneladas valoradas en USD 2,4 mil millones, siendo Veracruz, Tamaulipas y Michoacán los principales estados productores. Actualmente se enfrenta a una grave amenaza debido a la enfermedad conocida como Huanglongbing (HLB) o la enfermedad del dragón amarillo, el cual, es causado por la bacteria del género '*Candidatus Liberibacter*' (Villar-Luna et al. 2024).

Por otro lado, una buena taza de café es la adicción de un buen porcentaje de la población mundial. Las especies de café más importantes son *Coffea robusta* (utilizada principalmente para café soluble y bebidas a base de café) y *Coffea arabica*, productora de cafés especiales. En México, el cultivo de café orgánico tiene una gran demanda y genera hasta 500,000 empleos en 14 entidades federativas. Desde 2012 se han presentado pérdidas de producción, causadas por brotes tempranos y altamente virulento de roya del café en el país, causado por el hongo *Hemileia vastatrix* (Castillo et al. 2020).

Por otro lado, el guacamole es una preparación que representa la gastronomía mexicana. México es el principal productor mundial de aguacate Hass (*Persea americana* Mill.) al menos desde el año 2000. Actualmente México produce alrededor del 45% del total a nivel mundial y la mayor parte de ese total proviene de Michoacán, unas 2.5 millones de toneladas anuales. La enfermedad de la tristeza del aguacate causada por *Phytophthora cinnamomi* Rands ha causado pérdidas de árboles en áreas productoras de Uruapan, Michoacán, en Atlixco, Puebla y con diferentes grados de afectación en huertas productoras de Chiapas, Veracruz, Nayarit, y Morelos (Agapito et al. 2022; Román-Burgos 2025).

Por lo tanto, un aspecto clave de la seguridad alimentaria es la gestión oportuna y eficaz de los patógenos y plagas de las plantas, así como de otros microorganismos asociados con las plantas que podrían contribuir con los beneficios a la agricultura (Rizzo et al. 2021). Detectar a tiempo el alcance geográfico de fitoparásitos y la aparición de nuevos patotipos, que puedan causar una interrupción significativa en la producción de alimentos, debe ser una tarea clave para todos los países.

6. La fitopatología como herramienta para la seguridad alimentaria.

Desde los estudios experimentales iniciados por algunos investigadores, principalmente De Bary que dieron nacimiento a la fitopatología experimental, han pasado varias décadas (Kutschera y Hossfeld, 2012). Actualmente, dentro de las ciencias agrícolas se encuentra como una rama dedicada a estudiar las enfermedades de las plantas, sus causas (hongos, bacterias, virus, nematodos, oomicetos, entre otros), y a desarrollar métodos para su control y manejo en los cultivos para asegurar la productividad y calidad de los alimentos.

La “Fitopatología” se nutre de ciencias vegetales (botánica, fisiología vegetal, entre otras.), el manejo de enfermedades (agronomía, ecología, fitomejoramiento, control biológico, etc.) y las ciencias moleculares (biología molecular, genética, genómica, etc.) para comprender las interacciones planta-patógeno y desarrollar estrategias de control (Kutschera y Hossfeld, 2012; Del Moral de la Vega y Del Moral Martínez, 2023). Por todo esto, la “Fitopatología” desempeña un papel fundamental en la protección de la salud vegetal, la seguridad alimentaria y la inocuidad de los alimentos mediante soluciones basadas en la ciencia para proteger a las plantas de enfermedades recurrentes y emergentes.

Sin embargo, la “Fitopatología” tiene actualmente grandes retos que gestionar:

1. Detección temprana de agentes fitopatógenos: Con el conocimiento generado por la “Fitopatología” es posible realizar el diagnóstico molecular y de laboratorio para mejorar la precisión, empleando técnicas como la reacción en cadena de la polimerasa (PCR) para la detección de ADN de patógenos, el ensayo inmunoadsorción ligado a enzimas (ELISA) para la identificación de proteínas específicas de patógenos y el código de barras de ADN para la identificación a nivel de especie. Actualmente, se utilizan diversos tipos de nanobiosensores, los cuales, facilitan la detección precisa de diversas toxinas, pesticidas y patógenos causantes de enfermedades en las plantas; con la incorporación de inteligencia artificial al sistema de vigilancia se está desarrollando tecnología de vanguardia que mejora las estrategias de manejo de enfermedades de las plantas (Chaturvedi *et al.* 2025). Estos enfoques facilitan una detección precisa y rápida, lo que permite una intervención inmediata al problema. Sin embargo, no todo productor tiene acceso a estas tecnologías (Donoso y Valenzuela, 2018; Ristaino *et al.* 2021; Gai *et al.* 2024).
2. La evolución de los patógenos: El conocimiento de elementos moleculares puntuales de los agentes patógenos permiten a la “Fitopatología” emplear estudio de poblaciones y genómica



comparativa para determinar la coevolución entre el hospedante (planta) y el patógeno. Estos estudios son importantes debido a que los patógenos se adaptan constantemente, adquiriendo nuevos mecanismos para infectar a las plantas y evadir las estrategias de manejo actuales. Las mutaciones y la recombinación genética de los microorganismos patógenos facilitan la aparición de nuevos linajes que presentan mayor virulencia en los cultivos y resistencia a los plaguicidas de síntesis química usados para combatirlos. El uso excesivo de estas moléculas acelera este proceso, lo que resulta en la aparición de nuevos patotipos resistentes, lo que complica el manejo de la enfermedad (de Vries *et al.* 2020).

3. Impacto del cambio climático en las enfermedades vegetales: el cambio climático se reconoce cada vez más como una amenaza significativa para la productividad agrícola mundial. Existe una intrincada relación entre las variables climáticas y la incidencia, severidad y distribución geográfica de las enfermedades de las plantas, donde se destaca los cambios en la temperatura, los niveles de CO₂ y los patrones de precipitación, ya que estos factores exacerban la virulencia de los patógenos y alteran la dinámica de las enfermedades. Los investigadores van en contra de las manecillas del reloj para generar conocimiento sobre las bases moleculares de la defensa vegetal contra la virulencia de los patógenos y como puede ser modulada por el clima (Hossain *et al.* 2024).
4. Las bases moleculares de las enfermedades vegetales: Comprender la interacción planta-patógeno a nivel molecular es crucial para desarrollar estrategias que mejoren la resistencia y mitiguen el impacto de las enfermedades vegetales en la productividad agrícola. Gracias a estos estudios se sabe que la célula vegetal emplea diferentes vías de señalización, así como proteínas (receptores), para reconocer la invasión de patógenos y activar la respuesta de defensa de las plantas. Por otro lado, se sabe que los patógenos tienen proteínas claves para la virulencia (para enfermar) conocidas como efectores. Al profundizar en los mecanismos moleculares en las interacciones planta-patógeno, los investigadores pueden descubrir procesos biológicos fundamentales que ofrecen vías prometedoras para reforzar la resiliencia de los cultivos contra las enfermedades de forma dirigida (Hossain *et al.* 2024; Ijaz *et al.* 2024). Una de las tecnologías que esta tomando auge es el CRISPR/Cas9, el cual, consiste de un ARN guía que coincide con un gen objetivo deseado y Cas9 (proteína 9 asociada a CRISPR), una endonucleasa que provoca una rotura de doble cadena de ADN, lo que permite la edición en el genoma. La edición del genoma es una de las herramientas importantes para la implementación de la resistencia a patógenos en las plantas; esto es posible gracias a los avances del conocimiento científico de los mecanismos moleculares

subyacentes a numerosos patosistemas que permitir la propuesta de genes que se editen para lograr la resistencia. Sin embargo, los fitopatólogos deben demostrar que los efectos fenotípicos se mantienen en líneas de élite en condiciones de campo (Borrelli *et al.* 2018).

5. Los microbiomas de los hospedantes (insectos plagas o plantas) como componentes esenciales de la salud de las mismas: Actualmente, se está aprovechando el conocimiento generado sobre los microbiomas de las plantas y los insectos, para generar prácticas agrícolas sostenibles, incluyendo inóculos microbianos y agentes de biocontrol, para mejorar la tolerancia y la productividad de las plantas. También, se investiga la diversidad microbiana en los suelos y en las superficies vegetales y cómo influyen en la salud vegetal al contribuir al ciclo de nutrientes, la promoción del crecimiento y la supresión de enfermedades. Comprender cómo interactúan los microorganismos antagonistas con los fitopatógenos es crucial para el manejo de enfermedades. Los avances en secuenciación de alto rendimiento, metagenómica y metabolómica, han permitido la caracterización de estas comunidades microbianas y sus funciones. Aunque falta mucho al respecto, los investigadores trabajan para generar conocimiento y esclarecer, de cómo pueden aplicarse para el manejo de las enfermedades en las plantas (Qadri *et al.* 2020; Malacrino *et al.* 2022; Zhang *et al.* 2023).

7. Los investigadores por México del programa de agricultura en zonas áridas del CIBNOR y su aportación en relación con las enfermedades vegetales.

A pesar de estos avances, aún existen importantes lagunas en la comprensión de las complejas interacciones entre las plantas y los fitopatógenos, lo que requiere una mayor investigación sobre los aspectos ecológicos, moleculares y funcionales de estas relaciones.

El Programa de Agricultura en Zonas Áridas (PAZA), del Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste, realiza estudios relacionados con las enfermedades de las plantas que afectan tanto a Baja California Sur, así como, aquellas que son un problema en la agricultura mexicana. Los autores del presente escrito han contribuido con este tema en colaboración con los investigadores del PAZA y en sus líneas centrales de investigación.

Por mencionar algunos trabajos, se identificó agentes fitopatógenos que afectan la región semiárida del país, en particular agentes virales (Begomovirus), así como procariontes conocidos como fitoplasmas (Servín-Villegas *et al.* 2018; Medina-Hernández *et al.* 2019;). Por otro lado, se colaboró en la identificación de agentes patógenos en otras regiones agrícolas como es el caso del oomiceto



Phytophthora capsici que afecta las zonas productoras de chayote (*Sechium edule*) en Veracruz (Soto-Contreras et al. 2024).

No se deja de lado el papel de los insectos plagas que son vectores de agentes patógenos, en particular se realizó estudios sobre el efecto de la presencia de agentes patógenos bacterianos en la ecología microbiana del insecto *Bactericella cockerelli*, los cuales en conjunto son causantes de la enfermedad de cultivos como la papa, el tomate y el chile en varios estados de México. Un estudio similar fue realizado con *Bemisia tabaci* vector de agentes virales en cultivos de calabaza y otras hortalizas (Caamal-Chan et al. 2020; Caamal-Chan et al. 2023).

Adicionalmente, se están realizando estudios para dilucidar la interacción planta-patógeno a nivel molecular de la enfermedad de la marchitez del chile causado por *P. capsici* (Barraza et al. 2022; Pérez-Aranda et al. 2025).

Por otro lado, se trabaja para comprender el efecto de los inóculos microbianos en cultivos de importancia agrícola, en paralelo con la comprensión de los eventos moleculares que podrían activar en las plantas (Barraza et al. 2020).

Estas aportaciones al área del conocimiento van de la mano con el compromiso de la formación de recursos humanos, los cuales, tendrán como reto, afrontar un panorama donde las enfermedades actuales o emergentes continuarán como factores clave para la seguridad y soberanía alimentaria (Fig. 1).

a



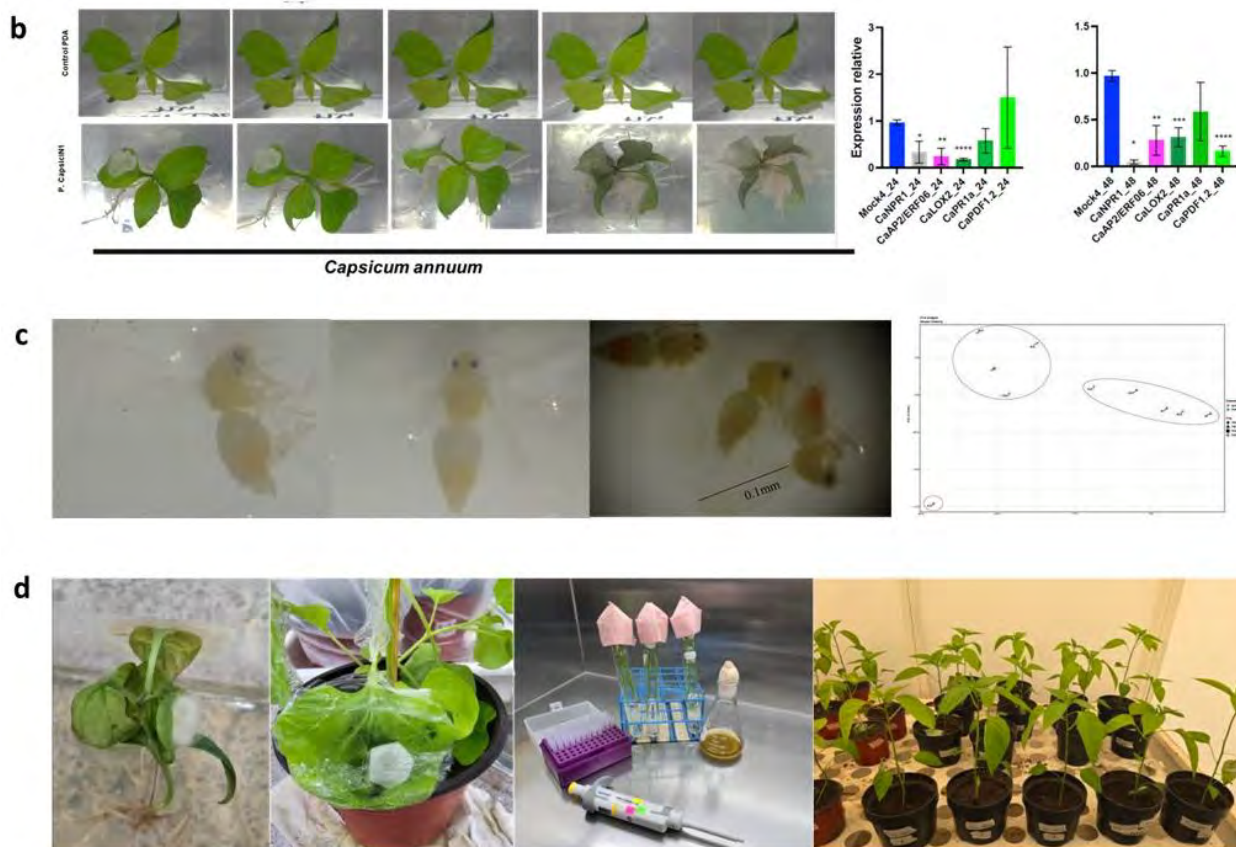


Figura 1. El laboratorio de Ecología Microbiana Molecular del CIBNOR lleva a cabo estudios en temas de fitopatología y de áreas relacionadas. a) Formación de recursos humanos de diferentes grados académicos; b) Estudios de las bases moleculares de la enfermedad de la marchitez del chile; c) Estudio de la ecología bacteriana en insectos vectores de enfermedades vegetal; y d) Diferentes estudios realizados en plantas modelo.

Conclusiones

La sanidad vegetal es crucial para la seguridad alimentaria mundial, la sostenibilidad ambiental y el bienestar humano. Las plantas sanas no solo proporcionan alimento y nutrición, sino que también contribuyen a los servicios ecosistémicos como el secuestro de carbono y la biodiversidad. Las enfermedades y plagas de las plantas pueden afectar significativamente la producción de alimentos, la estabilidad económica y la salud pública. Para abordar estos desafíos, se deben integrar diferentes áreas del conocimiento para comprender y garantizar la “Salud Vegetal”. Con la colaboración intra e interinstitucional, se puede desarrollar enfoques sostenibles e integrales para la agricultura del hoy y del mañana.

Referencias

- Acuña, I., J. Andrade-Piedra, D. Andrivon, J. Armengol, A. Arnold, J. Avelino, et al. 2023. *A global assessment of the state of plant health*. Plant Disease 107(12): 3649-3665.
- Agapito Amador, M.E., V.D. Cibrián-Llenderal, M. Gutiérrez Rojas, D. Ruiz-Juárez, B.E. López Corona, y E.O. Rueda-Puente. 2022. *Phytophthora cinnamomi* Rands en aguacate. Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas. 13(28): 331-341.
- Barraza, A., M.G. Caamal-Chan, T. Castellanos y A. Loera-Muro. 2020. *Bacterial community characterization of the rhizobiome of plants belonging to Solanaceae family cultivated in desert soils*. Annals of Microbiology 70(1): 34.
- Barraza, A., R. Núñez-Pastrana, A. Loera-Muro, T. Castellanos, C.J. Aguilar-Martínez, I.S. Sánchez-Sotelo y M.G. Caamal-Chan. 2022. *Elicitor induced JA-signaling genes are associated with partial tolerance to hemibiotrophic pathogen Phytophthora capsici in Capsicum chinense*. Agronomy 12(7): 1637.
- Berry, E.M., S. Dernini, B. Burlingame, A. Meybeck y P. Conforti. 2015. *Food security and sustainability: Can one exist without the other?*. Public Health Nutrition 18(13): 2293–2302.
- Borrelli, V. M., V. Brambilla, P. Rogowsky, A. Marocco, y A. Lanubile. 2018. *The enhancement of plant disease resistance using CRISPR/Cas9 technology*. Frontiers in Plant Science 9: 1245.
- Bourke A. y J. Hawkes. 1993. *'The visitation of god? the potato and the great Irish famine*. Edited for Irish historical studies by J. Hill y CO Gráda. The Lilliput Press, Dublin, p.230.
- Caamal-Chan, M.G., A. Loera-Muro, A. Barraza, R.J. Holguin-Peña, M.D. Marfil-Santana, C.J. Aguilar-Martínez y I.S. Sánchez-Sotelo. 2020. *Species identification based on mitochondrial cytochrome oxidase I gene and begomoviruses detection of Bemisia tabaci in crops from Baja California Sur, Mexico*. Southwestern Entomologist 45(4): 873-884.
- Caamal-Chan, M.G., A. Barraza, A. Loera-Muro, J.J. Montes-Sánchez, T. Castellanos y Y. Rodríguez-Pagaza. 2023. *Bacterial communities of the psyllid pest Bactericera cockerelli (Hemiptera: Triozidae) Central haplotype of tomato crops cultivated at different locations of Mexico*. PeerJ 11: e16347.
- Cadavid, L., V. Arulnathan y N. Pelletier. 2024. *Food security and food sovereignty: a review of commonly used indicators and consideration of environmental sustainability aspects*. Sustainability 16(24): 11034.



- Castillo, N.E.T., E.M. Melchor-Martínez, J.S.O. Sierra, R.A. Ramirez-Mendoza, R. Parra-Saldívar, y H.M. Iqbal. 2020. *Impact of climate change and early development of coffee rust—An overview of control strategies to preserve organic cultivars in Mexico*. Science of the Total Environment 738: 140225.
- Chaturvedi, A., D. Tripathi, y R. Ranjan. 2025. *Nano-enabled biosensors in early detection of plant diseases*. Frontiers Nanotechnol 7: 1545792.
- Del Moral de la Vega, J. y J. Del Moral Martínez. 2023. *Review of the genesis of plant pathology and its relation to the phytiatry as a necessary element in the sustainable development of agronomy*. Agronomy 13(5): 1285.
- de Vries, S., E.H. Stukenbrock y L.E. Rose. 2020. *Rapid evolution in plant–microbe interactions—an evolutionary genomics perspective*. New Phytologist 226(5): 1256-1262.
- Donoso, A. y S. Valenzuela. 2018. *In-field molecular diagnosis of plant pathogens: recent trends and future perspectives*. Plant Pathology 67(7): 1451-1461.
- Fry, W.E., P.R.J. Birch, H.S. Judelson, N.J. Grünwald, G. Danies, K. L. Everts, et al. 2015. *Five reasons to consider Phytophthora infestans a reemerging pathogen*. Phytopathology 105(7): 966-981.
- Gai, Y., y H. Wang. 2024. *Plant disease: a growing threat to global food security*. Agronomy 14(8): 1615.
- García Cabrera, A.G., y W.D. Veira Figueroa. 2024. *Desarrollo regional en la agricultura mexicana: Efectos del uso de químicos y alternativas sustentables*. <https://ru.iiec.unam.mx/6525/1/23-%20135-García-Veira.pdf>
- Goss, E.M., J.F. Tabima, D.E. Cooke, S. Restrepo, W. E. Fry, G. A. Forbes, et al. 2014. *The irish potato famine pathogen Phytophthora infestans originated in central Mexico rather than the Andes*. Proceedings of the National Academy of Sciences 111(24): 8791-8796.
- Grennes, T. 2007. *The columbian exchange and the reversal of fortune*. Cato Journal 27(1): 91-107.
- Hawkes, J.G. y J. Francisco-Ortega. 1993. *The early history of the potato in Europe*. Euphytica 70(1): 1-7.
- Hossain, M.M., F. Sultana, M. Mostafa, H. Ferdus, M. Rahman, J.A. Rana, et al. 2024. *Plant disease dynamics in a changing climate: impacts, molecular mechanisms, and climate-informed strategies for sustainable management*. Discover Agriculture 2(1): 132.
- Ijaz, U., C. Zhao, S. Shabala y M. Zhou. 2024. *Molecular basis of plant–pathogen interactions in the agricultural context*. Biology 13(6): 421.

- Kutschera, U. y U. Hossfeld. 2012. *Physiological phytopathology: origin and evolution of a scientific discipline*. Journal of Applied Botany and Food Quality 85(1): 1.
- Mac Con Iomaire, M. y P. Gallagher. 2008. The history of the potato in Irish cuisine and culture. Proceedings of the Oxford symposium on food and cooking. Oxford symposium.
- Malacrinò, A., A. Abdelfattah, G. Berg, M.S. Benitez, A.E. Bennett, L. Böttner, et al. 2022. *Exploring microbiomes for plant disease management*. Biological Control 169: 104890.
- Mehrabi, Z., R. Delzeit, A. Ignaciuk, C. Levers, G. Braich, K. Bajaj, et al. 2022. *Research priorities for global food security under extreme events*. One Earth 5(7): 756-766.
- Medina-Hernández, D., M.G. Caamal-Chan, M. Vargas-Salinas, A. Loera-Muro, A. Barraza y R.J. Holguín-Peña. 2019. *Molecular characterization and phylogenetic analysis of a squash leaf curl virus isolate from Baja California Sur, Mexico*. PeerJ 7: e6774.
- Meyer, R.S., A.E. DuVal y H.R. Jensen. 2012. *Patterns and processes in crop domestication: an historical review and quantitative analysis of 203 global food crops*. New Phytologist 196(1):29-48.
- Nunn, N. y N. Qian. 2010. *The Columbian exchange: a history of disease, food, and ideas*. Journal of Economic Perspectives 24(2): 163-188.
- Pankin, A. y M. von Korff. 2017. *Co-evolution of methods and thoughts in cereal domestication studies: a tale of barley (Hordeum vulgare)*. Current Opinion in Plant Biology 36: 15-21.
- Pérez-Aranda, A., A. Loera-Muro y M.G. Caamal-Chan. 2025. *Expression analysis of defense signaling marker genes in Capsicum annuum in response to phytohormones elicitation*. Molecular Biology Reports 52(1): 9.
- Qadri, M., S. Short, K. Gast, J. Hernandez y A.C.N. Wong. 2020. *Microbiome innovation in agriculture: development of microbial based tools for insect pest management*. Frontiers in Sustainable Food Systems 4: 547751.
- Ristaino, J.B. 2002. *Tracking historic migrations of the Irish potato famine pathogen, Phytophthora infestans*. Microbes and Infection 4(13): 1369-1377.
- Ristaino, J.B., P.K. Anderson, D.P. Bebber, K.A. Brauman, N.J. Cunniffe, N.V. Fedoroff, et al. 2021. *The persistent threat of emerging plant disease pandemics to global food security*. Proceedings of the National Academy of Sciences 118(23): e2022239118.
- Rizzo, D.M., M. Lichtveld, J.A. Mazet, E. Togami y S.A. Miller. 2021. *Plant health and its effects on food safety and security in a one health framework: four case studies*. One Health Outlook 3(1): 6.



- Román-Burgos, D. 2025. *Destrucción de la naturaleza y producción de mercancía en Michoacán, México. Estudios sociológicos* 43.
- Savary, S., L. Willocquet, S.J. Pethybridge, P. Esker, N. McRoberts y A. Nelson. 2019. *The global burden of pathogens and pests on major food crops*. *Nature Ecology and Evolution* 3(3): 430–439.
- Servín-Villegas, R., M.G. Caamal-Chan, A. Chavez-Medina, A. Loera-Muro, A. Barraza, D. Medina-Hernández y R.J. Holguín-Peña. 2018. *Identification of a ‘Candidatus Phytoplasma hispanicum’-related strain, associated with yellows-type diseases, in smoke-tree sharpshooter (Homalodisca liturata Ball)*. *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology* 68(6): 2093-2101.
- Soto-Contreras, A., M.G. Caamal-Chan, M.A. Ramírez-Mosqueda, J. Murguía-González y R. Núñez-Pastrana. 2024. *Morphological and molecular identification of Phytophthora capsici isolates with differential pathogenicity in Sechium edule*. *Plants* 13(12): 1602.
- Sundström, J.F., A. Albiñ, S. Boqvist, K. Ljungvall, H. Marstorp, C. Martiin, K. Nyberg, I. Vagsholm, J. Yuen y U. Magnusson. 2014. *Future threats to agricultural food production posed by environmental degradation, climate change, and animal and plant diseases—a risk analysis in three economic and climate settings*. *Food Security* 6(2): 201-215.
- Van Dijk, M., T. Morley, M.L. Rau, y Y. Saghai. 2021. *A meta-analysis of projected global food demand and population at risk of hunger for the period 2010–2050*. *Nature Food* 2(7): 494-501.
- Villar-Luna, H., M. E. Santos-Cervantes, E. A. Rodríguez-Negrete, J. Méndez-Lozano, y N. E. Leyva-López. 2024. *Economic and social impact of huanglongbing on the mexico citrus industry: A Review and future perspectives*. *Horticulturae* 10(5): 481.
- Vurro, M., B. Bonciani y G. Vannacci. 2010. *Emerging infectious diseases of crop plants in developing countries: impact on agriculture and socio-economic consequences*. *Food Security* 2(2): 113-132.
- Wan, N.F., L. Fu, M. Dainese, L.P. Kiær, Y.Q. Hu, F. Xin, et al. 2025. *Pesticides have negative effects on non-target organisms*. *Nature Communications* 16(1): 1360.
- Yoshida, K., V. J. Schuenemann, L. M. Cano, M. Pais, B. Mishra, R. Sharma, C. Lanz, F. N. Martin, S. Kamoun, J. Krause, M. Thines, D. Weigel, H.A. Burbano. 2013. *The rise and fall of the Phytophthora infestans lineage that triggered the Irish potato famine*. *Elife* 2: e00731.

Zhang, Y., S. Zhang y L. Xu. 2023. *The pivotal roles of gut microbiota in insect plant interactions for sustainable pest management*. npj Biofilms and Microbiomes 9(1): 66.

Fichas curriculares de los autores

- **Dr. Abraham Loera Muro**, SNII nivel I. aloera@cibnor.mx. Investigador por México, SECIHTI, comisionado al CIBNOR en el programa de Agricultura en Zonas Áridas. Ha participado en trabajos de microbiología, biotecnología vegetal y biología. Actualmente sus estudios se centran en las interacciones plantas microorganismos y microorganismos-microorganismos en plantas de interés agrícola.
- **Dr. Aarón Barraza Celis**, SNII nivel I. abarraza@cibnor.mx. Investigador por México, SECIHTI, comisionado al CIBNOR en el programa de Agricultura en Zonas Áridas. Ha participado en trabajos de biotecnología vegetal, fisiología vegetal y biología computacional. Con especialidad en bioinformática enfocada al análisis de la dinámica de la ecología microbiana y la fisiología celular a nivel molecular.
- **Dra. María Goretty Caamal Chan**, SNI nivel I, mcaamal@cibnor.mx. Investigadora por México, SECIHTI, comisionado al CIBNOR en el programa de Agricultura en Zonas Áridas. Ha participado en trabajos de biotecnología vegetal, fisiología vegetal, y biología. Con especialidad en el estudio de la interacción de los hospederos vegetales y sus microorganismos asociados en relación con la detección de microorganismos fitopatógenos, comprensión de mecanismos moleculares durante la interacción entre el hospedero vegetal y microorganismos patógenos o benéficos.

Cita

Caamal-Chan, M.G., A. Barraza, y A. Loera.Muro. La fitopatología y su importancia para lograr la seguridad y soberanía alimentaria de México y el mundo. Recursos Naturales y Sociedad, 2026. Vol. 12(1): 01-20. <https://doi.org/10.18846/renaysoc.2026.12.12.01.0001>



Sometido: 9 de octubre de 2025

Aceptado: 1 de mayo de 2026

Editor asociado: Dr. Arturo Sánchez Paz

Editor ejecutivo: Dr. Arturo Sánchez Paz

Diseño gráfico editorial: Ing. Fca. Elizabeth Villegas Carrazco.

Glyphosate in horseshoe crabs:
a modern contaminant threatening a species millions of years old

Glifosato en cacerolitas de mar: un contaminante moderno que amenaza a una especie de millones de años

Juan José Sandoval-Gío^{1*}, Mariana Velloso Capparelli²,
Pedro Manuel Osorio-Montalvo¹

Resumen

La cacerolita de mar *Limulus polyphemus*, es una especie marina que se distribuye en las costas del Océano Atlántico y se puede hallar en las costas de la Península de Yucatán; ha evolucionado muy poco durante los últimos 250 millones de años, siendo considerada como un fósil viviente. Además de su importancia ecológica, evolutiva y biotecnológica, es útil como biomonitor ambiental debido a su longevidad y a que habita en el fondo marino. Por otra parte, el glifosato es el herbicida más utilizado a nivel mundial, pero está en la mesa de discusión ambiental por sus potenciales efectos dañinos en organismos, incluyendo a los humanos. Recientemente se detectó por primera vez en México la presencia de glifosato en cacerolitas de mar recién muertas de la Reserva de la Biosfera de Ría Lagartos, en Yucatán. Este hallazgo revela la posible contaminación de áreas protegidas con este herbicida, lo que plantea la necesidad de investigar si representa una amenaza para la especie y el ecosistema.

Palabras clave: bioacumulación, herbicidas, organismos marinos, *Limulus polyphemus*, península de Yucatán

¹Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Tizimín, Yucatán, México.

²Instituto IMDEA. Madrid, España.

* Autor de correspondencia: juan.sandoval@ittizimin.edu.mx



Abstract

The American Horseshoe crab (*Limulus polyphemus*) is a marine species found along the Atlantic coast and off the coast of the Yucatan Peninsula. It has evolved very little over the last 250 million years, making it a living fossil. In addition to its ecological, evolutionary, and biotechnological importance, it is useful as an environmental biomonitor due to its longevity and its deep-sea habitat. Glyphosate, on the other hand, is the most widely used herbicide in the world, but it is the subject of environmental debate due to its potential harmful effects on organisms, including humans. Recently, the presence of glyphosate was detected for the first time in Mexico in recently dead horseshoe crabs from the Ria Lagartos Biosphere Reserve, at Yucatan. This finding reveals the possible contamination of protected areas with this herbicide, raising the need to investigate whether it poses a threat to the species and the ecosystem.

Keywords: bioaccumulation, herbicides, marine organisms, *Limulus polyphemus*, Yucatan Peninsula

La cacerolita de mar Limulus polyphemus

La cacerolita de mar *Limulus polyphemus*, es una especie del orden de los xifosuros que es considerada como un fósil viviente, debido a que ha sobrevivido a las extinciones masivas del planeta y lo ha habitado por aproximadamente 445 millones de años (Rudkin *et al.* 2008). Su distribución incluye las costas y áreas de manglar de dos regiones en América, en la costa atlántica de EUA, desde Florida hasta Maine y en la península de Yucatán, en México. Existen otras tres especies de este artrópodo, también denominado cangrejo herradura, que se distribuyen en países del sudeste de Asia como Vietnam, Singapur, Filipinas, Tailandia y Japón (Smith *et al.* 2017).

La cacerolita de mar es parte esencial en la cadena alimenticia del ambiente marino (ver Figura 1); al ser predominantemente bentónica, es decir, que vive enterrada en la arena, remueve la materia orgánica y se alimenta de invertebrados pequeños. Y cuando sale del ambiente marino para desovar es alimento de pequeños mamíferos y cocodrilos. Su dieta se basa en nematodos, poliquetos, crustáceos, mejillones, almejas, y peces muertos; a su vez, en estado adulto son fuente de alimento de tortugas marinas, mientras que sus huevos y larvas son el alimento de aves, peces, así como de muchos invertebrados, como los cangrejos. Como depredador y presa es indudable su papel en el equilibrio de las comunidades (Gómez -Aguirre y Yáñez Martínez, 1995). La reproducción de estos

organismos se rige por las fases lunares; en las noches de luna llena, salen del mar, la hembra deposita sus huevos en la arena y el macho los fertiliza. La arena cubre los huevos durante un mes hasta que las larvas eclosionan tras el movimiento de la marea de la siguiente fase lunar.

Su importancia para el humano empezó a ser evidente cuando aproximadamente en 1980, esta especie comenzó a ser muy apreciada en el ámbito biotecnológico mundial, ya que su sangre o hemolinfa contiene un compuesto, denominado Lisado de Amebocitos de Limulus (LAL), que se coagula cuando detecta la presencia de agentes bacterianos, por lo que ha sido útil en la industria biomédica para procesos de aseguramiento de la calidad e inocuidad de fármacos (Novitsky, 1984).



Figura 1. Cacerolita de mar en la arena.

Especie en peligro de extinción

En México, cada vez es menos común ver a la cacerolita de mar en las costas de los tres estados de la península de Yucatán. *L. polyphemus* se encuentra en la lista roja de especies amenazadas (The IUCN Red List of Threatened Species™). El 17 de febrero de 2016, se decretó como una especie vulnerable debido a la disminución de sus poblaciones. Además, la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales congruente con el decreto del IUCN (Unión Internacional de Conservación de la Naturaleza, por sus siglas en inglés), la tiene catalogada en peligro de extinción y prohíbe su captura para aprovechamiento (SEMARNAT, 2010). No obstante, hay diversas amenazas que han hecho disminuir sus poblaciones locales, por ejemplo, la fragmentación del hábitat, para construir complejos turísticos en varias zonas de Quintana Roo, el uso ilegal de ejemplares adultos como carnada para el pulpo (ver Figura 2) en costas del oriente de Yucatán (Sandoval Gio et al. 2020) y la degradación de manglares por causas relacionadas al cambio climático y contaminación del recurso hídrico en la Península de Yucatán y sureste del Golfo de México. Aunque se plantea a la industria petrolera de Campeche como un potencial riesgo para la especie, solo hay un estudio (Améndola-Pimenta et al. 2022) sobre cómo pudiese estar afectando la contaminación por hidrocarburos a *L. polyphemus* y sus resultados aún no son concluyentes.



Figura 2. Cacerolita de mar cortada para su uso ilegal como carnada.

El glifosato en la península de Yucatán

En la península de Yucatán se realiza una importante actividad agropecuaria, sin embargo, la mayoría de las prácticas enmarcadas en esta actividad hacen uso de agroquímicos, muchos de los cuales han sido señalados como contaminantes de amplio espectro (Polanco-Rodríguez *et al.* 2018). El subsuelo de esta región tiene una composición kárstica, es decir conformado por material calcáreo de alta permeabilidad ya que proviene de la descomposición de la piedra caliza, lo que hace que el riesgo a la contaminación se haya catalogado como de extrema vulnerabilidad. Esto, porque al no haber lagos y solo pequeños ríos al sur de Campeche, de acuerdo a diversos modelos de distribución del agua (Perry *et al.* 2002), los contaminantes de la superficie permean en forma directa hacia el manto freático para dirigirse por cientos de canales subterráneos, hacia la costa.

Un herbicida, cuyo uso está en la discusión mundial es el glifosato, ya que agencias internacionales de salud y ambiente lo han catalogado como potencialmente cancerígeno (IARC, 2017). En México, en 2024 un decreto presidencial, prohibió la importación del glifosato, pero tras meses de discusión entre el sector agroalimentario y ambiental, el cumplimiento del decreto se pospuso. Así, las tiendas de agroquímicos aun lo venden debido a que la demanda no solo se centra en los productores agropecuarios, sino también en empresas del giro turístico como hoteles y campos de golf, así como en particulares.

El uso de herbicidas basados en glifosato puede disminuir la calidad del agua y en consecuencia modificar la fisiología de la flora y fauna que ahí habita. El glifosato es un herbicida no selectivo, es decir que se usa para eliminar a la mayoría de las plantas o “malas yerbas” y al llegar al ecosistema acuático afecta a organismos “no blanco”, esto es, a los que no se pretende afectar. El daño del herbicida puede ser diverso y depende de varios factores, entre estos: a) la especie en cuestión, b) si el compuesto es grado técnico o formulación comercial, c) la concentración de glifosato en agua y d) si la exposición fue aguda o crónica.

En algunas zonas de la península de Yucatán se han detectado concentraciones de glifosato, tanto en agua potable, como subterránea, lo que sugiere mecanismos de distribución y exposición en organismos “no blanco”, que deben ser estudiados con mayor amplitud. En un estudio realizado por Rendón-von Osten y Dzul-Caamal (2017), se detectaron diversas concentraciones de glifosato en agua embotellada, agua subterránea y orina de habitantes de Hopelchén, Campeche, lo que indica una exposición frecuente al herbicida, como resultado del uso indiscriminado en actividades agrícolas, especialmente de cultivo de soya transgénica en la región. A pesar de que algunos



estudios han evidenciado que no hay datos concluyentes de riesgo asociado a la exposición al glifosato, las pruebas de daño a la salud relacionadas al uso de este herbicida han sido presentadas en forma numerosa en la literatura mundial. De ahí, la importancia de seguir investigando los mecanismos de distribución de esta sustancia y los efectos adversos en la salud humana y en la biota acuática y terrestre.

Problemática e investigación

Ría Lagartos es el primer sistema lagunar registrado para México en la Convención RAMSAR (Mauerhofer et al. 2015) y colinda con el municipio de Tizimín, en la zona oriente de Yucatán; esta región es la de mayor actividad ganadera de la península y está catalogada de vulnerabilidad extrema, según el índice de vulnerabilidad del acuífero de Yucatán (IVAKY) (Aguilar-Duarte et al. 2016). Además, los registros actuales indican que la región oriente de Yucatán, al igual que el Sur de Campeche, son las de mayor crecimiento de soya transgénica cultivada del país. En estos cultivos, se usa el glifosato porque es selectivo para eliminar hierbas malas y arvenses, sin dañar las plantas de soya.

Una investigación realizada por Sandoval-Gío et al. (2022) documentó, por primera vez en México, la presencia de glifosato en organismos marinos, específicamente en cacerolitas de mar recién muertas, recolectadas en cuatro localidades costeras dentro de la Reserva de la Biosfera de Ría Lagartos, ubicada al noreste de la península de Yucatán. Este hallazgo constituye el primer registro de bioacumulación de glifosato en una especie marina en el país, lo que representa un importante indicio del impacto de este herbicida más allá de los ecosistemas terrestres, en especial dentro del área natural protegida, donde se esperaría un mínimo o nulo nivel de contaminación. Si bien los investigadores no pudieron confirmar que el glifosato haya sido la causa directa de la muerte de los ejemplares, el solo hecho de encontrar residuos del herbicida en organismos marinos resalta una grave contradicción entre los objetivos de conservación de la reserva y la realidad de la contaminación presente. Los mecanismos de distribución de los contaminantes señalan que se pueden ir bioacumulando y biomagnificando a través de la cadena trófica, por lo que preocupa que otras especies del área natural protegida, especialmente las que viven en asociación con el sedimento, como aves playeras, flamencos y tortugas, pudieran estar contaminadas también. Esto, porque los contaminantes orgánicos, por su condición lipofílica e hidrofóbica, se depositan con más frecuencia en el sedimento que en la columna de agua.

Estudios aseguran que la cacerolita de mar puede vivir de 15 a 20 años (Shuster y Sekiguchi, 2003),

y la mayor parte de su vida la pasa enterrada en sedimentos finos, comunes en áreas de manglares y estuarios de la Península, áreas que son sumideros de contaminantes y desechos sólidos, como los plásticos. El hecho de que su distribución está limitada a la península de Yucatán, hace que la especie pueda ser de utilidad como bioindicador y biomonitor de la contaminación de su entorno (Bakker *et al.* 2017). De igual manera, otra ventaja de utilizar a la cacerolita de mar como modelo de estudio ecotoxicológico es que sus huevecillos y larvas son transparentes (ver Figura 3), lo que permite observar con mayor certeza cambios morfológicos en exposiciones agudas a contaminantes. No obstante estas ventajas en su utilización y las amenazas crecientes a la especie, son escasas las investigaciones sobre el efecto de contaminantes en *Limulus polyphemus*.

Hasta ahora, se conoce poco sobre los efectos de los contaminantes en *L. polyphemus*, a pesar de que habita en zonas crónicamente expuestas a múltiples estresores ambientales, como micro y nanoplásticos, contaminantes emergentes y los impactos del cambio climático global. En un esfuerzo conjunto, investigadores del Tecnológico Nacional de México (TecNM), El Colegio de la Frontera Sur (ECOSUR) y la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) han iniciado una línea de investigación orientada a evaluar los efectos de estos estresores sobre la especie. El objetivo es determinar su grado de vulnerabilidad y proponer áreas prioritarias para su conservación en la península de Yucatán.



Figura 3. Huevecillos de la cacerolita de mar recién colectados en campo.



Conclusiones

Los organismos que habitan el entorno marino están expuestos a múltiples estresores que los afectan desde un contexto físico o químico-biológico. La península de Yucatán tiene un subsuelo kárstico, lo que permite la dispersión de los contaminantes, incrementando la vulnerabilidad de las especies que habitan las aguas costeras en la región. Entre los contaminantes más estudiados se encuentra el glifosato, un herbicida que se utiliza mucho en la zona, especialmente para cultivo de soya transgénica. Se ha evidenciado la acumulación de este herbicida en la cacerolita de mar *Limulus polyphemus* de la Reserva de la Biosfera de Ría Lagartos, por lo que se enciende una alarma ecológica, en el mediano o largo plazo, no solo para esta especie sino para otras que habitan el área natural protegida. De ahí la necesidad de realizar estudios que demuestren las afectaciones del herbicida y de otros contaminantes en este organismo, un fósil viviente amenazado de extinción, y que puede ser utilizado como indicador de la calidad ambiental de su entorno.

Agradecimientos

Esta revisión se deriva de la colaboración entre la “Red de investigación de aprovechamiento y conservación de los recursos marinos de la península de Yucatán” del Tecnológico Nacional de México y la Universidad Nacional Autónoma de México. Se agradece a la M. en C. Mitzi Yanin Ayala Campos, quien proporcionó las figuras 1 y 3.

Literatura citada

- Aguilar-Duarte, Y., F. Bautista, M.E. Mendoza y C. Delgado. 2016. *Vulnerabilidad y riesgo de contaminación de acuíferos kársticos*. Tropical and Subtropical Agroecosystems 16(2): 243 – 263.
- Améndola-Pimenta M., J.C. Alcocer-Domínguez, J.J. Sandoval-Gio, C.E. González-Penagos, J.A. Zamora-Briseño, J.P. Ek-Huchim y R. Rodríguez-Canul. 2022. *Differential gene expression induced by acute exposure to Water Accommodated Fraction (WAF) and Chemically Enhanced WAF (CEWAF) of light crude oil and Nokomis 3-F4 in Limulus polyphemus larvae*. Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology 108(1): 99-106.
- Bakker, A.K., J. Dutton, M. Sclafani y N. Santangelo. 2017. *Accumulation of nonessential trace elements (Ag, As, Cd, Cr, Hg and Pb) in Atlantic horseshoe crab (Limulus polyphemus) early life stages*. Science of the Total Environment (596-597): 69-78.
- Gómez Aguirre, S., y A. Yáñez Martínez. 1995. *Evaluación estacional de las poblaciones de Limulus polyphemus L. en el norte de la Península de Yucatán (1994-1995)*. Revista de la Sociedad Mexicana de Historia Natural 46:49–54.
- IARC 2017. Working Group on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans. *Some Organophosphate Insecticides and Herbicides*. Lyon (FR): International Agency for Research on Cancer; PMID: 31829533.
- Mauerhofer, V., R. E. Kim y C. Stevens. 2015. *When implementation works: A comparison of Ramsar Convention implementation in different continents*. Environmental Science and Policy 51: 95-105.
- Novitsky, T.J. 1984. *Discovery to commercialization: the blood of the horseshoe crab*. Oceanus 27(1): 13–18.
- Perry E., G. Velázquez-Oliman y L. Marín. 2002. *The hydrogeochemistry of the karst aquifer system of the Northern Yucatan Peninsula, Mexico*. International Geology Review 44, 191–221.
- Polanco-Rodríguez, A.G., J.A. Araujo-León, J.M. Tamayo-Manrique y A. Munguía-Gil. 2018. *The glyphosate herbicide in Yucatan, Mexico*. MO J Bioequivalence & Bioavailability 5(6): 284–286.
- Rendón-von, Osten. J. y R. Dzúl-Caamal. 2017. *Glyphosate residues in groundwater, drinking water and urine of subsistence farmers from intensive agriculture localities: a survey in Hopelchén, Campeche, Mexico*. International Journal of Environmental Research and Public Health 14(6): 595.



- Rudkin, D. M., G. A. Young y G. S. Nowlan. 2008. *The oldest horseshoe crab: A new xiphosurid from late ordovician konservat-lagerstätten deposits, Manitoba, Canada*. *Palaeontology* 51(1), 1–9.
- Sandoval-Gío J.J., G.A. Avilés-Ramírez, H.J. Ortiz-León, R. Zamora-Bustillos, C.O. Rosas-Correa y J.M. Castro Pérez. 2020. *Effects of the octopus fishery on the American horseshoe crab population in the Ría Lagartos Biosphere Reserve*. *Ciencias Marinas* 46:77–88.
- Sandoval-Gío, J.J., Á.G. Polanco-Rodríguez, J.A. Araujo-León, M.I. Burgos-Díaz, B. Yáñez-Rivera y J.C. De la Cruz. 2022. *First evidence of glyphosate in American horseshoe crab from the Yucatan Peninsula in Mexico*. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology* 108(4): 646–651.
- SEMARNAT. 2010. Norma Oficial Mexicana NOM-059-SEMARNAT-2010. Protección ambiental– Especies nativas de México de flora y fauna silvestres– Categorías de riesgo y especificaciones para su inclusión, exclusión ´ o cambio– Lista de especies en riesgo, SEMARNAT, Ciudad de México.
- Shuster C.N. Jr. y K. Sekiguchi 2003. *Growing up takes about ten years and eighteen stages*. pp. 103–132. En: Shuster C.N. Jr., R.B. Barlow y H.J. Brockmann (Eds.). *The American Horseshoe Crab*. Harvard Press. Cambridge, Gran Bretaña. 427 pp.
- Smith, D.R., H.J. Brockmann, M.A. Beekey, T.L. King, M.J. Millard y J. Zaldivar-Rae. 2017. *Conservation status of the American horseshoe crab (Limulus polyphemus): a regional assessment*. *Reviews in Fish Biology and Fisheries* 27: 135–175.

Datos de los autores:

- **Dr. Juan José Sandoval-Gío**

Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Tizimín, Yucatán, México
Nivel 1 del Sistema Nacional de Investigadoras e Investigadores
Correo electrónico: juan.sandoval@ittizimin.edu.mx

- **Dra. Mariana Velloso Capparelli**

Instituto IMDEA. Madrid, España.
Nivel 1 del Sistema Nacional de Investigadoras e Investigadores
Correo electrónico: mariana.capparelli@imdea.org

- **Dr. Pedro Manuel Osorio Montalvo**

Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Tizimín, Yucatán, México
Nivel Candidato del Sistema Nacional de Investigadoras e Investigadores
Correo electrónico: pedro.osorio@ittizimin.edu.mx

Cita

Sandoval-Gío, J.J., M. Velloso Capparelli y P. M. Osorio-Montalvo. Recursos Naturales y Sociedad, 2026. Vol. 12(1): 22-32. <https://doi.org/10.18846/renaysoc.2026.12.12.01.0002>.

Sometido: 26 de agosto de 2025

Aceptado: 6 de abril de 2026

Editora asociada: Dra. Crisalejandra Rivera-Pérez

Editora ejecutiva: Dra. Crisalejandra Rivera-Pérez

Diseño gráfico editorial: Ing. Fca. Elizabeth Villegas Carrazco

Food ecology and habitat use of
the mule deer (*Odocoileus hemionus*) in arid and semi-arid ecosystems:
trophic dynamics, adaptations, supplementation and management challenges

Ecología alimentaria y uso del hábitat del venado bura (*Odocoileus hemionus*) en ecosistemas áridos y semiáridos: dinámica trófica, adaptaciones, suplementación y retos para el manejo

Uriel López-Yllescas¹, Juan A. Encina-Domínguez¹ y Jorge E. Ramírez-Albores^{2*}

Resumen

El venado bura (*Odocoileus hemionus*) constituye un herbívoro clave en ecosistemas áridos y semiáridos de Norteamérica, donde enfrenta temperaturas extremas, baja productividad primaria y disponibilidad hídrica restringida. Su ecología alimentaria refleja una marcada especialización como selector de concentrados, dependiente de tejidos vegetales jóvenes y nutritivos, con limitada tolerancia a dietas fibrosas debido a la baja capacidad ruminal y a tiempos reducidos de retención del alimento. Estas características vinculan su desempeño nutricional a la fenología del matorral desértico y a la heterogeneidad espacial del hábitat. Los patrones de forrajeo, predominantemente crepusculares, sugieren un compromiso entre eficiencia energética, termorregulación y reducción del riesgo de depredación. La disponibilidad de agua influye en la actividad diaria y en la calidad de la dieta; sin embargo, los puntos artificiales pueden inducir agregaciones que incrementan la vulnerabilidad ante depredadores y patógenos. En las UMAs, la suplementación alimenticia resulta útil solo de manera temporal, ya que no reemplaza la estructura y función de la vegetación nativa ni revierte la degradación del hábitat.

¹ Departamento de Recursos Naturales Renovables, Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. Saltillo, Coahuila, México. uriellyllescas@outlook.com (UL-Y), jaencinad@gmail.com (JAE-D).

² Departamento de Botánica, Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. Saltillo, Coahuila, México. jorgeramirez22@hotmail.com (JER-A).

* Autor de correspondencia: jorgeramirez22@hotmail.com



En conjunto, la evidencia indica que la conservación efectiva del venado bura requiere mantener paisajes vegetales diversos, garantizar recursos hídricos adecuados y aplicar medidas de suplementación bajo esquemas de manejo adaptativo sustentados en criterios ecológicos.

Palabras clave: Cervidae, ecosistemas áridos, forrajeo, norte de México, suplemento alimenticio.

Abstract

Mule deer (*Odocoileus hemionus*) is a keystone herbivore in arid and semi-arid ecosystems of North America, where it faces extreme temperatures, low primary productivity, and restricted water availability. Its feeding ecology reflects a marked specialization as a concentrate selector, dependent on young, nutritious plant tissues, with limited tolerance for fibrous diets due to low rumen capacity and short feed retention times. These characteristics link its nutritional performance to the phenology of the desert scrub and the spatial heterogeneity of the habitat. Foraging patterns, predominantly crepuscular, suggest a trade-off between energy efficiency, thermoregulation, and reduced predation risk. Water availability influences daily activity and diet quality; however, artificial watering points can induce aggregation, increasing vulnerability to predators and pathogens. In Wildlife Management Units (UMAs), supplemental feeding is only temporarily useful, as it does not replace the structure and function of native vegetation or reverse habitat degradation. Taken together, the evidence indicates that the effective conservation of mule deer requires maintaining diverse plant landscapes, ensuring adequate water resources, and applying supplementation measures under adaptive management schemes based on ecological criteria.

Key words: Cervidae, arid ecosystems, foraging, northern Mexico, feeding supplement.

Introducción

El venado bura (*Odocoileus hemionus*) es uno de los herbívoros nativos emblemáticos de Norteamérica, además de desempeñar un papel fundamental en el funcionamiento de los ecosistemas áridos y semiáridos. Su distribución histórica abarca desde las regiones montañosas del oeste de Canadá hasta los matorrales desérticos del norte de México (Figura 1; Weber y Galindo-Leal, 2005; Berry *et al.*, 2019). En México, su presencia está fuertemente vinculada a la ecorregión del Desierto Chihuahuense, que se extiende a lo largo de Coahuila, Chihuahua, Durango, Zacatecas, San Luis Potosí y Nuevo León, así como hacia el sur de Estados Unidos (Figura 1; Weber y Galindo-Leal, 2005; Berry *et al.*, 2019).

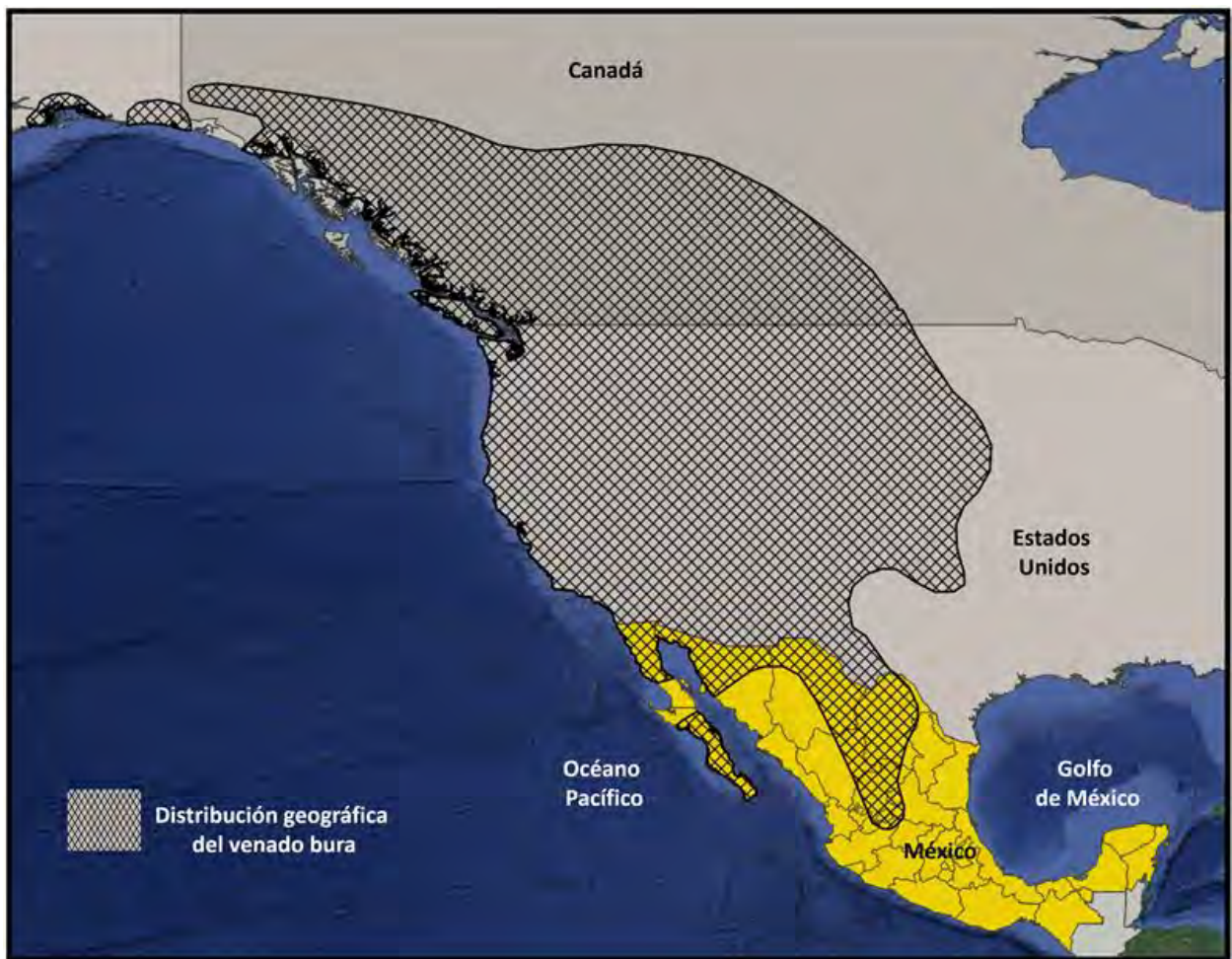


Figura 1. Distribución geográfica del venado bura (Modificado de Sánchez-Rojas y Gallina, 2016).



Los venados que habitan estos ambientes enfrentan condiciones caracterizadas por altas temperaturas, fuerte estacionalidad, baja productividad primaria y disponibilidad limitada de agua. Aunque el venado bura se describe tradicionalmente como un herbívoro oportunista y selectivo, con preferencia por vegetación de alto valor nutritivo, su comportamiento alimentario muestra una notable plasticidad que le permite adaptarse a ambientes muy variables (Hanley, 1997; Sánchez-Rojas y Gallina, 2000).

En las siguientes secciones se analiza con detalle la ecología alimentaria del venado bura, es decir, qué factores influyen en su dieta, uso de suplementadores alimenticios y los retos que estos sistemas plantean para la conservación y manejo en UMAs (Unidades de Manejo para la Conservación de la Vida Silvestre). Para ello, también se consideran integran estudios de caso en especies similares, como el venado cola blanca (*Odocoileus virginianus*), ciervo rojo (*Cervus elaphus*) y corzo (*Capreolus capreolus*), con el fin de contextualizar los procesos ecológicos y de manejo que comparten los herbívoros selectores de concentrados.

Bases digestivas y fisiológicas de un herbívoro “selector de concentrados”

Los venados pertenecen a un grupo de animales conocidos como rumiantes, pero no todos se alimentan de la misma manera. En términos generales, existen tres estrategias de alimentación: ramoneadores, pasteros y selectores de concentrados (Gordon, 2003; Newman y D´Angelo, 2024). El venado bura se ubica predominantemente en el último grupo. Esto significa que prefiere alimentos de alta calidad, como brotes tiernos, hojas jóvenes y frutos, en lugar de pastos duros y fibrosos (Arroyo-Ortega et al., 2023).

Aunque su estómago de cuatro cámaras —rumen, retículo, omaso y abomaso— le permite aprovechar bien los nutrientes, su sistema digestivo no está diseñado para procesar grandes cantidades de fibra. Su estómago funciona como un sistema altamente eficiente en la extracción de nutrientes. Sin embargo, en los selectores de concentrados, la capacidad del rumen es relativamente reducida y el tiempo de retención del material vegetal es corto, lo que limita la digestión de celulosa y hemicelulosa (McCusker et al., 2011). Por ello, depende fuertemente de vegetación joven y nutritiva (Cuadro 1). A diferencia de grandes herbívoros adaptados a consumir pastos duros, como el alce (*Alces alces*) o el ganado bovino (*Bos taurus*), el venado bura tiene un metabolismo más acelerado y le resulta más difícil digerir vegetación fibrosa y lignificada. Esto significa que, cuando escasea el agua o disminuye la disponibilidad de brotes tiernos, es más vulnerable a sufrir deficiencias nutricionales (Olivas-Sánchez et al., 2018).

Cuadro 1. Principales especies vegetales consumidas por el venado bura (*O. hemionus*).

Tipo de recurso	Especies comunes	Época de mayor consumo	Valor nutricional
Arbustos/Arboles	<i>Larrea tridentata</i> , <i>Prosopis glandulosa</i> , <i>Fouquieria splendens</i> , <i>Sphaeralcea angustifolia</i> , <i>Chilopsis linearis</i> , <i>Aphanostephus ramosissimus</i> , <i>Senegalia berlandieri</i> , <i>Vachellia farnesiana</i> , <i>Celtis pallida</i> , <i>Rhus microphylla</i>	Invierno–primavera	Alto en compuestos secundarios, moderada proteína
Hierbas anuales	Diversas Asteraceae y Poaceae nativas	Primavera–verano	Alta proteína, alta humedad
Pastos perennes	<i>Pleuraphis mutica</i> , <i>Acalypha</i> spp., <i>Cyperus</i> spp., <i>Aristida divaricata</i> , <i>Croton texensis</i> , <i>Dytaxis serrata</i> , <i>Muhlenbergia</i> spp.	Variable	Bajo a moderado
Cactáceas	<i>Opuntia</i> spp., <i>O. leptocaulis</i> , <i>Yucca elata</i> , <i>Ephedra trifurca</i>	Sequías extremas	Alta humedad, carbohidratos

En muchos venados, comer rápido y masticar poco no es descuido, sino una estrategia para mantenerse a salvo (Heffelfinger, 2006). Este comportamiento, bien documentado en los cérvidos, les permite reducir el tiempo que pasan expuestos a posibles depredadores: ingieren el alimento con rapidez y después lo regurgitan para remasticarlo con calma en lugares más seguros. Como resultado, no solo buscan qué comer, sino también dónde hacerlo, eligiendo microhábitats que ofrezcan tanto alimento de buena calidad como refugio para rumiar sin riesgo.

Selección de dieta y patrones de forrajeo

La dieta del venado bura cambia a lo largo del año (Olivas-Sánchez *et al.*, 2015, 2018). Durante la primavera y el verano, cuando las lluvias favorecen el crecimiento de plantas, consume principalmente herbáceas y brotes ricos en agua. En invierno, cuando estos recursos escasean, recurre más al ramoneo de arbustos (Heffelfinger, 2006).

Su actividad alimentaria ocurre principalmente al amanecer y al atardecer (Weber y Galindo-Leal, 2005). Este comportamiento no es casual: le permite evitar el calor extremo y reducir el riesgo de depredación (Harris *et al.*, 2015; Lendrum *et al.*, 2017). Más allá de lo que come, también importa dónde come. El venado selecciona sitios que combinan alimento de calidad con cobertura vegetal, lo que le permite alimentarse y, al mismo tiempo, mantenerse protegido. Este patrón es común entre herbívoros en ambientes áridos y se interpreta como una respuesta adaptativa que optimiza el equilibrio entre termorregulación, eficiencia energética y vigilancia antipredatoria (Cain *et al.*, 2006).



En regiones de México como Coahuila y Chihuahua, la selección de plantas incluye especies dominantes del matorral desértico: toboso (*Hilaria mutica*), mezquite (*Neltuma glandulosa*), gobernadora (*Larrea tridentata*), ocotillo (*Fouquieria splendens*), así como diversas herbáceas anuales que emergen tras eventos de lluvia (Cuadro 1). La selección no responde únicamente a la calidad nutricional; también depende de la estructura de la vegetación, que proporciona sombra, rutas de escape y cobertura para rumiación (Gallina y Bello, 2014).

Este conjunto de decisiones alimenticias tiene implicaciones en la configuración espacial del uso del hábitat. Las hembras gestantes o con crías, por ejemplo, se desplazan estratégicamente entre parches alimenticios y áreas de descanso seguras, reduciendo su exposición a depredadores como el puma (*Puma concolor*) o el coyote (*Canis latrans*) (Esparza-Carlos et al., 2019). En épocas de calor extremo, pueden permanecer inactivas durante gran parte del día, lo cual reduce la pérdida de agua por termorregulación y maximiza la eficiencia energética.

Vegetación clave y asociaciones estructurales en zonas de forrajeo

Las asociaciones vegetales que sustentan las poblaciones de venado bura presentan una notable heterogeneidad espacial. En áreas donde predomina el toboso, la productividad tiende a ser baja, pero la estructura del pastizal ofrece rutas de escape amplias y visibilidad suficiente para detectar depredadores (Harvey y Fortin, 2013). Por otro lado, comunidades dominadas por mezquites mantienen un microclima más benigno, con mayor retención de humedad en el suelo y disponibilidad de brotes tiernos incluso en periodos de sequía moderada.

El ocotillo y la gobernadora son especies ampliamente utilizadas como fuentes complementarias de alimento y como cobertura estructural (Cuadro 1). Sus patrones fenológicos permiten al venado obtener nutrientes en momentos del año donde otras plantas presentan baja calidad. En general, las zonas utilizadas para alimentación y descanso alternan mosaicos de vegetación alta y baja, áreas de sombra y pastizales abiertos. Esta “arquitectura del paisaje” resulta crucial para mantener poblaciones saludables, especialmente en sistemas donde las actividades humanas —ganadería extensiva, introducción de gramíneas exóticas o desmontes— reducen la diversidad y continuidad de parches vegetales.

Disponibilidad de agua y su importancia para la dinámica nutricional

El agua es un recurso clave en ambientes áridos. Aunque el venado bura puede obtener parte del agua de los alimentos, durante el verano necesita acudir con mayor frecuencia a fuentes hídricas (McKee *et al.*, 2015). El consumo diario puede variar entre 2 y 4 litros por cada 50 kg de peso corporal, aunque esta cifra depende de la temperatura ambiental, el nivel de actividad y la humedad del forraje (Monteith *et al.*, 2014).

Durante el verano, cuando el contenido hídrico de las plantas disminuye, los venados incrementan la frecuencia de visitas a aguajes naturales o bebederos artificiales. Este comportamiento puede aumentar la vulnerabilidad a depredadores y facilitar la propagación de enfermedades, especialmente en sitios donde convergen múltiples individuos (Ndachena *et al.*, 2025).

En este contexto, en muchas UMAs del norte de México se instalan bebederos artificiales para mitigar el estrés hídrico; sin embargo, su manejo requiere una planificación cuidadosa. La colocación de bebederos en sitios abiertos (Eliades *et al.*, 2022; Contreras-Moreno *et al.*, 2024a), por ejemplo, puede aumentar el riesgo de depredación. Además, cuando muchos animales se concentran en un mismo punto aumenta la presión de pastoreo, se degrada el suelo y se facilita la transmisión de enfermedades. En conjunto, estos efectos comprometen el equilibrio ecológico y la estabilidad poblacional a largo plazo. Asimismo, instalar demasiados bebederos también tiene efectos negativos como la modificación de los patrones naturales de movimiento y puede generar dependencia de estos recursos. Esta agregación artificial también modifica las interacciones intra e interespecíficas y puede generar dependencia de recursos suplementarios, disminuyendo la resiliencia de las poblaciones frente a la variabilidad ambiental (Shields *et al.*, 2012; Mejía-Salazar *et al.*, 2018).

En este contexto, la implementación de bebederos debe ajustarse al tamaño del predio y a la densidad poblacional, evitando esquemas uniformes. En predios extensos, es recomendable una distribución estratégica y espaciamiento suficiente que promueva el uso heterogéneo del hábitat y reduzca la sobreconcentración de individuos (Shields *et al.*, 2012; Contreras-Moreno *et al.*, 2024ab). Por el contrario, en predios pequeños o con altas densidades, la instalación de pocos puntos de agua, cuidadosamente ubicados en zonas con cobertura vegetal y condiciones topográficas favorables, puede minimizar riesgos ecológicos. Asimismo, es fundamental integrar monitoreo continuo de la condición corporal, uso del hábitat y estado de la vegetación para ajustar adaptativamente la cantidad y localización de los bebederos. Este enfoque permite equilibrar los beneficios de la suplementación hídrica con la conservación de los procesos ecológicos naturales.

Suplementación alimenticia en UMAs: beneficios, restricciones y riesgos ecológicos

La suplementación alimenticia es una práctica común en el manejo del venado bura, especialmente en UMAs con fines cinegéticos o a la conservación de poblaciones silvestres (CONABIO, 2020). En el caso del venado bura, la suplementación busca mejorar la condición corporal y aumentar el éxito reproductivo (Cuadro 2, Figura 2).



Figura 2. Alimentación del venado bura con suplementadores alimenticios en UMA's.

Cuadro 2. Ventajas y limitaciones de la suplementación alimentaria en cérvidos.

Aspecto	Ventajas	Limitaciones / Riesgos
Condición corporal	Mejora peso y reservas energéticas	Puede generar dependencia
Reproducción	Aumenta tasas de éxito reproductivo	Cambios en estructura social
Distribución espacial	Reduce movimientos en periodos críticos	Concentración de herbívora
Sanidad	Puede incluir micronutrientes deficitarios	Mayor probabilidad de contagios
Vegetación	Disminuye presión temporal sobre el forraje	Degradación localizada

Los suplementadores se colocan en sitios estratégicos —generalmente en ecotonos o áreas cercanas a zonas de descanso— y suelen ofrecer dietas balanceadas basadas en mezclas de granos, proteínas vegetales, vitaminas y minerales esenciales (Figuras 2 y 3, Cuadros 3 y 4). Estudios con el venado cola blanca (*O. virginianus*) han demostrado que la suplementación puede incrementar el peso corporal, la masa de las astas y el éxito reproductivo, siempre y cuando no sustituya la disponibilidad de vegetación nativa (Cooper *et al.*, 2006; Timmons *et al.*, 2010).

Cuadro 3. Composición típica de suplementos utilizados para venados en UMAs.

Componente	Porcentaje aproximado	Función
Proteína vegetal (soya, alfalfa)	12–18 %	Crecimiento muscular, lactancia
Energéticos (maíz rolado, sorgo)	50–65 %	Provisión de energía rápida
Fibra soluble	5–10 %	Digestión y rumia
Minerales (Ca, P, Na, Zn)	3–5 %	Sistema óseo, astas, metabolismo
Vitaminas A, D, E	1–2 %	Función inmune, salud reproductiva

Cuadro 4. Criterios para la ubicación óptima de suplementadores.

Criterio ecológico	Recomendación
Cobertura vegetal	Debe haber vegetación cercana para permitir refugio
Topografía	Evitar pendientes que incrementen vulnerabilidad
Distancia a aguajes	500–1200 m para evitar sobreconcentración
Distancia a senderos	>300 m de caminos o áreas humanas
Presión de depredación	Evitar colocar en zonas abiertas



Figura 3. Búsqueda de alimento del venado bura con suplementadores alimenticios a diferentes horas del día.

Sin embargo, su uso no está exento de riesgos (Cuadro 5). Entre los principales efectos negativos se encuentran:

1. Concentración de individuos en áreas pequeñas.
2. Mayor probabilidad de transmisión de enfermedades, especialmente aquellas con mecanismos de contagio por contacto o secreciones (e.g., enfermedades respiratorias o parasitarias).
3. Cambios en el comportamiento natural, como el aumento de la competencia intraespecífica en poblaciones densas.
4. Riesgo de dependencia nutricional, donde los venados ajustan su comportamiento a los puntos de alimentación, reduciendo su flexibilidad para periodos de escasez.
5. Mayor vulnerabilidad a depredadores y cazadores furtivos, si los suplementadores no están bien diseñados o situados.

Además, diversos estudios han mostrado que el uso intensivo de alimento suplementario puede afectar negativamente la integridad nutricional del ecosistema. Por ejemplo, en poblaciones sobreabundantes del ciervo rojo (*Cervus elaphus*) en Europa, la suplementación prolongada incrementó el impacto sobre la vegetación arbustiva y redujo la regeneración de especies clave (Putman y Staines, 2004). Por ello, la suplementación no debe sustituir al hábitat natural, sino funcionar únicamente como apoyo temporal en situaciones críticas. La vegetación nativa sigue siendo la única fuente sostenible de nutrientes que mantiene las funciones ecológicas necesarias para la supervivencia del venado bura.

**Cuadro 5. Riesgos ecológicos del uso de suplementadores alimenticios en UMAs y ANPs.**

Aspecto evaluado	Beneficios	Riesgos potenciales	Recomendaciones de manejo
Condición corporal	Mejora de condición en invierno; soporte nutricional para hembras lactantes.	Dependencia artificial; reducción de selectividad natural; alteraciones en fenología alimentaria.	Uso sólo en temporadas críticas; monitorear condición corporal.
Supervivencia juvenil	Incremento en supervivencia de crías bajo escasez prolongada.	Agregación de individuos aumenta transmisión de patógenos (<i>Eimeria</i> , helmintos).	Espaciar puntos de suplementación; evitar sobreconcentración; limpieza periódica.
Patrones de movimiento	Permite disminuir desplazamientos energéticamente costosos.	Cambios en patrones naturales; territorialidad alterada; movimientos predecibles elevan riesgo de depredación o cacería furtiva.	Colocar en zonas seguras; monitoreo con cámaras trampa para detectar cambios conductuales.
Estructura poblacional	Puede estabilizar poblaciones pequeñas o aisladas.	Aumento artificial de densidad → degradación local del hábitat.	Ajustar suplementación a densidad estimada; evitar sobrepoblación artificial.
Competencia con especies invasoras	Puede mejorar competitividad del nativo en condiciones extremas si se regula adecuadamente.	En UMAs mixtas favorece más a <i>Ammotragus lervia</i> . <i>lervia</i> y ganado que a <i>O. hemionus</i> .	Exclusión espacial de invasores; suplementación dirigida y controlada.
Integridad ecológica	Apoyo temporal para restauración en etapas tempranas.	Alteración de procesos de selección dietaria y funcionalidad ecosistémica.	Mantener suplementación como herramienta de manejo, no como sustituto del hábitat.

Estudios de caso relevantes en cérvidos y su aplicación al manejo de venado bura

Para comprender mejor las implicaciones ecológicas de la suplementación y el manejo nutricional, resulta útil examinar estudios de caso en otras especies de cérvidos:

a) Venado cola blanca (*Odocoileus virginianus*): este ciervo ha sido ampliamente estudiado en ranchos de manejo intensivo. Jacobson et al. (1997) demostraron que la disponibilidad de proteína en la dieta durante primavera-verano influye directamente en la masa corporal y el crecimiento de astas en machos adultos. La suplementación mejoró la condición corporal, pero solo en sitios donde el sobrepastoreo y la competencia con ganado eran bajos. Este hallazgo subraya que la suplementación no compensa la degradación de la vegetación. Por otra parte, Kilpatrick y Stober

(2002) documentaron que la alimentación artificial en zonas suburbanas provocó agregación social anómala y un aumento en la transmisión de enfermedades como la tuberculosis bovina (*Mycobacterium bovis*).

b) Berrendo (*Antilocapra americana*): con patrones de alimentación similares al venado bura. Reinking *et al.* (2019) mostró que, durante inviernos severos, las poblaciones se beneficiaron de la suplementación energética, pero solo cuando la disponibilidad de vegetación nativa era extremadamente baja. En condiciones normales, la suplementación redujo el movimiento migratorio tradicional, alterando el uso espacial del paisaje.

c) Ciervo rojo (*Cervus elaphus*): en poblaciones silvestres de Europa Central, los suplementadores incrementaron la agregación espacial de individuos y modificaron el consumo de especies arbóreas nativas, dificultando la regeneración forestal (Putman y Staines, 2004). Este caso evidencia que el manejo nutricional debe considerar efectos indirectos sobre la vegetación.

d) Ciervo canadiense o wapití (*Cervus canadensis*): la suplementación invernal incrementó la agregación espacial de alces (*Alces alces*) y derivó en daños considerables sobre individuos juveniles de *Pinus sylvestris* (Gundersen *et al.*, 2004). Las densidades locales superaron la capacidad de carga y la presión sobre la vegetación aumentó. Otro ejemplo, en mosaicos agrícolas del norte de Italia, la suplementación alteró la selección de hábitat, generando dependencia energética durante periodos invernales (Ferretti *et al.*, 2015).

Los tres ejemplos demuestran que:

- La suplementación solo es efectiva cuando el hábitat natural se conserva en buen estado.
- Debe utilizarse para aliviar picos estacionales de escasez, no como fuente principal de nutrientes.
- Requiere monitoreo constante para evitar efectos colaterales en la vegetación y en el comportamiento poblacional.



Discusión académica

La evidencia científica muestra que el venado bura está adaptado a ambientes extremos, pero también que depende fuertemente de la calidad del hábitat (Robbins, 2012; Krausman *et al.*, 2017). Su condición de selector de concentrados restringe la flexibilidad dietaria durante periodos de baja productividad, de modo que la calidad del forraje sigue siendo determinante para la supervivencia y el éxito reproductivo. Cuando la vegetación se degrada o se simplifica —por sequías o especies invasoras—, su alimentación y supervivencia se ven directamente afectadas (Parker *et al.*, 2009; Brenner y Kanda, 2013; Monteith *et al.*, 2014; Bestelmeyer *et al.*, 2015). Este proceso ha sido ampliamente discutido en la literatura como un cambio de estado ecosistémico que reduce la resiliencia de los sistemas áridos.

La disponibilidad de agua constituye un segundo eje crítico, aunque su papel ha sido objeto de debate. Mientras algunos trabajos sugieren que el acceso a fuentes hídricas puede limitar la distribución espacial de los ungulados desérticos (Rosenstock *et al.*, 1999), otros estudios indican que especies como el venado bura obtienen una proporción considerable de agua metabólica a partir del forraje, lo que relativiza su dependencia directa de fuentes superficiales (McKee *et al.*, 2015). No obstante, existe consenso en que los puntos de agua artificiales, aunque funcionales en el corto plazo, pueden generar efectos ecológicos no deseados. En particular, se ha documentado que estos sitios incrementan la agregación espacial, alteran los patrones de actividad y elevan el riesgo de depredación y transmisión de enfermedades (Webb *et al.*, 2022). Además, otros estudios advierten que la provisión artificial de agua puede desacoplar procesos ecológicos históricos, modificando gradientes de uso del hábitat que anteriormente estaban regulados por la disponibilidad natural de recursos (Letnic *et al.*, 2005).

Un tercer componente ampliamente debatido es el uso de suplementadores alimenticios. Aunque su implementación puede mejorar la condición corporal durante periodos críticos de escasez (McKee *et al.*, 2015), la evidencia empírica sugiere que sus beneficios son altamente dependientes y, en muchos casos, limitados en el tiempo. Estudios en distintos sistemas han demostrado que la suplementación prolongada tiende a concentrar la herbivoría, modificar los patrones de movimiento y reducir la regeneración de la vegetación nativa (Putman y Staines, 2004; Ferretti *et al.*, 2015). Además, existe evidencia de que la suplementación puede favorecer la transmisión de patógenos al incrementar la densidad de contacto entre individuos (Sorensen *et al.*, 2014), lo que introduce un riesgo adicional para la dinámica poblacional.

En este contexto, la persistencia del venado bura depende en gran medida del mantenimiento de la heterogeneidad vegetal y de la conectividad funcional entre parches de matorral y pastizal. Sus hábitos alimenticios altamente selectivos reflejan una estrecha dependencia de brotes jóvenes, especies clave de alto valor nutritivo y microhábitats que facilitan tanto el forrajeo eficiente como la rumia y el refugio. Desde una perspectiva de manejo, la literatura coincide en que las intervenciones deben priorizar la restauración del hábitat por encima de la suplementación directa (Krausman *et al.*, 2017; Bestelmeyer *et al.*, 2015). En este sentido, la suplementación alimentaria, si bien puede ofrecer beneficios puntuales, debe implementarse bajo criterios científicos rigurosos que consideren la capacidad de carga real del ecosistema, la fenología local de especies vegetales clave, la interacción entre herbívoros silvestres, depredadores y ganado doméstico, así como indicadores de salud poblacional como la condición corporal, tasas reproductivas y prevalencia de parásitos. De lo contrario, su aplicación indiscriminada puede generar efectos contraproducentes, incluyendo la alteración de procesos ecológicos esenciales, la dependencia artificial de recursos y el deterioro progresivo de la vegetación nativa. En conjunto, estos elementos refuerzan la noción de que la viabilidad a largo plazo del venado bura está estrechamente vinculada a la conservación de la diversidad vegetal y a la integridad funcional de los ecosistemas áridos. Bajo este enfoque, la suplementación debe entenderse como una herramienta auxiliar y temporal, integrada en esquemas de manejo adaptativo que incluyan monitoreo continuo, evaluación de la capacidad de carga y estrategias activas de restauración ecológica.

Consideraciones finales y perspectivas

El comportamiento alimentario del venado bura responde a una historia evolutiva estrechamente vinculada a la variabilidad y limitaciones propias de los ecosistemas áridos, así como a una interacción dinámica con la disponibilidad y calidad de los recursos vegetales. Su condición como selector de concentrados, junto con una fisiología digestiva especializada, lo hace altamente dependiente de forraje de alta calidad, lo que a su vez lo posiciona como un bioindicador particularmente sensible de la integridad ecológica del paisaje. Cambios en la composición florística, la estructura de la vegetación o la fenología del matorral desértico suelen reflejarse rápidamente en su condición corporal, patrones de uso del hábitat y desempeño reproductivo.

En este contexto, la conservación de la vegetación nativa —especialmente arbustos y herbáceas clave del matorral y del pastizal desértico— constituye un pilar para garantizar la persistencia a largo plazo de las poblaciones del venado bura. En las UMAs, la suplementación alimenticia puede



desempeñar un papel complementario durante periodos críticos; no obstante, su implementación debe basarse en criterios ecológicos sólidos, con monitoreo sistemático y bajo un enfoque adaptativo. Más que sustituir las funciones del ecosistema, estas prácticas deben integrarse a estrategias orientadas a mantener o restaurar la funcionalidad del hábitat, evitando efectos colaterales como la concentración artificial de individuos o la degradación localizada de la vegetación.

A nivel de manejo, resulta prioritario fortalecer la gestión de los recursos vegetales mediante acciones de restauración ecológica, control de especies invasoras, manejo del pastoreo y recuperación de la heterogeneidad estructural del paisaje. Asimismo, mejorar la conectividad entre parches de hábitat y garantizar una disponibilidad hídrica acorde con las condiciones naturales son elementos clave para sostener poblaciones viables dentro de esquemas productivos compatibles con la conservación.

De cara al futuro, es necesario profundizar en líneas de investigación que integren enfoques interdisciplinarios. Entre ellas destacan: (i) el análisis de la relación entre variabilidad climática y calidad nutricional del forraje mediante teledetección y monitoreo de campo; (ii) estudios sobre la plasticidad alimenticia y su vínculo con la resiliencia poblacional frente al cambio climático; (iii) la evaluación de los efectos a largo plazo de la suplementación alimenticia y de agua sobre la dinámica de enfermedades y las interacciones ecológicas; y (iv) el desarrollo de modelos espaciales que integren capacidad de carga, conectividad y uso del hábitat para optimizar el diseño de UMAs. Estas líneas permitirán transitar hacia esquemas de manejo más predictivos y adaptativos, donde la conservación del venado bura no solo dependa de intervenciones puntuales, sino del mantenimiento integral de los procesos ecológicos que sustentan su nicho.

Agradecimientos

Al Secihti por la beca de posgrado otorgada a UL-Y (932673). A los Fondos Institucionales de Investigación de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro (proyectos 38111-425104001-2178 y 38111-425202001-2301). A los propietarios de los ranchos cinegéticos y a las comunidades ejidales de Monclova por el apoyo logístico y facilidades otorgadas.

Referencias

- Arroyo-Ortega, J.P., A. Macías-Duarte, C.I. Ortega-Rosas y O.G. Gutiérrez-Ruacho. 2023. *Food supplementation increases mule deer (*Odocoileus hemionus eremicus*) retention at the Rancho San Huberto Wildlife Conservation Management Unit, Sonora, Mexico*. *Agrociencia* 57:1311-1343.
- Brenner, J.C. y L.L. Kanda. 2013. *Buffelgrass (*Pennisetum ciliare*) Invades Lands Surrounding Cultivated Pastures in Sonora, Mexico*. *Invasive Plant Science and Management* 6(1):187-195.
- Berry, S.L., L.A. Shipley, R.A. Long y C. Loggers. 2019. *Differences in dietary niche and foraging behavior of sympatric mule and white-tailed deer*. *Ecosphere* 10: e02815.
- Bestelmeyer, B.T., G.S. Okin, M.C. Duniway, S.R. Archer, N.F. Sayre, J.C. Williamson y J.E. Herrick. 2015. *Desertification, land use, and the transformation of global drylands*. *Frontiers in Ecology and the Environment* 13(1): 28–36.
- Cain III, J.W., P.R. Krausman, S.S. Rosenstock y J.C. Turner. 2006. *Mechanisms of thermoregulation and water balance in desert ungulates*. *Wildlife Society Bulletin* 34:570-581.
- Cain III, J.W., J.H. Kay, S.G. Liley y J.V. Gedir. 2024. *Mule deer (*Odocoileus hemionus*) resource selection: trade-offs between forage and predation risk*. *Frontiers in Ecology and Evolution* 12:1121439.
- CONABIO. 2020. *UMAs Unidades de Manejo para la Conservación de la Vida Silvestre*. En: <https://www.biodiversidad.gob.mx/diversidad/UMAs> (Consultado el 22/11/2025).
- Contreras-Moreno, F.M., D. Jesús-Espinosa, K.G. Sánchez-Pinzón, J.M. Méndez-Tun y L. Cruz-Romo. 2024a. *Use of artificial water troughs by deer in the Maya forest, Mexico*. *Therya* 15:103-111.
- Contreras-Moreno, F.M., D. Jesús-Espinosa, L. Cruz-Romo, K.G. Sánchez-Pinzón, J.M. Méndez-Tun, F. Pérez-Méndez, L. Tamay-Yah, E. Gutiérrez-Cortés, V.D. Duque-Moreno, Y. Díaz-Ruiz, D.Y. Servín-Camacho y G. Méndez-Saint Martín. 2024b. *Water supply in artificial troughs: a strategy to mitigate the impacts of climate change in the Maya forest*. *Agro Productividad*.
- Cooper, S.M., M.K. Owens, R.M. Cooper y T.F. Ginnett. 2006. *Effect of supplemental feeding on spatial distribution and browse utilization by white-tailed deer in semi-arid rangeland*. *Journal of Arid Environments* 66:716-726.



- Eliades, N.-G. H., C. Astaras, B.V. Messios, R. Vermeer, K. Nicolaou, I. Karmiris y N. Kassinis. 2022. *Artificial water troughs use by the Mountain Ungulate Ovis gmelini ophion (Cyprus Mouflon) at Pafos Forest*. *Animals* 12(21): 3060.
- Esparza-Carlos, J.P., J.W. Laundré, L. Hernández y L.I. Íñiguez-Dávalos. 2019. *Apprehension affecting foraging patterns and landscape use of mule deer in arid environments*. *Mammalian Biology* 81(6): 543–550.
- Ferretti, F., M. Corazza, I. Campana, V. Pietrocini, C. Brunetti, D. Scornavacca y S. Lovari. 2015. *Competition between wild herbivores: reintroduced red deer and Apennine chamois*. *Behavioral Ecology* 26:550–559.
- Gallina, S., y J. Bello. 2014. *Patrones de actividad del venado cola blanca en el noreste de México*. *Therya* 5:423–426.
- Gordon, I.J. 2003. *Browsing and grazing ruminants: are they different beasts?* *Forest Ecology and Management* 181:13–21.
- Gundersen, H., H.P. Andreassen y T.S. Storaas. 2004. *Supplemental feeding of migratory moose Alces alces: forest damage at two spatial scales*. *Wildlife Biology* 10:213–223.
- Hanley, T.A. 1997. *A nutritional view of understanding and complexity in the problem of diet selection by deer (Cervidae)*. *Oikos* 79:209–218.
- Harris, G., J.G. Sanderson, J. Erz, S.E. Lehnen y M.J. Butler. 2015. *Weather and prey predict mammals' visitation to water*. *PLoS One* 10:1–21.
- Harvey, L. y D. Fortin. 2013. *Spatial heterogeneity in the strength of plant-herbivore interactions under predation risk: The tale of bison foraging in wolf country*. *PLoS One* 8(9): e73324.
- Heffelfinger, J. 2006. *Deer of the Southwest*. College Station, Texas A & M University Press.
- Jacobson, H.A., J.C. Kroll, R.W. Browning, B.H. Koerth y M.H. Conway. 1997. *Infrared-triggered cameras for censusing white-tailed deer*. *Wildlife Society Bulletin* 25: 547–556.
- Kilpatrick, H.J. y W.A. Stober. 2002. *Effects of temporary bait sites on movements of suburban white-tailed deer*. *Wildlife Society Bulletin* 30:760–766.
- Lendrum, P.E., K.R. Crooks y G. Wittenmyer. 2017. *Changes in circadian activity patterns of a wildlife community post high-intensity energy development*. *Journal of Mammalogy* 98:1265–1271.

- Letnic, M., C.R. Dickman, M.K. Tischler, B. Tamayo y C.L. Beh. 2015. *The responses of mammals to La Niña (El Niño Southern Oscillation)-associated rainfall, predation, and wildfire in central Australia*. Journal of Mammalogy 96(1): 1-13.
- McCusker, S., L.A. Shipley, T.N. Tollefson, M. Griffin y E.A. Koutsos. 2011. *Effects of starch and fibre in pelleted diets on nutritional status of mule deer (Odocoileus hemionus) fawns*. Journal of Animal Physiology and Animal Nutrition 95:489-498.
- McKee, C.J., K.M. Stewart, J.S. Sedinger, A.P. Busch, N.W. Darby, D.L. Hughson y V.C. Bleich. 2015. *Spatial distributions and resource selection by mule deer in an arid environment: responses to provision of water*. Journal of Arid Environments 122:76-84.
- Mejía-Salazar, M. F., C. L. Waldner, Y. T. Hwang y T. K. Bollinger. 2018. *Use of environmental sites by mule deer: a proxy for relative risk of chronic wasting disease exposure and transmission*. Ecosphere 9(1): e02055.
- Monteith, K.L., V.C. Bleich, T.R. Stephenson, B.M. Pierce, M.M. Conner, J.G. Kie y R.T. Bowyer. 2014. *Life-history characteristics of mule deer: Effects of nutrition in a variable environment*. Wildlife Monographs 186: 1-62.
- Newman, B.A. y G.J. D'Angelo. 2024. *A review of Cervidae visual ecology*. Animals 14(3): 420.
- Ndachena, N., M.E.M. Toorians, M.J. Farrell, D. Govender y T.J.D. Davies. 2025. *Effect of drought on wildlife activity at artificial water holes*. Biological Conservation 310:111370.
- Olivas-Sánchez, M.P., C. Vital-García, J.P. Flores-Márquez, M. Quiñones-Martínez y F. Vlemente-Sánchez. 2015. *Cambios estacionales en la dieta del venado bura (Odocoileus hemionus Crooki) en matorral desértico chihuahuense*. Agro Productividad 8(6): 59-64.
- Olivas-Sánchez, M.P., C. Vital-García, J.P. Flores-Marquez, A.D.L. Mora-Covarrubias y F. Clemente-Sánchez. 2018. *Mule deer forage availability and quality at the Chihuahuan Desert rangelands, Mexico after a severe 3-year drought*. Cogent Biology 4:1536315.
- Parker, K.L., P.S. Barboza y M.P. Gillingham. 2009. *Nutrition integrates environmental responses of ungulates*. Functional Ecology 23: 57-69.
- Putman, R.J. y B.W. Staines. 2004. *Supplementary winter feeding of wild red deer Cervus elaphus in Europe and North America: justification, feeding practice and effectiveness*. Mammal Review 34:285-306.



- Reinking, A.K., K.T. Smith, T.W. Mong, M.J. Read y J.L. Beck. 2019. *Across scales, pronghorn select sagebrush, avoid fences, and show negative responses to anthropogenic features in winter*. Ecosphere 10: e02722.
- Rosenstock, S.S., W.B. Ballard y J.C. Devos. 1999. *Viewpoint: Benefits and impacts of wildlife water developments*. Journal of Range Management 52(4): 302-311.
- Sánchez-Rojas, G. y S. Gallina. 2000. *Mule deer (*Odocoileus hemionus*) density in a landscape element on the Chihuahua Desert, Mexico*. Journal of Arid Environments 44: 357-368.
- Sánchez-Rojas, G. y S. Gallina. 2016. *Odocoileus hemionus*. *The IUCN Red List of Threatened Species* 2016: e.T42393A22162113.
- Shields, A.V., R.T. Larsen y J.C. Whiting. 2012. *Summer watering patterns of Mule deer in the Great Basin Desert, USA: Implications of differential use by individuals and the sexes for management of water resources*. The Scientific World Journal 846218.
- Sorensen, A., F.M. van Beest y R.K. Brook. 2014. *Impacts of wildlife baiting and supplemental feeding on infectious disease transmission risk: A synthesis of knowledge*. Preventive Veterinary Medicine 113(4): 356–363.
- Timmons, G.R., D.G. Hewitt, C.A. Deyoung, T.E. Fulbright y D.A. Draeger. 2010. *Does supplemental feed increase selective foraging in a browsing ungulate?* Journal of Wildlife Management 74:995-1002.
- Webb, E.B., C. McArthur, L. Woolfenden, D.P. Higgins, M.B. Krockenberg y V.S.A. Mella. 2022. *Risk of predation and disease transmission at artificial water stations*. Wildlife Research 49:324-334.
- Weber, M. y C. Galindo-Leal. 2005. Venado bura (*Odocoileus hemionus* Rafinesque, 1817). Pp. 515-517, Ceballos, G. y G. Olivas (coords.). *Mamíferos silvestres de México*. Fondo de Cultura Económica, CONABIO. México.

Fichas curriculares de los autores

- **Uriel López Yllescas.** Estudiante de Doctorado en Producción Animal en la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. Correo electrónico: urielyllescas@outlook.com
- **Juan A. Encina Domínguez.** Investigador Nacional nivel 1. Profesor-Investigador del Departamento de Recursos Naturales Renovables de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, con especialidad en manejo de recursos naturales. Correo electrónico: jaencinad@gmail.com
- **Jorge E. Ramírez Albores.** Profesor-investigador del Departamento de Botánica de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. Las líneas de investigación e intereses académicos incluyen a la ecología de vertebrados, ecología urbana, impacto ambiental, invasiones biológicas, patrones de distribución biogeográfica y el manejo y conservación de la biodiversidad. Pertenece al Sistema Nacional de Investigadoras e Investigadores nivel 1. Correo electrónico: jorgeramirez22@hotmail.com

Cita

López-Yllescas, U., J.A. Encina-Domínguez y J.E. Ramírez-Albores. Ecología alimentaria y uso del hábitat del venado bura (*Odocoileus hemionus*) en ecosistemas áridos y semiáridos: dinámica trófica, adaptaciones, suplementación y retos para el manejo. Recursos Naturales y Sociedad, 2026. Vol. 12(1): 34-54. <https://doi.org/10.18846/renaysoc.2026.12.12.01.0003>.

Sometido: 22 de noviembre de 2025

Aceptado: 23 de abril de 2026

Editor asociado: Dr. Arturo Sánchez Paz

Editor ejecutivo: Dr. Arturo Sánchez Paz

Diseño gráfico editorial: Ing. Fca. Elizabeth Villegas Carrazco

Purslane: a mexican superfood boosted by sustainable fertilization

Verdolaga, un superalimento mexicano mejorado con fertilización inorgánica

Angelica Ancelmo-León¹, Eréndira Esmeralda Hernández-Andrade²,
César Omar Montoya-García^{3*}

Resumen

La verdolaga (*Portulaca oleracea* L.) es una planta subutilizada con gran valor nutricional que se consume en México y otras partes del mundo. Este artículo describe cómo la fertilización con nitrógeno, fósforo y potasio modifica la composición nutracéutica, mineral y el perfil metabolómico de la verdolaga. Mediante resonancia magnética nuclear, se identificaron metabolitos esenciales para la salud humana, como aminoácidos, azúcares y ácidos orgánicos; el contenido varió según la disponibilidad de nutrientes provenientes del fertilizante suministrado. Los fenoles, flavonoides y ácidos grasos saturados se incrementaron con baja fertilización; en contraste, los ácidos grasos poliinsaturados se incrementan con dosis altas de nitrógeno. La planta ajusta dinámicamente sus rutas metabólicas en respuesta a las condiciones ambientales y su etapa de desarrollo, lo que permite mejorar su calidad nutricional y contribuir a la seguridad alimentaria mediante prácticas de fertilización consciente.

Palabras clave: *quelite, metabolómica, nutracéuticos, α -linolénico, resonancia magnética nuclear.*

¹Licenciatura en Agronomía, Universidad Autónoma Metropolitana Unidad Xochimilco, Coyoacán 04960, Ciudad de México, México.

²Departamento en Edafología. Campus Montecillo. Colegio de Postgraduados. 56264. Montecillo, Estado de México.

³Programa de Horticultura y Estadística, Departamento de Agricultura y Ganadería, Universidad de Sonora, km 21, Carretera Hermosillo-Bahía Kino, Hermosillo 83000, México.

* Autor de correspondencia: cesar.montoya@unison.mx



Summary

Purslane (*Portulaca oleracea* L.) is an underutilized plant of high nutritional value consumed in Mexico and other parts of the world. This article describes how fertilization with nitrogen, phosphorus, and potassium modifies the nutraceutical, mineral composition, and metabolomic profile of purslane. Through nuclear magnetic resonance analysis, metabolites essential for human health —such as amino acids, sugars, and organic acids— were identified; their content varied according to the availability of nutrients supplied by fertilization. While phenols, flavonoids, and saturated fatty acids increased under low fertilization, polyunsaturated fatty acids rose with high nitrogen doses. The plant dynamically adjusts its metabolic pathways in response to environmental conditions and its stage of development, which makes it possible to improve its nutritional quality and contribute to food security through conscious and sustainable fertilization practices.

Keywords: *quelite, metabolomics, nutraceuticals, α -linolenic acid, nuclear magnetic resonance.*

Antecedentes

Los quelites son plantas tiernas, generalmente de recolección, se consumen hojas, tallos, inflorescencias y flores, entre los quelites que más se consumen en el centro de México están los romeritos, verdolaga, huauzontle, quelite cenizo, quintoniles y pápalo (Bye y Linares, 2000).

La verdolaga se consume en muchos otros países como Italia, Reino Unido, España, Grecia, Turquía, Irán, Malasia, Filipinas, China, Estados Unidos y Brasil (Moreau y Savage, 2009). En México es consumida en platillos típicos, acompañada con carne de puerco en salsa verde, agua fresca, atole o tamales. La producción de esta hortaliza es principalmente en la zona chinampera de la alcaldía de Xochimilco, en la Ciudad de México— lugar con gran tradición agrícola (Mera *et al.* 2010).

Un detalle poco conocido, es que esta planta es una increíble fuente de compuestos esenciales, dado que contiene una gran cantidad de aminoácidos necesarios, como arginina, prolina, tirosina y ácido gamma-aminobutírico (GABA), junto con aminoácidos no esenciales como alanina, asparagina, ácido aspártico y glutamina, en conjunto son un aporte nutricional elemental para mantener la salud y apoyar las funciones básicas del ser humano. Además, es un extraordinario proveedor de carbohidratos, polifenoles y flavonoides, los cuales tiene alta capacidad antioxidante y se encargan de proteger las células del cuerpo, por ello, son un excelente alimento funcional (Ningrum *et al.* 2025).

Ante la creciente demanda mundial por obtener alimentos más nutritivos y saludables, se vuelve relevante mejorar las prácticas agrícolas para aprovechar al máximo el valor nutricional de las plantas, como la verdolaga.

Una huella dactilar química, el uso de la metabolómica

Imagina que cada ser vivo –ya sea humano, animal, bacteria, hongo o planta– tiene su propia huella dactilar química, formada por cientos o miles de moléculas llamadas metabolitos. Estas pequeñas estructuras incluyen grasas, azúcares, aminoácidos, nucleótidos y otros compuestos esenciales; muchos de estos forman parte de los nutrientes que nos recomiendan consumir para mantenernos saludables. La ciencia que se dedica a estudiar ese conjunto de moléculas “diminutas” y a entender cómo se modifican según las condiciones en las que se desarrolla un organismo es la metabolómica. Gracias a ella, en la actualidad sabemos más sobre la salud humana y se han identificado posibles terapias para enfermedades degenerativas (Rankin *et al.* 2014).

Para explorar esa huella química y su relación con el ambiente, se utiliza una técnica llamada resonancia magnética nuclear (RMN). Aunque el nombre podría sugerir el uso de resonadores o fuentes nucleares peligrosas, en realidad funciona de forma muy distinta, pues aprovecha las propiedades magnéticas de los núcleos atómicos para determinar su composición. Para revelar los detalles de la huella dactilar química, se emplea un laboratorio donde las muestras se colocan en un potente “imán gigante” que genera un campo magnético. Bajo su influencia, los núcleos absorben ciertas frecuencias de radio y emiten, como respuesta, un “sonido” particular que se traduce en señales en un espectro con picos, donde cada uno representa un metabolito y permite conocer tanto su identidad como su concentración. Así, esta técnica detecta, identifica y cuantifica el metaboloma presente en una muestra; y, en este caso, se utilizó para identificar cómo cambió la huella química de la verdolaga con modificaciones en la fertilización.

¿Puede la fertilización mejorar el valor nutricional del cultivo?

Estudios recientes se han propuesto revelar cómo la fertilización puede influir en el contenido de compuestos bioactivos y la calidad nutricional en verdolaga, con la finalidad de obtener un alimento nutritivo y funcional.

Para esclarecer este misterio, se cultivaron verdolagas con el método tradicional de Mixquic, mediante la formación de “melgas” (Fig. 1). En el experimento se aplicaron diferentes “menús” de nutrientes, enfocados en tres elementos vitales para el crecimiento de las plantas: nitrógeno (0, 100,



200 y 300 kilogramos por hectárea), fósforo (0, 30, 60 y 90 kilogramos por hectárea) y potasio (0, 40, 80 y 120 kilogramos por hectárea). La clave fue que cada nutriente (nitrógeno, fósforo y potasio) se aplicó por separado en las cantidades indicadas anteriormente, y se acompañó de una dosis media de los otros dos nutrientes (60 kg de fósforo y 80 kg de potasio), para asegurar que la planta tuviera un desarrollo adecuado y evitar la deficiencia nutrimental. Para ello, se utilizó verdolaga nativa de Tláhuac-Mixquic.



Figura 1. Las imágenes superiores muestran la formación de melgas de manera tradicional, tal como se realiza en la zona chinampera de Mixquic. En la imagen inferior izquierda se observan las melgas cubiertas de gallinaza, utilizada para elevar la temperatura de las semillas y promover la germinación. La imagen inferior derecha muestra el cultivo en etapa de cosecha. En las imágenes centrales se aprecia la planta al momento del corte: en etapa vegetativa (izquierda) y segunda floración (derecha). Al centro se incluye una representación artística elaborada por Ancelmo-León. Fotografías por Montoya-García.

Con este ensayo de efecto de la fertilización, se observó que el nitrógeno modifica la concentración de ácidos grasos y compuestos fenólicos, pues al aumentar la dosis de este elemento, se incrementaron los ácidos grasos como el linoleico y α -linolénico, importantes por sus beneficios cardiovasculares y antiinflamatorios. Mientras que, los fenoles, flavonoides, vitamina C y actividad antioxidante aumentaron en dosis bajas de NPK y disminuyeron en dosis intermedias; estos compuestos funcionan como protectores celulares dentro de la planta, pues, se producen en mayor cantidad en condiciones de estrés por deficiencia o exceso de nutrientes esenciales (Montoya-García *et al.* 2018a).

Por otra parte, nutrimentos fundamentales para el desarrollo de las plantas, como los minerales, y esenciales en la dieta humana, como nitrógeno, fósforo, potasio, calcio, magnesio, hierro, manganeso, cobre, zinc y boro, fueron influenciados por la fertilización en el contenido de verdolaga. Se reportó que las concentraciones de potasio, calcio, hierro y zinc pueden ser estimuladas mediante fertilización específica de nitrógeno y potasio, contribuyendo a la ingesta diaria de minerales esenciales para las personas (Montoya-García *et al.* 2018b).

Gracias al uso de la metabolómica y la resonancia magnética nuclear, los investigadores identificaron diversos metabolitos –moléculas orgánicas clave para el funcionamiento de las plantas– cuya presencia y cantidad se modificaban en función al tratamiento aplicado, principalmente los nueve aminoácidos esenciales para la nutrición humana (Fig. 2). En los tratamientos con mayor fertilización nitrogenada (N100, N200, N300 y P30) se detectaron metabolitos como la citidina, ácido fumárico, fenilalanina, asparagina, leucina, ácido acético, guanosina, GABA, acetoína y arginina. En contraste, en las condiciones sin fertilización (N0, P0, y K0) predominaron la adenosina, ácido cítrico, valina, colina, tirosina, ácido fórmico, uridina, glutamina, histidina e isoleucina. De manera comparativa, se evidenció que la mayoría de los aminoácidos fueron más abundantes en el tratamiento N300. Mientras tanto, cuando las verdolagas no recibieron nitrógeno (N0), los niveles de ácidos orgánicos como el ácido cítrico y málico fueron más elevados, esto contribuye a mejorar el sabor, el contenido nutricional y prologar la vida de anaquel de la verdolaga (Montoya-García *et al.* 2025).

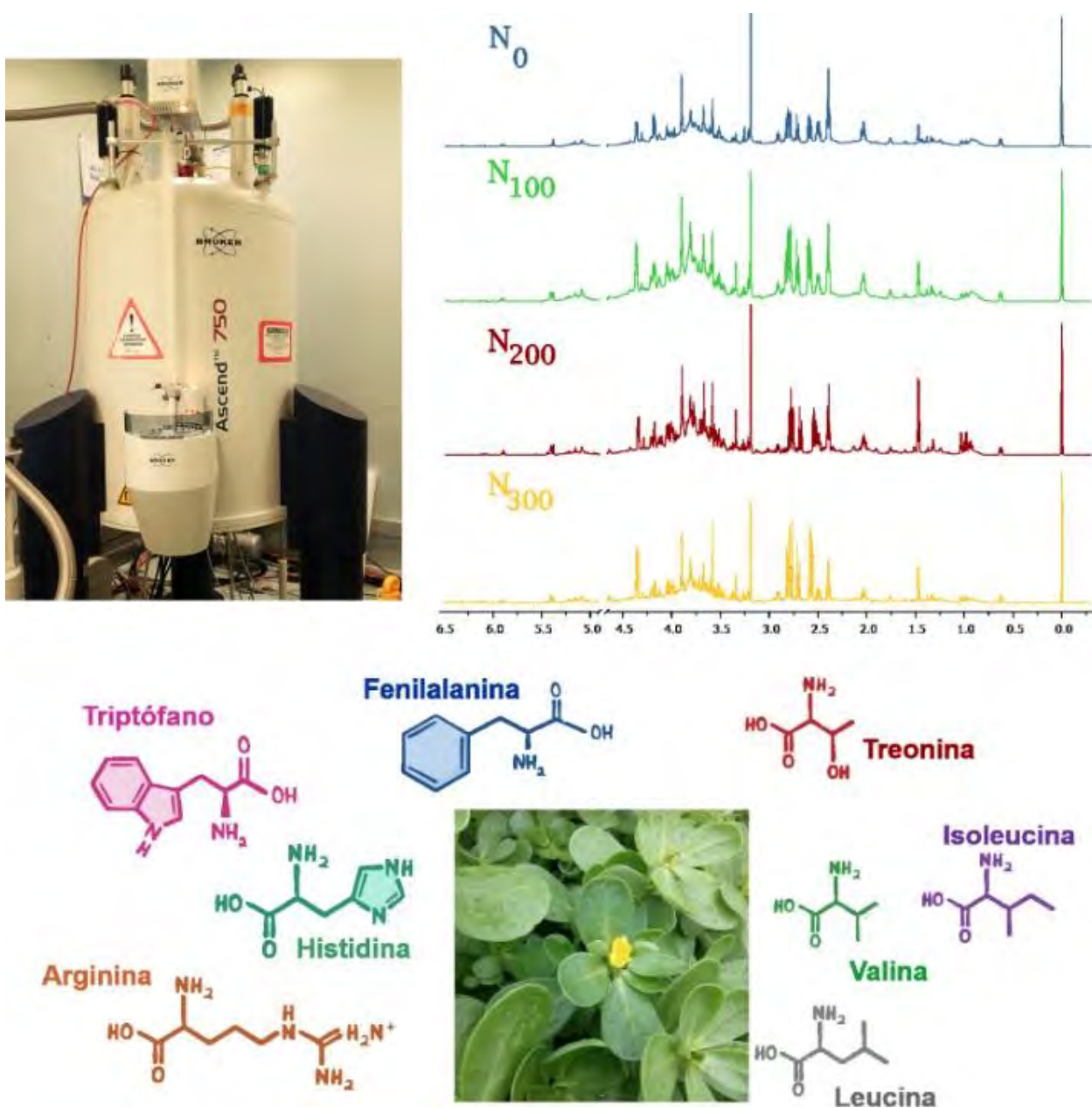


Figura 2. Se observa el “imán gigante” o mejor conocido como el equipo de resonancia magnética nuclear, utilizado para la detección de metabolitos (superior izquierda). En la imagen de la derecha se muestran las señales del espectro que representa la “huella dactilar” química de la verdolaga bajo los tratamientos de fertilización. En la parte inferior se ilustran los aminoácidos esenciales para los seres humanos que se detectaron en la verdolaga. Elaboración propia.

Estos hallazgos confirman que la fertilización nitrogenada tiene un papel decisivo en la riqueza nutricional de la verdolaga, específicamente con el incremento del contenido de aminoácidos esenciales, concentración de compuestos nutraceuticos, como fenoles, flavonoides, ácidos grasos saludables – linoleico y α -linolénico–, minerales esenciales como potasio, calcio, hierro y zinc. Reforzando así, su valor como alimento funcional con potencial para mejorar la nutrición humana y contribuir a la seguridad alimentaria de zonas rurales y urbanas.

Aliados bioactivos frente al estrés y a favor de la salud

Entre los compuestos encontrados, destacan dos aminoácidos por su importancia. El ácido gamma-aminobutírico (GABA), que llega a actuar como neurotransmisor en animales. Pero en el caso de las plantas, el GABA regula el crecimiento radicular, maduración de frutos, germinación de las semillas, respuesta al estrés y a los ataques por patógenos. Lo interesante es que los niveles más altos de GABA se reportaron en plantas tratadas con la dosis más baja de nitrógeno, situación que permite inferir que es una posible respuesta adaptativa al estrés causado por deficiencia de nutrientes.

El segundo compuesto fue la trigonelina, se podría decir que es un “multiusos” por los beneficios que brinda para la salud, entre ellos, tiene efectos hipoglucemiantes (regula los niveles de glucosa), neuroprotectores (previene el daño de nuestras neuronas), antiinvasivos (limita la extensión de células malignas), antiproliferativos (inhibe el crecimiento celular) y anticariogénicos (previene la desmineralización dental). Este metabolito, es fabricado a partir de la nicotinamida mediante un proceso enzimático; igualmente funciona como osmolito, esto favorece a la respuesta de las plantas frente al estrés biótico (como ataques de plagas y enfermedades) y abiótico (condiciones ambientales adversas). Su presencia aumentó con la aplicación alta de nitrógeno; no obstante, en los niveles moderados de fertilización permitieron mantener concentraciones idóneas de trigonelina sin necesidad de aplicar dosis excesivas.

Se identificaron moléculas excepcionales, conocidas como “nutracéuticos” por su doble acción de nutrir y proveer efectos farmacéuticos. Además, se evidenció que la fertilización influye en la concentración de minerales esenciales —como potasio, calcio, hierro y zinc— que, junto con los ácidos grasos buenos (linoleico y α -linolénico) y compuestos antioxidantes, enriquecen la calidad funcional de la verdolaga. Entre los compuestos detectados destacan fenoles, flavonoides, vitamina C y pigmentos como los carotenos y clorofila *a* y *b*, todos con capacidad antioxidante, relacionados con la prevención del envejecimiento celular, enfermedades neurodegenerativas y ciertos tipos de cáncer (Fig. 3).

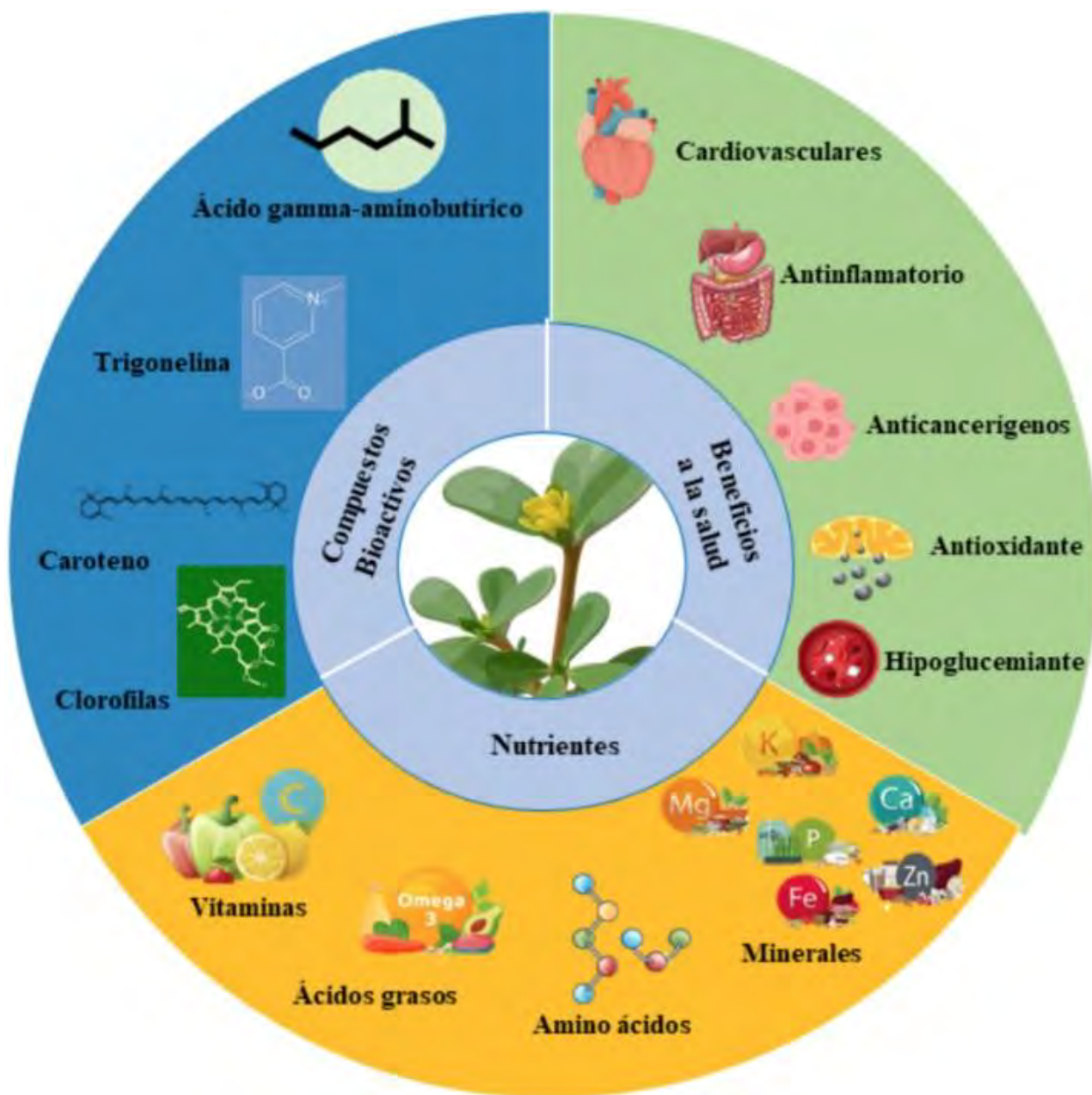


Figura 3. Principales moléculas, aportes nutrimentales y farmacéuticos de la verdolaga, y los beneficios a la salud por su consumo.

Los efectos más notorios de los compuestos nutraceuticos están relacionados con propiedades antiinflamatorias, antioxidantes, antihiper glucémicos, neuroprotectores, inmunomoduladores y antibacterianos; los beneficios son: (i) reducción de enfermedades crónico-degenerativas que incluyen cáncer, enfermedad cardíaca, diabetes, artritis y depresión; (ii) la reducción de estrés oxidativo causado por especies reactivas de oxígeno, enfermedad de Parkinson y Alzheimer; (iii) mejoramiento del sistema inmune; y (iv) reducción de enfermedades causadas por bacterias (Li et al. 2024).

Además, se reportaron ácidos grasos buenos –palmítico, esteárico, linoleico y α -linolénico– similares a los que aporta el pescado o semillas de oleaginosas, lo cual convierte a la verdolaga en una hortaliza única por el contenido de grasas buenas, que se puede promover su consumo en comunidades donde el acceso a estos alimentos es limitado o el precio es elevado. Estos compuestos actúan como indicadores funcionales que reflejan el estado nutrimental y el manejo agronómico aplicado, ofreciendo criterios valiosos para la agricultura orientada a alimentos funcionales.

Cuando se cosecha también hace la diferencia

Otro dato interesante fue que el contenido nutricional de la verdolaga tiene posibilidad de variar de acuerdo con la etapa de cosecha. Los cortes se realizaron en etapa vegetativa (21 días después de la emergencia) y segunda floración (42 días después de la emergencia), donde el tallo se bifurca. En la primera cosecha predominan los aminoácidos como la asparagina, GABA, isoleucina, fenilalanina, prolina, tirosina, valina y ácidos orgánicos, como ácido málico y ácido piroglutámico; además de vitamina c y compuestos fenólicos. Por el contrario, en la segunda cosecha se identificaron mayores niveles de carbohidratos como fructosa, galactosa, α -glucosa, β -glucosa, mioinositol, sacarosa; nucleósidos como adenosina y uridina; ácidos grasos saturados (palmítico y esteárico) polinsaturados (linoleico y α -linolénico); y compuestos antioxidantes como flavonoides, carotenos y clorofila *a* y *b*. Es como si la planta se transformara, enfocándose en la producción de azúcares y otros compuestos más complejos a medida que madura.

La práctica de cosechar la verdolaga en dos etapas fenológicas está relacionada con factores agronómicos y culturales. En algunas regiones como Mixquic, los productores recolectan la verdolaga en dos momentos clave: durante la etapa vegetativa, cuando buscan un producto más tierno, menos fibroso y de menor desarrollo; y en la etapa de floración, donde el contenido nutricional es mayor y los precios de mercado suelen ser más altos en temporadas de otoño e invierno.

Con lo obtenido en las etapas de corte de la verdolaga, se debe promover su consumo durante la floración, ya que en esta fase se halló mayor contenido de metabolitos, lo que a su vez le agrega valor comercial y nutricional al cultivo; esto representa una oportunidad para beneficiar a los productores de Mixquic y la región chinampera de la Ciudad de México. Por ende, los resultados indican que el contenido nutricional de la verdolaga es mucho más sensible al momento de la cosecha que por la fertilización aplicada.



El mito de “más fertilizante, más producción”

Es común pensar que, si se aplica más fertilizante, se obtendría una cosecha más grande y nutritiva. En el caso de la verdolaga, los resultados muestran un panorama totalmente diferente y más complejo.

En contraste con los metabolitos esenciales, encontramos que, en la primera cosecha, el contenido de nutrientes de la verdolaga mejoró notablemente, particularmente en aminoácidos y ácidos grasos saturados y poliinsaturados, cuando las plantas fueron tratadas con dosis nitrógeno, a 300, 200 y 100 kilogramos por hectárea. Pese a ello, aquí viene lo sorprendente, no se observaron diferencias notables en la cantidad de biomasa producida, lo que sugiere que la fertilización afecta más el perfil nutricional del cultivo que el rendimiento. Dicho de otro modo, la planta se vuelve más “rica” por dentro, aunque no necesariamente más “grande” por fuera. Para la segunda cosecha, la situación cambió; los tratamientos con mejor desempeño en términos de rendimiento fueron con nitrógeno 300 kg/ha, fósforo 0 kg/ha y potasio 120 kg/ha; esto indica que la elección del fertilizante, en combinación con el momento de la cosecha, puede incidir directamente en la composición nutrimental de las plantas, así como, en su crecimiento, rendimiento y calidad.

Fertilización consciente: por un suelo sano

Se debe de tener en cuenta que la aplicación desmedida de nitrógeno en los campos de cultivo trae consigo riesgos significativos como la contaminación por emisiones de gases de efecto invernadero, que contribuyen al cambio climático; la contaminación de las aguas subterráneas debido a que el exceso de fertilizante puede filtrarse en el subsuelo y esto daña las fuentes vitales de agua potable.

Por fortuna, para todo hay solución; un estudio económico reveló que una dosis óptima de 65 kg de nitrógeno por hectárea y una densidad de siembra de 2,500 plantas por m² puede generar rendimientos de hasta 130 toneladas por hectárea, con ingresos netos superiores a 100 mil pesos mexicanos (Montoya-García *et al.* 2017). Esta podría ser una estrategia eficaz y rentable para pequeños y medianos productores, ya que de esta manera habría un uso racional de los fertilizantes; esto contribuiría a promover prácticas agrícolas más sostenibles. La optimización del uso del nitrógeno no solo incrementa el rendimiento y el contenido de nutrientes de los cultivos al utilizar menos recursos, sino que también, atenúa los impactos ambientales. Las investigaciones subsiguientes deben centrarse en analizar los efectos a largo plazo de estas prácticas de fertilización

sobre la salud del suelo y la biodiversidad, con la finalidad de respaldar aún más el desarrollo de la agricultura sostenible.

¿Por qué las verdolagas producen diferentes metabolitos?

La cantidad y tipo de metabolito que una planta genera no ocurre al azar, sino que depende de varios factores que regulan el metabolismo. Uno de los más importantes es la disponibilidad de nutrientes dentro de la planta, ya que estos funcionan como señales que activan o reducen determinadas rutas metabólicas, que son como caminos bioquímicos que la planta emplea para transformar unas moléculas simples en otras más complejas, según sus necesidades en ese momento.

Por ejemplo, cuando una planta recibe más nitrógeno, activa las rutas encargadas de fabricar aminoácidos, compuestos esenciales para construir proteínas y tejidos nuevos. Por eso, se observó que las verdolagas con mayor fertilización nitrogenada produjeron más aminoácidos como arginina, leucina o fenilalanina. En cambio, cuando la planta recibe poco nitrógeno, sus rutas cambian y favorecen la producción de osmolitos, que son sustancias que le ayudan a mantener un equilibrio interno y adaptarse a la escasez de nutrientes.

Además, la etapa de cosecha influye porque las prioridades metabólicas de la planta varían a lo largo de su vida. En sus primeras semanas de desarrollo, destina más recursos para generar aminoácidos, indispensables para su crecimiento. Conforme madura y florece, activa otras rutas que aumentan la producción de azúcares y nucleótidos, compuestos necesarios para la formación de flores y semillas y almacenamiento de energía.

Este comportamiento dinámico refleja la capacidad de las plantas, y en este caso la verdolaga, para ajustar sus rutas metabólicas según el ambiente, disponibilidad de nutrientes en el suelo o interior de la planta, para garantizar así su supervivencia y desarrollo, y como consecuencia mejorar su valor nutricional.



Discusión académica

Los hallazgos de este estudio trascienden la mera descripción composicional y sitúan a la verdolaga en un contexto novedoso: el de un cultivo cuya fisiología adaptativa puede ser orientada agronómicamente para potenciar su valor como alimento funcional. La respuesta diferencial de sus rutas metabólicas –donde la deficiencia nutrimental induce la síntesis de antioxidantes (fenoles y flavonoides) y el exceso de nitrógeno promueve la producción de ácidos grasos poliinsaturados y aminoácidos esenciales– revela una plasticidad metabólica extraordinaria. Esto contradice el paradigma de agricultura lineal que equipara la fertilización con productividad, demostrando que la calidad nutricional y el rendimiento son atributos disociables que deben gestionarse de forma independiente.

La aplicación de la metabolómica fue fundamental para descifrar esta complejidad, al permitir correlacionar prácticas de manejo (dosis de NPK y época de cosecha) con la modulación de metabolitos específicos de alto valor agregado. La acumulación de GABA en estrés nitrogenado o de trigonelina en condiciones de alta fertilización no son sólo respuestas fisiológicas, son indicadores de un mecanismo de defensa que, de manera fortuita, eleva la calidad nutracéutica del alimento. Esta conexión intrínseca entre la resiliencia de la planta y su beneficio para la salud humana posiciona la verdolaga como un modelo ideal para la agricultura de precisión orientada a la nutrición.

Desde una perspectiva socioambiental, es indispensable transitar hacia un modelo de fertilización consciente. La identificación de una dosis óptima de nitrógeno (65 kg/ha) que maximiza la concentración de compuestos bioquímicos e incrementa la biomasa –y por ende, sin necesidad de aplicaciones excesivas– ofrece un protocolo viable para agricultores. Esto no sólo mitiga riesgos ecológicos como la eutrofización y emisiones de óxido nitroso, sino que agrega valor comercial al cultivo, especialmente si se cosecha en floración, beneficiando directamente a los productores de las regiones chinamperas. Así, el manejo de la verdolaga deja de ser una práctica meramente extractiva y se convierte en un ejercicio de optimización ecosistémica y nutricional.

Consideraciones finales y perspectivas

El uso de prácticas agronómicas adecuadas puede mejorar el contenido de aminoácidos y compuestos bioactivos en la verdolaga, esto la convierte en un alimento más funcional con beneficios comprobados para la salud. Al promover su consumo, llegaría a contribuir en la prevención de enfermedades cardiovasculares y metabólicas. Entonces, se deben seleccionar estrategias de fertilización apropiadas que permitan aumentar la calidad nutricional de la verdolaga y al mismo tiempo se aportarían beneficios económicos, sociales y ambientales. Dicha planta, al ser tan común y frecuentemente subestimada, posee un gran potencial como superalimento, por tal razón es necesario fortalecer su cultivo con base en evidencia científica, esto no solo impulsa a los productores locales, sino también a los consumidores que estén interesados en tener una alimentación más saludable. Incluir a la verdolaga en nuestra dieta cotidiana no solo representa un beneficio para nuestra salud, sino también un acto de apoyo a la agricultura tradicional.

Referencias

- Bye, R. y E. Linares. 2000. Los *quelites*, *plantas comestibles de México: una reflexión sobre intercambio cultural*. Biodiversitas 31 (1): 11-14
- Li, Y., L. Xiao, H. Yan, M. Wu, X. Hao y H. Liu. 2024. *Nutritional values, bioactive compounds and health benefits of purslane (Portulaca oleracea L.): a comprehensive review*. Food Science and Human Wellness 13 (5): 2480-2501.
- Mera Ovando, L.M., D. Castro Lara, R. Bye Boettler, y C. Villanueva Verduzco. 2010. *Importancia de la verdolaga en México*. El Sistema Nacional de Recursos Fitogenéticos para la Agricultura y la Alimentación (SINAREFI-SAGARPA). 1: 11
- Montoya-García, C.O., D. Hidalgo-Martínez, E. Becerra-Martínez, C.A. Reyes-López, G.A. Enciso-Maldonado y V.H. Volke-Haller. 2025. *Impact of NPK fertilization on the metabolomic profile and nutritional quality of Portulaca oleracea L. using nuclear magnetic resonance analysis*. Plant Physiology and Biochemistry 220: 109464.



- Montoya-García, C.O., V.H. Volke-Haller, A. Trinidad-Santos y C. Villanueva-Verduzco. 2018a. *Change in the contents of fatty acids and antioxidant capacity of purslane in relation to fertilization*. Scientia Horticulturae 234: 152-159.
- Montoya-García, C.O., V.H. Volke-Haller, A. Trinidad-Santos y C. Villanueva-Verduzco. 2018b. *Concentración nutrimental de la verdolaga (Portulaca oleracea L.) en respuesta a la fertilización con NPK*. Agrociencia 52 (2): 241-254.
- Montoya-García, C.O., V.H. Volke-Haller, A. Trinidad-Santos, C. Villanueva-Verduzco y J. Sánchez-Escudero. 2017. *Respuesta de la verdolaga (Portulaca oleracea L.) a la fertilización con NPK*. Revista Fitotecnia Mexicana 40 (3): 325-332.
- Moreau, A.G. y G.P. Savage. 2009. *Oxalate content of purslane leaves and the effect of combining them with yoghurt or coconut products*. 22(4): 303–306.
<https://doi.org/10.1016/j.jfca.2009.01.013>.
- Ningrum, A.G., E.E. Frety, I.D. Wittiarika, K.H. Abdul-Mumin, y R.A. Ulhaq. 2025. *Protective role of ethanol extract of purslane leaves (Portulaca oleracea L.) on serum malondialdehyde levels, follicle-stimulating hormone levels, and endometrial thickness in female rats exposed to monosodium glutamate*. Open Veterinary Journal 15(8): 3645-3654.
- Rankin, N.J., D. Preiss, P. Welsh, K.E. Burgess, S.M. Nelson, D.A. Lawlor y N. Sattar. 2014. *The emergence of proton nuclear magnetic resonance metabolomics in the cardiovascular arena as viewed from a clinical perspective*. Atherosclerosis 237 (1): 287-300.

Fichas curriculares de los autores

- **Ing. Agr. Angélica Ancelmo-León.** Licenciatura en Agronomía, Universidad Autónoma Metropolitana Unidad Xochimilco, Coyoacán 04960, Ciudad de México, México. (<https://orcid.org/0009-0005-4604-8063>). Área de trabajo e interés: agricultura sostenible y la biotecnología aplicada a cultivos. angelicaancelmo5@gmail.com
- **Dra. Eréndira Esmeralda Hernández-Andrade.** Departamento en Edafología. Campus Montecillo. Colegio de Postgraduados. 56230. Montecillo, Estado de México. (<https://orcid.org/0009-0006-9855-7983>). Ingeniera agrónoma por la UAM-Xoc, MC y Doctora en Ciencias en Edafología por el Colegio de Postgraduados con enfoque en estrés biótico y nutrición vegetal. Área de trabajo e interés: nutrición de cultivos subutilizados, sostenibilidad y etnobotánica. hernandez.erendira@gmail.com

- **Dr. César Omar Montoya-García.** Departamento de Agricultura y Ganadería, Universidad de Sonora. Carretera Bahía de Kino km 21, Hermosillo, Sonora, México. AP. 305. (<https://orcid.org/0000-0002-7176-074X>). Ingeniero agrónomo por la UAM-Xoc, MC en edafología por el Colegio de Postgraduados, Doctor en Ciencias en Horticultura por la Universidad Autónoma Chapingo con enfoque en nutrición vegetal y olericultura. Miembro del sistema nacional de investigadoras e investigadores. Área de trabajo e interés: fertilidad de suelos y nutrición vegetal para la obtención de hortalizas con moléculas bioactivas. cesar.montoya@unison.mx

Cita

Ancelmo-León, A., E.E. Hernández-Andrade, y C.O. Montoya-García. Verdolaga, un superalimento mexicano mejorado con fertilización inorgánica. Recursos Naturales y Sociedad, 2026. Vol. 12(1): 56-70. <https://doi.org/10.18846/renaysoc.2026.12.12.01.0004>.

Sometido: 15 de septiembre de 2025

Aceptado: 1 de mayo de 2026

Editor asociado: Dr. Arturo Sánchez Paz

Editor ejecutivo: Dr. Arturo Sánchez Paz

Diseño gráfico editorial: Ing. Fca. Elizabeth Villegas Carrazco

The story written in genes:
The iconic palms of North America

La historia escrita en los genes: las palmeras icónicas de América del Norte

Anastasia Klimova^{1*}, Jesús Neftalí Gutiérrez-Rivera¹, Alfredo Ortega Rubio¹

Resumen

La palmera de *Washingtonia*, conocida como palmera de abanico, es un género icónico de la flora de los oasis desérticos de la península de Baja California y es un elemento emblemático del paisaje urbano norteamericano. Dichas palmeras juegan un papel ecológico esencial en los oasis, ya que constituyen un hábitat importante para una gran cantidad de artrópodos, aves, reptiles y pequeños mamíferos. En su hábitat natural, los oasis desérticos, la palma de abanico se ha visto afectada de manera negativa por las actividades humanas y, a pesar de su importancia evolutiva, económica y cultural, poco se sabía sobre su historia demográfica, ecológica y genética. Los estudios genómicos recientes han encontrado una estructura genética compleja dentro del género, identificando cuatro grupos diferenciados. Las causas detrás de esta estructura resultaron ser una mezcla entre fuerzas evolutivas neutrales (aislamiento por distancia y divergencia vicariante) y adaptativas (adaptación a la temperatura en época fría y a la precipitación en época cálida). El análisis de la vulnerabilidad genómica reveló altos niveles de vulnerabilidad en las poblaciones del sur y centro de la península. En consecuencia, el modelado de la distribución de especies reveló que el rango de distribución de palmas de abanico se verá afectado de manera negativa, particularmente en el sur de la península y bajo los escenarios de altas emisiones. Los métodos genómicos han permitido conocer y explicar una historia demográfica compleja de las palmeras de abanico; además, permitieron determinar que la especie requiere acciones urgentes de conservación.

PALABRAS CLAVE: Arecaceae, especies relictas, península de Baja California, oasis, polimorfismo de un solo nucleótido (SNP), vulnerabilidad genómica

¹Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste, S.C. (CIBNOR). Instituto Politécnico Nacional 195, Playa Palo Santa Rita Sur, La Paz, Baja California Sur, 23096, México.

* Autor de correspondencia: anastasia_aleksandrovna@hotmail.com

Abstract

Washingtonia palms, known as fan palms, are an iconic genus of the desert oases of the Baja California Peninsula and an emblematic element of the North American urban landscape. *Washingtonia* palms play an essential ecological role, providing important habitat for a large number of arthropods, birds, reptiles, and small mammals. In its natural habitat, desert oases, the fan palm has been negatively affected by human activities, and despite its evolutionary, economic, and cultural importance, until recently little was known about its demographic, ecological, and genetic history. Genomic studies based on SNPs (single-nucleotide polymorphisms) have revealed a complex genetic structure within the genus, identifying four distinct genetic groups. The causes behind this structure were found to be a complex combination of neutral evolutionary forces (isolation by distance and vicariant divergence) and adaptive forces (adaptation to cold-season temperature and warm-season precipitation). Genomic vulnerability analysis revealed adaptation to local thermal environments with limited adaptive potential and high levels of genetic vulnerability in populations from the southern and central parts of the peninsula. Consequently, species distribution modeling revealed that the distribution range of fan palms will be negatively affected, particularly in the southern part of the peninsula. Genomic methods have shed light on and explained the complex demographic history of fan palms; they have also determined that this species requires urgent conservation action.

KEY WORDS: Arecaceae, relict species, Baja California Peninsula, oasis, single nucleotide polymorphism (SNP), genomic vulnerability

Antecedentes

La Península de Baja California (PBC), México, es una de las penínsulas más largas y aisladas del mundo (González-Abraham *et al.*, 2010; Grismer, 2000). Su compleja geomorfología, su historia climática y su prolongado aislamiento geográfico han creado un paisaje altamente diverso con las comunidades de plantas únicas (Gentry, 1978; Riemann y Ezcurra, 2005). Aunque más del 75 % de la península es árido con la flora característica de matorral xerófilo (Riemann y Ezcurra, 2005; 2007), las sierras que se extienden a lo largo de la península forman refugios climáticos y ecológicos, como son, por ejemplo, los oasis desérticos.

Distribuidos a lo largo de la península, existen aproximadamente 80 oasis con su flora y fauna propios y únicos (Arriaga-Cabrera y Rodríguez-Estrella, 1997; Grismer y McGuire, 1993). La relevancia de los oasis desérticos en mantener las comunidades singulares de flora y fauna se ha documentado en todo el mundo (Davis *et al.*, 2017; Parker *et al.*, 2020). Así, los oasis desérticos desempeñan un papel de santuarios evolutivos y ecológicos para numerosas especies **endémicas** y especies **relictas** (Bogan *et al.*, 2014; Davis *et al.*, 2017). Además, los oasis en la península de Baja California representan **sistemas socioecológicos** activos, mantienen una gran parte de la población y del desarrollo económico de la región (De Grenade *et al.*, 2016).

En la actualidad, las actividades humanas son la principal amenaza para la biodiversidad del planeta (Díaz *et al.*, 2019). Entre ellas, el cambio climático se figura como uno de los desafíos más importantes cuyos efectos se agravarán en el futuro próximo. El cambio climático y la intensificación de las actividades socioeconómicas han exacerbado el **estrés hídrico** en las zonas áridas y, particularmente, en los oasis desérticos. Como resultado, la biodiversidad de estos ecosistemas se enfrenta a enormes retos (Imaz-Lamadrid *et al.*, 2020; Li *et al.*, 2022; Riddell *et al.*, 2021; Shepard, 1993).

Palmas del género *Washingtonia*

Un ejemplo fascinante de la flora de los oasis de la PBC son las palmeras de *Washingtonia*, conocidas como palmeras de abanico (Figura 1). Estas palmeras son un elemento emblemático de paisajes urbanos norteamericanos. En las ciudades como Los Ángeles, San Diego, La Paz y Cabo San Lucas, las palmas de abanico se encuentran en las avenidas principales, así como en muchos jardines urbanos. Además, en su hábitat natural en la Península de Baja California y el norte de California, dichas palmas son una especie dominante y característica de los oasis desérticos (Minnich *et al.*, 2011; Villanueva-Almanza *et al.*, 2018). Palmeras de *Washingtonia* juegan un papel ecológico esencial en los oasis, ya que constituyen un hábitat importante para una gran cantidad de artrópodos, aves, reptiles y pequeños mamíferos (Klimova *et al.*, 2023; Spennemann, 2020).

Además, las palmas de abanico fueron de gran importancia para las “culturas de desierto”, las poblaciones nativas de la región, Cahuilla, Pericues y Cochimies, ya que proporcionaban frutos dulces para comer, hojas para construir refugios y tallos para fabricar utensilios (Hicks, 1989; Morales Cortez, 2016).



Figura 1. Una fotografía de palmas de abanico (*Washingtonia* spp.) en su ambiente natural en el extremo norte de la península de Baja California. La foto tomada por Klimova A.

Aunque las palmas de abanico son una especie ornamental cultivada y común en paisajes urbanos, en su hábitat natural, los oasis desérticos, estas se han visto afectadas de manera negativa por las actividades humanas. En los oasis, la palma de *Washingtonia* ha sido sustituida por la palma datilera (*Phoenix dactylifera*), afectada por frecuentes incendios forestales provocados, gran cantidad de herbívoros domésticos de libre pastoreo, cambio de uso del suelo y extracción de sus hojas para la construcción de palapas (Garcillán, 2024; Klimova et al., 2023).

A pesar de la importancia económica y cultural de la palma de abanico, hasta hace poco tiempo se desconocía su historia demográfica y genética (Klimova et al., 2018). Los estudios morfológicos clásicos han sugerido la existencia de dos especies dentro de *Washingtonia*, *W. robusta* y *W. filifera* (Minnich et al., 2011). Sin embargo, los límites de distribución de estas especies y sus relaciones genéticas no han sido claros y estaban bajo discusión.

La **historia natural** de una especie afecta de manera directa su perfil genético. En este sentido, el genoma funciona como un registro histórico, permitiendo deducir el pasado evolutivo de una especie. Al analizar los patrones de diversidad y divergencia genética, se pueden identificar refugios

evolutivos, trazar las rutas de colonización, determinar mezcla entre poblaciones, endogamia y magnitud de las divergencias evolutivas (Liu *et al.*, 2018; Allendorf *et al.*, 2022).

El presente trabajo es una compilación de estudios de la genética y genómica de las palmas de *Washingtonia* realizados principalmente por los autores (Klimova *et al.*, 2017; 2018; 2023; Klimova y Landis, 2025). El propósito del trabajo es resumir sus hallazgos y responder a las siguientes preguntas: (i) ¿Cuántas especies de palma de *Washingtonia* existe en su rango de distribución natural?; (ii) ¿Cuáles han sido las fuerzas evolutivas que han moldeado la distribución y **diversidad genética** de las palmas?; (iii) ¿Cómo cambios geológicos y ecológicos han afectado la diversidad y diferenciación genética de las palmas?; (iv) Debido a su distribución discontinua y alta dependencia de agua, ¿Cómo el cambio climático actual podría afectar las poblaciones de palmas en el futuro cercano?; (v) Dar a conocer al lector la variedad de fuerzas evolutivas y procesos biogeográficos que influyen en la diversidad y **estructura genética** de las especies de plantas.

Primeros hallazgos genéticos

El primer estudio genético a nivel poblacional de las palmas de *Washingtonia* se realizó en 1986 por McClenaghan y Beauchamp (McClenaghan y Beauchamp, 1986). El trabajo de McClenaghan y Beauchamp, basado en variación **alozímica**, se enfocó en 16 poblaciones naturales de palmeras en California, sin incluir plantas de la península. Los resultados fueron inesperados, ya que se encontraron niveles muy bajos de diferenciación genética entre poblaciones, lo cual fue sorprendente debido al aislamiento geográfico de las poblaciones. Los patrones de baja diversidad y diferenciación genética encontrados parecían ser consistentes con un escenario de colonización reciente de palmeras de abanico desde algún **refugio climático** en el sur. La dispersión de semillas desde este refugio en hábitats adecuados en el desierto de Colorado resultó en poblaciones con baja variabilidad y alta similitud genética debido a su ascendencia común.

Pasaron más de 30 años y en el año 2017 se llevó a cabo un estudio genético de palmas de *Washingtonia* que incluyó palmas de toda la Península de BC y Sonora (Klimova *et al.*, 2017). En dicho trabajo se utilizaron **secuencias de cloroplasto** y nucleares, reportando bajos niveles de variación y una estructura genética relativamente fuerte (Klimova *et al.*, 2017). Se encontró que la diferenciación genética entre las poblaciones de *Washingtonia* coincide en gran medida con la información morfológica publicada previamente (Felger y Joyal, 1999; Minnich *et al.*, 2011). El límite sur de *W. filifera* es Sierra Juárez (Latitud 32 Norte) y el límite norte de *W. robusta* fue la región de Cataviña

(Latitud 30-31 Norte) (Figura 2). En general, dada la falta de **haplotipos** compartidos y la divergencia en las **frecuencias alélicas** entre *W. filifera* y *W. robusta*, los datos respaldaron la clasificación de estas dos palmeras como especies separadas. Las poblaciones de palmas de Sonora también presentaron haplotipos distintos de los peninsulares. Sin embargo, dicho estudio no incluyó las plantas de EE.UU. y se basó en muy pocos marcadores, lo cual no permitió hacer conclusiones definitivas sobre el estatus de *Washingtonia*.

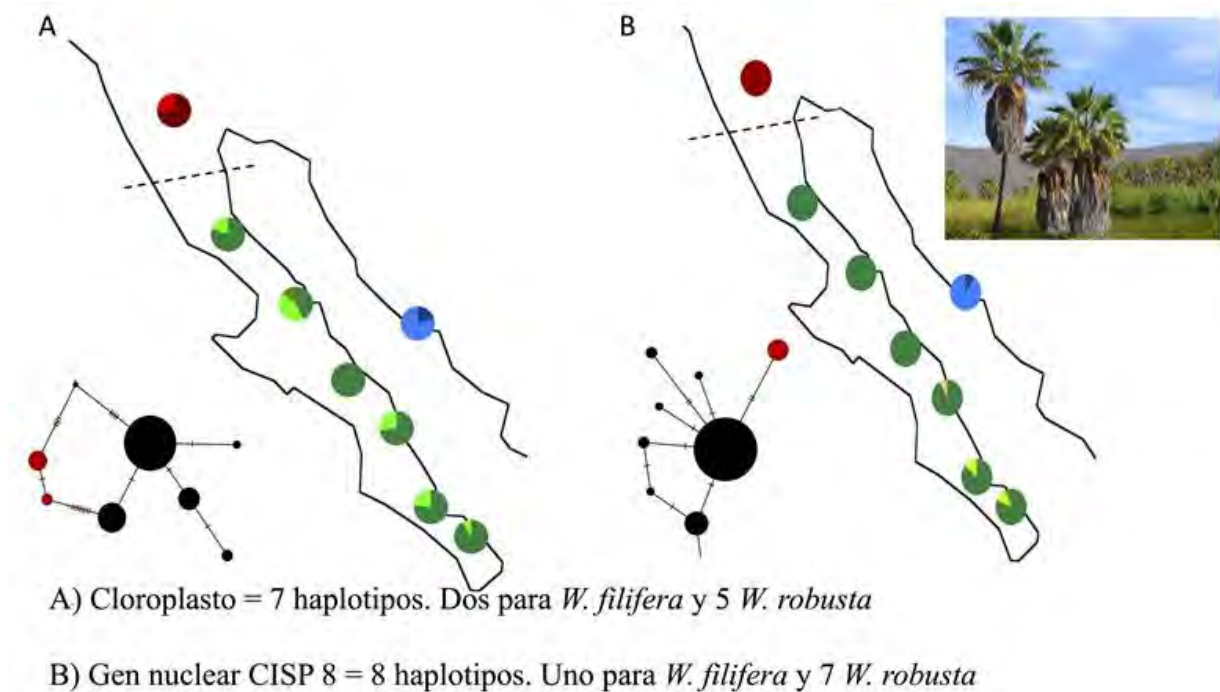


Figura 2. La estructura genética de palma de *Washingtonia* determinada usando secuencias de (A) cloroplasto y (B) una secuencia nuclear. Cada color de gráficos circulares sobre el mapa de la PBC corresponde a un haplotipo (secuencias distintas) identificado. Al lado izquierdo del mapa se encuentra una red de haplotipos para cada tipo de marcador, donde los colores corresponden a las especies morfológicas conocidas *W. robusta* en negro y *W. filifera* en rojo. El tamaño de círculo corresponde al número de individuos para cada haplotipo. Cada marca en las líneas continuas indica una mutación de ADN, entre más marcas más distintos son haplotipos. El inserto es una foto de palmeros de abanico de un oasis del sur de la península de Baja California. La fotografía tomada por Klimova A.

Estudios genómicos en palmas de abanico

La principal diferencia entre métodos genéticos y genómicos es que los primero se enfocan a un pequeño número de marcadores específicos, en otras palabras, se sabe lo que se va a obtener, por ejemplo, una secuencia de tamaño específico de ADN mitocondrial. Por otro lado, los métodos genómicos proporcionan una perspectiva más amplia de la variación genética sin requerir conocimientos previos de genes específicos. Otra diferencia entre genética y genómica es que la última permite abarcar las preguntas que son imposibles de tratar usando marcadores moleculares

convencionales (McMahon *et al.*, 2014). Por ejemplo, permite llevar a cabo estudios de asociación entre genotipos y variables climáticas y estimar la divergencia a escala fina (Nielsen *et al.*, 2020).

Aunque los primeros estudios genéticos de *Washingtonia* indicaron la presencia de dos especies, los estudios genómicos basados en **SNP (polimorfismos de nucleótido único)** han encontrado una estructura compleja dentro del género, identificando cuatro grupos genéticos (Figura 3). Uno en la costa de Sonora y tres poblaciones genéticamente distintas en la península y California: (i) el grupo sur, desde la región del Cabo hasta la parte norte de Sierra la Giganta; (ii) el grupo central; y (iii) el grupo norte, que consistía en las poblaciones en California, EE.UU. y de la Sierra Juárez en México (Klimova *et al.*, 2018; Klimova y Landis, 2025; Villanueva-Almanza *et al.*, 2021).

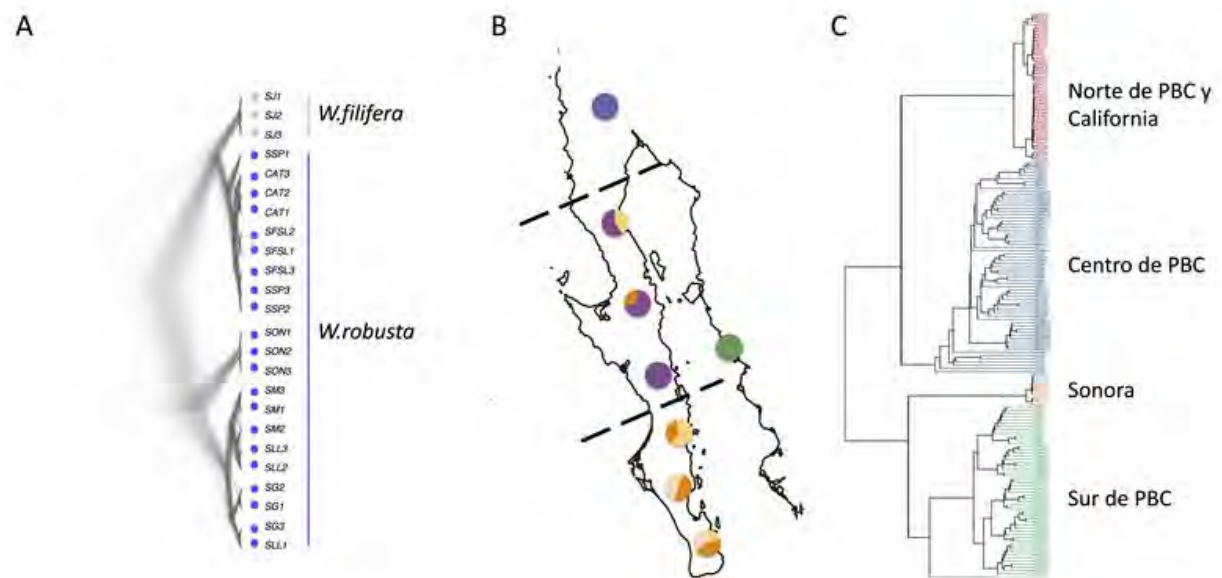


Figura 3. La estructura genómica de palmas de Washingtonia basada en SNPs: (A) un árbol filogenético de sitios de muestreo de Washingtonia. Los colores indican a las poblaciones que pertenecen a las dos especies morfológicas, *W. robusta* en azul oscuro y *W. filifera* en azul claro; (B) gráficos circulares de grupos genéticos principales identificados en la PBC, los colores corresponden al número de grupos identificados. Las líneas discontinuas corresponden a los límites geográficos que dividen los grupos genéticos principales; (C) un árbol de relaciones filogenéticas para los individuos de Washingtonia incluyendo muestras de EE.UU. Los colores corresponden a los grupos genéticos principales. Modificado de Klimova *et al.*, 2018 y Villanueva-Almanza *et al.*, 2021.

Las causas detrás de esta estructura resultaron ser una combinación compleja entre **fuerzas evolutivas neutrales** y adaptativas. Se encontraron efectos del mecanismo biogeográfico conocido como **vicarianza** (Nelson y Platnick, 1981). La vicarianza es un proceso en el cual se divide el área de distribución de una especie, aun cuando esta haya permanecido en el mismo lugar (Figura 4). Este proceso ha sido responsable del **aislamiento genético** de poblaciones de palmas en Sonora; dichas

poblaciones se quedaron aisladas con la separación de la península hace aproximadamente cinco millones de años, sin posibilidad de **flujo genético**. Durante el tiempo transcurrido, las poblaciones de palmas en ambos lados del Golfo de California han acumulado mutaciones en su genoma, las cuales las hicieron genéticamente distintas.

Otro de los procesos neutrales involucrados en la diferenciación genómica de las palmas en la península ha sido el **aislamiento por distancia** (Wright, 1943). El aislamiento por distancia es la acumulación de variación genética local bajo una dispersión geográficamente limitada y resulta en un patrón donde la similitud genética entre individuos disminuye a la medida que aumenta la distancia geográfica entre ellos (Figura 5A). Así, la diferenciación genómica entre palmas de la península se ajustó perfectamente a un patrón de aislamiento por distancia (Klimova et al., 2018; Klimova y Landis, 2025). En otras palabras, las palmas de las localidades geográficamente más lejanas son genéticamente distintas. Mientras que las palmas de localidades cercanas geográficamente son genéticamente similares.

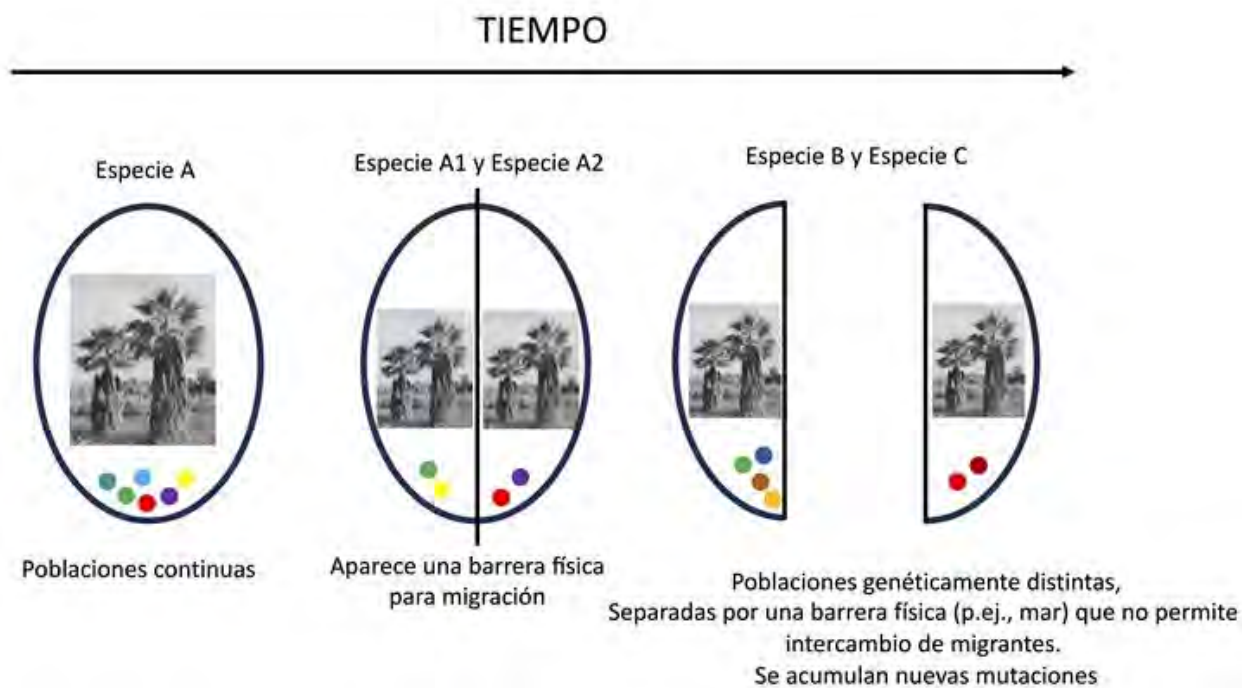


Figura 4. Un esquema de divergencia vicariante. En la vicarianza, la población ancestral (Espece A) se divide pasivamente por una barrera geográfica. Las especies incipientes (Espece A1 y A2) se forman durante el aislamiento geográfico y posteriormente divergen para convertirse en nuevas especies (Espece B y C). Los colores corresponden a los alelos que con el paso de tiempo se cambian debido a los procesos neutrales y adaptativos.

Sin embargo, no todo fue posible de explicar con eventos neutrales, también detectamos la **adaptación local**, el proceso evolutivo mediante el cual las poblaciones evolucionan para estar mejor adaptadas a su entorno local en comparación con otras poblaciones de la misma especie. Se encontró una asociación entre genotipos y algunas variables ecológicas, sugiriendo una divergencia adaptativa entre poblaciones de palmas (Figura 5B). Entre las variables ecológicas, la temperatura en la temporada fría y la precipitación en la temporada cálida fueron las variables con mayor efecto. Así mismo, se detectaron 395 marcadores de SNPs asociados con dichas variables ecológicas (Klimova *et al.*, 2018; Klimova y Landis, 2025). La contribución de los SNPs asociados con variables ecológicas fue particularmente notoria en la construcción de árboles filogenéticos usando marcadores neutrales y adaptativos (Figura 6). Los marcadores neutrales indicaron la presencia de cuatro grupos genéticos, mientras que los **loci** adaptativos solo dos grupos. Este hallazgo podría considerarse como una prueba de la actuación de la **selección natural**, ya que las poblaciones del norte y centro han divergido en el fondo genómico neutral, mientras que la **selección estabilizadora** parece haber resultado en genotipos muy similares en los marcadores implicados en la adaptación. Lo más interesante es que, una vez que las secuencias que contenían marcadores adaptativos fueron comparadas con las bases de datos de proteínas con funciones conocidas, se detectó que varias de ellas estaban involucradas en la respuesta al estrés biótico y abiótico y en la defensa de las plantas. En otras palabras, la diferenciación entre las poblaciones de palma de abanico está regida por fuerzas evolutivas neutrales y adaptativas, las cuales, al actuar al mismo tiempo, han creado una estructura genómica compleja.

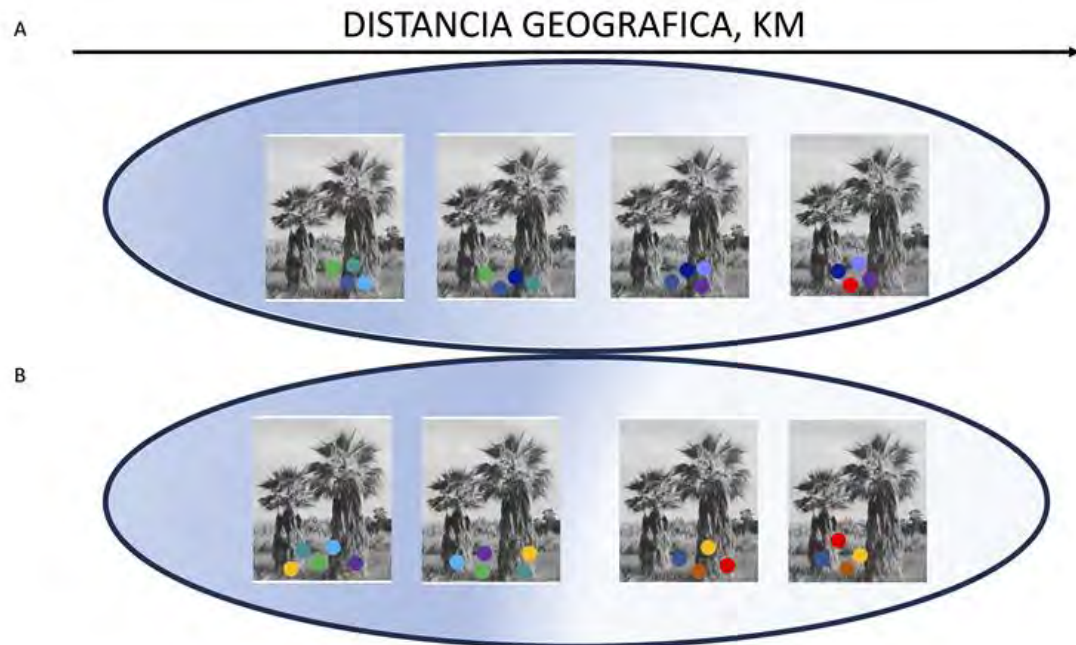


Figura 5. Dos procesos que explican la estructura genética en *Washingtonia*: (A) aislamiento por distancia, un patrón de diferenciación poblacional en el que las diferencias genéticas entre poblaciones aumentan con la escala geográfica; (B) aislamiento por ambiente, un patrón donde las distancias genéticas y ambientales están correlacionadas positivamente, independientemente de la distancia geográfica. Los colores corresponden a los loci que en (A) se cambian con el incremento de distancia geográfica y en (B) se cambian una vez que las poblaciones ocupan ambientes distintos.

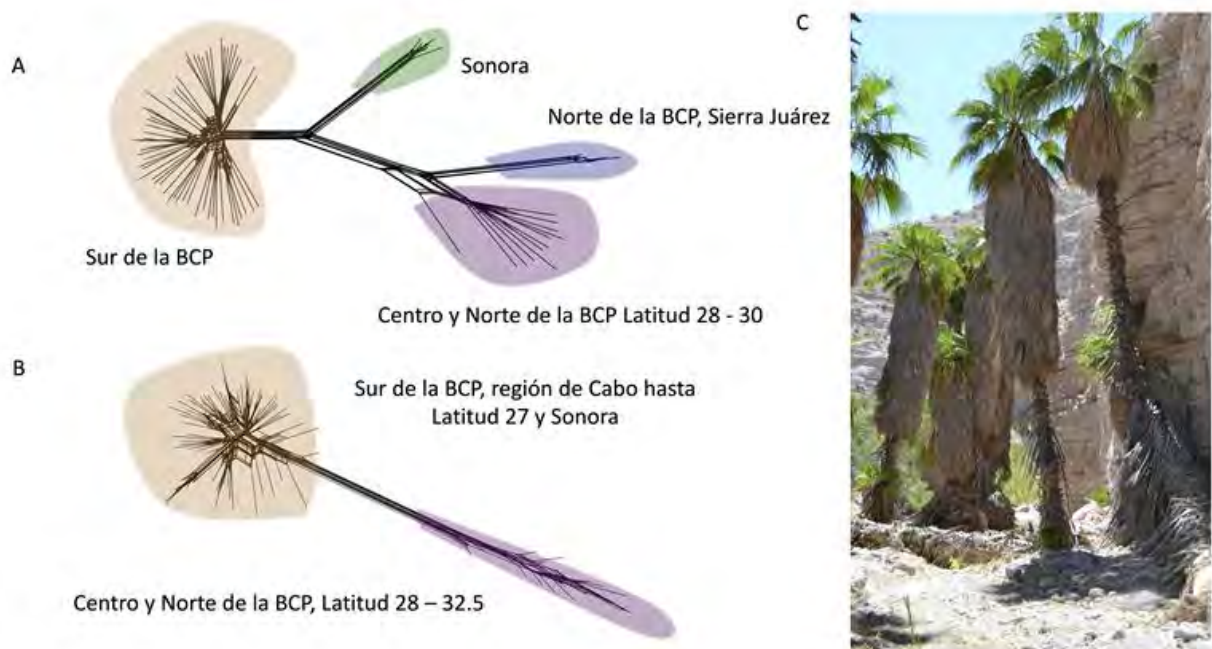


Figura 6. Los árboles filogenéticos de los individuos de palma de abanico basados en (A) marcadores neutrales, los que no tenían relación con variables ecológicas; (B) marcadores adaptativos, los que presentaron una relación con variables ecológicas; (C) una fotografía de palmas de *Washingtonia* en su hábitat natural en el sur de la PBC. Modificado de Klimova et al. 2018. La fotografía tomada por Klimova A.

La diversidad genómica y demografía histórica

La diversidad genómica de una especie, así como sus cambios a través del tiempo, pueden ayudar a entender las fuerzas que han moldeado la estructura genética actual (López-Delgado y Meirmans, 2021). La diversidad genómica de las palmas en la península no está distribuida de manera homogénea (Figura 7A), sino que, yendo desde el sur al norte, existe un patrón interesante de incremento de la diversidad seguido por una reducción, luego otro incremento seguido por una disminución en la diversidad. Además, existe una clara asociación entre diversidad y latitud. Dicho patrón de cambio de la diversidad a lo largo de la península no es único ni inusual; muchas especies de flora y fauna de la península presentan cambios en la diversidad relacionados con la latitud (Garrick *et al.*, 2009; Klimova *et al.*, 2024). Esas fluctuaciones en la diversidad generalmente se explican con la presencia de los refugios durante el **Último Máximo Glacial** y posterior recolonización de hábitat (Dolby *et al.*, 2015). Durante el Último Máximo Glacial, aproximadamente 20-25 mil años atrás, el clima en la península fue distinto y menos favorable que en el presente para las palmas de abanico, las cuales, al parecer, fueron restringidas a los refugios climáticos. Una vez que las condiciones ambientales mejoraron, las palmas se dispersaron desde los refugios, dejando un patrón de distribución genética típico: con la diversidad genómica relativamente alta dentro de los refugios y una diversidad reducida hacia las áreas de re-colonización (Pellissier *et al.*, 2015; Roberts y Hamann, 2015). Los análisis de la **demografía histórica** confirmaron los resultados de la distribución de la diversidad, ya que indicaron que las palmas de abanico sufrieron una reducción en los números poblacionales y posteriormente las poblaciones se recuperaron (Figura 7B).

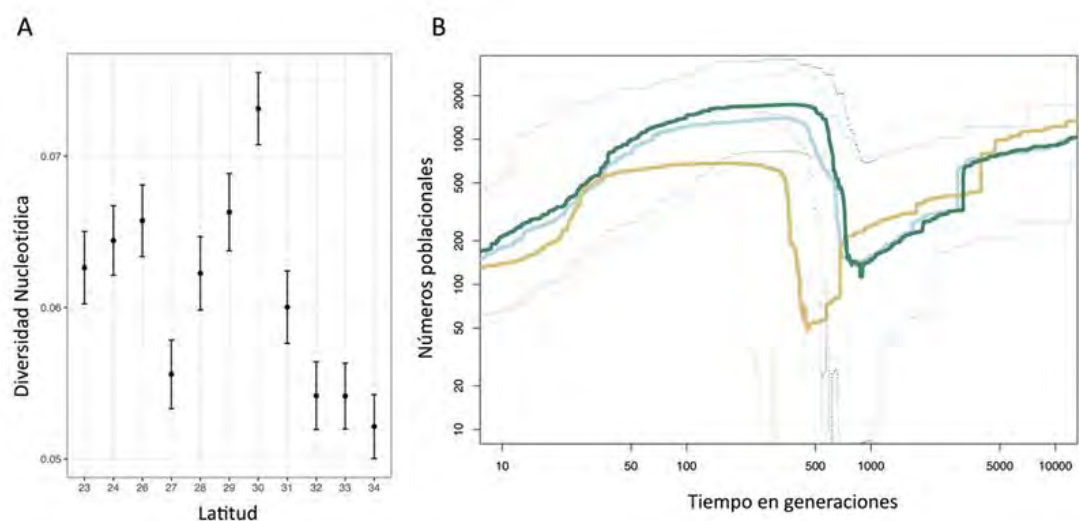


Figura 7. (A) La diversidad de nucleótidos en las palmeras *Washingtonia* que se estimó con relación a la latitud. (B) Los cambios en el tamaño efectivo poblacional en las palmeras en el tiempo. Las líneas continuas muestran los valores medianos y las líneas punteadas, los valores de variación de promedio para cada grupo genético: cian oscuro: población central, azul claro: población del sur y marrón claro: población del norte. El tamaño se presenta en miles de individuos. Modificado de Klimova y Landis, 2025.

Sorprendentemente, los resultados de la reconstrucción de la demografía histórica y de la distribución geográfica de la diversidad genómica permitieron corroborar la hipótesis propuesta en 1986 por McClenaghan y Beauchamp. Así, la distribución actual de las palmeras de abanico es consistente con un escenario de re-colonización desde los refugios glaciares y al parecer había al menos tres de estos refugios.

Vulnerabilidad genómica

El cambio climático provocado por el hombre no solo es más rápido que las fluctuaciones climáticas históricas, sino que también conlleva otras amenazas, como la degradación del hábitat e incremento en la invasión de especies exóticas, que obligan a las especies nativas a modificar su distribución o provocan una disminución en su abundancia y la extinción local (Exposito-Alonso, 2023; Parmesan, 2006; Román-Palacios y Wiens, 2020). Por lo tanto, es de suma importancia predecir cómo las poblaciones naturales de palmas de abanico responderán al cambio climático actual.

Se ha desarrollado un conjunto de métodos conocidos como "compensaciones genómicas" (Genomic offset, GO) para realizar las predicciones de la vulnerabilidad de las especies al cambio climático. Un GO se define como el grado de mala adaptación de un genoma al trasladarse del entorno climático al que está adaptado a un entorno nuevo (Fitzpatrick y Keller, 2014; Láruson *et al.*, 2022; Rellstab *et al.*, 2021). El cálculo de GO se basa en la combinación de datos genéticos y datos ambientales presentes y futuras (Fitzpatrick y Keller, 2014; Gain *et al.*, 2023).

Algunas especies, como son las palmas de *Washingtonia*, son especialmente susceptibles al cambio climático, ya que su hábitat adecuado es pequeño y restringido, sus números poblacionales son relativamente bajos y las poblaciones están poco conectadas (Hampe y Jump, 2011; Klimova *et al.*, 2022; Love *et al.*, 2023). Además, las poblaciones de palmas de abanico residen en los márgenes de su rango de distribución histórico, y su singularidad las hace importantes para la conservación (Hampe y Petit, 2005; Hampe y Jump, 2011).

En el caso de palmas de *Washingtonia*, una vez encontrada la asociación genotipo-ambiente, se hizo la proyección para ambientes futuros y se identificaron regiones geográficas donde la selección será más intensa (Figura 8). La compensación genética en las palmas mostró que la región del Cabo y de la Península central se verán más afectadas que otras (Klimova y Landis, 2025). Dichas poblaciones

requieren de medidas de conservación urgentes, dado que muchas de ellas se encuentran en oasis poblados, lo que las hace más vulnerables. También hubo áreas donde la compensación genética proyectada sería mínima, como el norte de la península y el sur de EE. UU. (Figura 8).

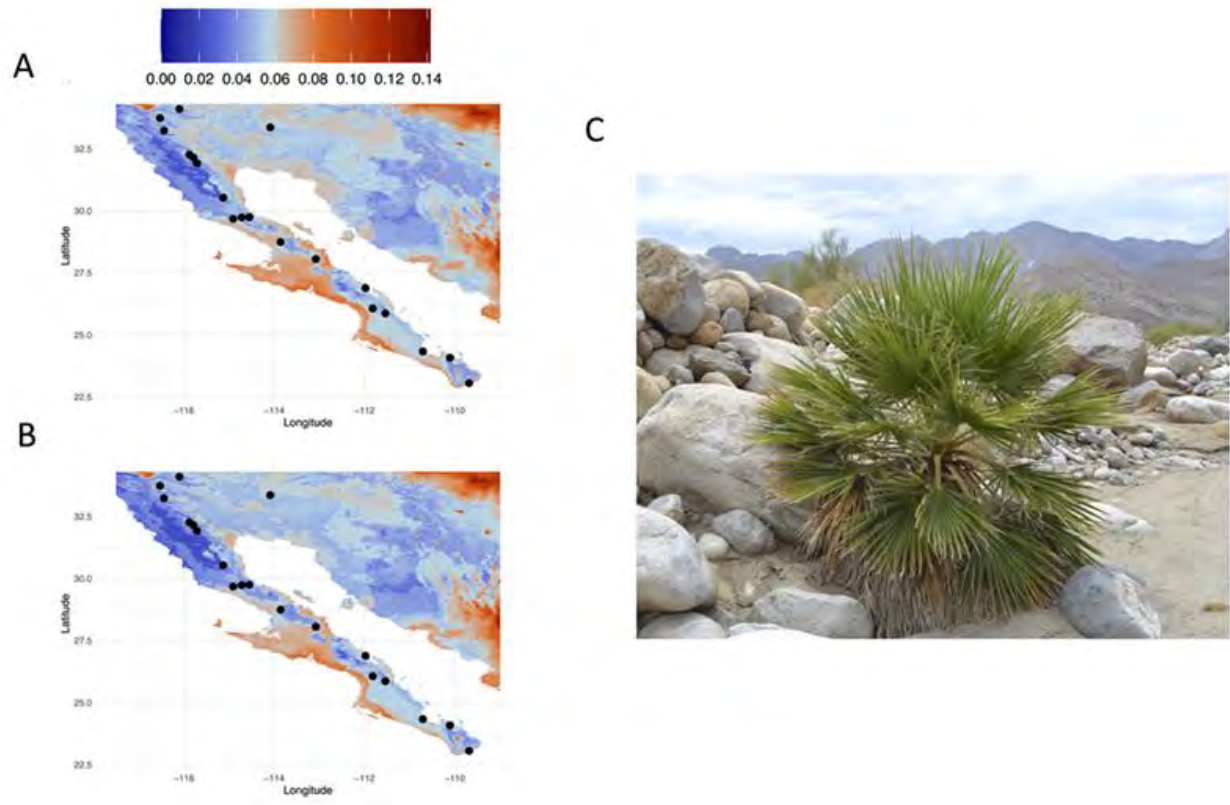


Figura 8. Predicciones de la vulnerabilidad genómica ante el cambio climático futuro en palmeras *Washingtonia*: (A) y (B) reflejan los escenarios para los dos modelos de predicción de cambio de clima hacia el futuro entre los años 2060-2080. Los colores rojo y azul indican una vulnerabilidad genómica alta y baja, respectivamente. (C) Una palma de abanico en un arroyo en el norte de la PBC. Foto tomada por Klimova A. Modificado de Klimova y Landis, 2025.

Conclusiones

Hasta hace poco, la historia natural de las palmas de abanico, una especie emblemática de los oasis desérticos de Baja California fue un misterio sin resolver. Se desconocía cuántas especies dentro del género existen, cómo fue posible la diferenciación en su área de distribución, qué fuerzas evolutivas y factores bióticos y abióticos han contribuido a su diferenciación. Sin embargo, la utilización de métodos genéticos y genómicos hizo posible no solo responder a estas preguntas, sino también proponer las medidas de conservación y entender cómo el cambio climático actual afectará a las palmas de *Washingtonia*.



Las palmas de abanico son un ejemplo muy interesante desde el punto de vista evolutivo porque residen en los límites distribucionales norte de la familia Arecaceae, una familia mayoritariamente tropical y, por lo tanto, están sujetas a condiciones inusualmente secas, y frías. Bajo tales condiciones, la adaptación local puede ser una fuerza importante en la configuración de patrones de divergencia, así los resultados de estudios genómicos recientes confirman y expanden esa noción. La distribución de las palmas de abanico está gobernada por una compleja mezcla de las fuerzas evolutivas neutrales y adaptativas, la distancia geográfica y el aislamiento que promueven la diferenciación. La adaptación al diferencial térmico incrementa aún más las diferencias genéticas. Finalmente, el cambio climático actual afectará de manera negativa algunas de las poblaciones de palmas de abanico, particularmente los oasis del sur de la península.

Literatura citada

- Allendorf, F.W., W.C. Funk, S.N. Aitken, M. Byrne, G. Luikart y A. Antunes. 2022. *Conservation and the Genomics of Populations*. Oxford University Press. Oxford. United Kingdom. 762 pp. <https://doi.org/10.1093/oso/9780198856566.001.0001>
- Arriaga-Cabrera, L. y R. Rodríguez-Estrella. 1997. *Los oasis de la península de Baja California*. Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste, S. C. Publicación No. 13. La Paz, B.C.S., México. 292 pp.
- Bogan, M.T., N. Noriega-Felix, S.L. Vidal-Aguilar, L.T. Findley, D.A. Lytle, O.G. Gutiérrez-Ruacho, J.A. Alvarado-Castro y A. Varela-Romero. 2014. *Biogeography and conservation of aquatic fauna in spring-fed tropical canyons of the southern Sonoran Desert, Mexico*. *Biodiversity and Conservation* 23 (11): 2705-2748. <https://doi.org/10.1007/s10531-014-0745-z>
- Davis, J.A., A. Kerezsy y S. Nicol. 2017. *Springs: Conserving perennial water is critical in arid landscapes*. *Biological Conservation* 211: 30-35. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2016.12.036>
- De Grenade, R., G.P. Nabhan y M.C. Olvera. 2016. *Oases of the Baja California peninsula as sacred spaces of agrobiodiversity persistence*. *Agriculture and Human Values* 33(2): 455-474. <https://doi.org/10.1007/s10460-015-9621-z>

- Díaz, S., J. Settele, E.S. Brondízio, H.T. Ngo, J. Agard, A. Arneeth, P. Balvanera, K.A. Brauman, S.H.M. Butchart, K.M.A. Chan, L.A. Garibaldi, K. Ichii, J. Liu, S.M. Subramanian, G.F. Midgley, P. Miloslavich, Z. Molnár, D. Obura, A. Pfaff, S. Polasky, A. Purvis, J. Razzaque, B. Reyers, R.R. Chowdhury, Y.J. Shin, I. Visseren-Hamakers, K.J. Willis y C.N. Zayas. 2019. *Pervasive human-driven decline of life on Earth points to the need for transformative change*. Science 366(6471). <https://doi.org/10.1126/science.aax3100>
- Dolby, G.A., S.E.K. Bennett, A. Lira-Noriega, B.T. Wilder y A. Munguía-Vega. 2015. *Assessing the Geological and Climatic Forcing of Biodiversity and Evolution Surrounding the Gulf of California*. Journal of the Southwest 57(2-3): 391-455. <https://doi.org/10.1353/jsw.2015.0005>
- Exposito-Alonso, M. 2023. *Understanding local plant extinctions before it is too late: bridging evolutionary genomics with global ecology*. New Phytologist 237(6): 2005-2011. <https://doi.org/10.1111/nph.18718>
- Felger, R.S., y E. Joyal. 1999. *The palms (Arecaceae) of Sonora, Mexico*. Aliso: A Journal of Systematic and Floristic Botany 18(1): 1-18. <https://doi.org/10.5642/aliso.19991801.11>
- Fitzpatrick, M.C., y S.R. Keller. 2014. *Ecological genomics meets community-level modelling of biodiversity: mapping the genomic landscape of current and future environmental adaptation*. Ecology Letters 18 (1): 1-16. <https://doi.org/10.1111/ele.12376>
- Gain, C., B. Rhoné, P. Cubry, I. Salazar, F. Forbes, Y. Vigouroux, F. Jay y O. François. 2023. *A Quantitative Theory for Genomic Offset Statistics*. Molecular Biology and Evolution 40 (6): msad140. <https://doi.org/10.1093/molbev/msad140>
- Garcillán, P.P. 2024. *La agricultura fundacional (1697-1774) de los oasis de la península de Baja California, México*. Sociedad y Ambiente 27: 1-25. <https://doi.org/10.31840/sya.v2024i27.2933>
- Garg, S. 2021. *Computational methods for chromosome-scale haplotype reconstruction*. Genome Biology 22(1). <https://doi.org/10.1186/s13059-021-02328-9>
- Garrick, R.C., J.D. Nason, C.A. Meadows y R.J. Dyer. 2009. *Not just vicariance: phylogeography of a Sonoran Desert euphorb indicates a major role of range expansion along the Baja peninsula*. Molecular Ecology 18(9): 1916-1931. <https://doi.org/10.1111/j.1365-294x.2009.04148.x>
- Gentry, H.S. 1978. *The Agaves of Baja California*. Occasional Papers of the California Academy of Sciences, 130, San Francisco. United States of America.
- González-Abraham, C.E., P.P. Garcillán y E. Ezcurra. 2010. *Ecoregions of Baja California peninsula: A synthesis*. Boletín de la Sociedad Botánica de México 87: 69-82. <https://doi.org/10.17129/botsoci.305>

- Grismer, L.L., y J.A. McGuire. 1993. *The oases of central Baja California, Mexico. Part I. A preliminary account of the relict mesophilic herpetofauna and the status of the oases*. Bulletin of the Southern California Academy of Sciences 92: 2–24.
- Grismer, L.L. 2000. *Evolutionary biogeography on Mexico's Baja California peninsula: A synthesis of molecules and historical geology*. Proceedings of the National Academy of Sciences 97 (26): 14017-14018. <https://doi.org/10.1073/pnas.260509697>
- Hampe, A., y A.S. Jump. 2011. *Climate relicts: past, present, future*. Annual Review of Ecology Evolution and Systematics 42 (1): 313-333. <https://doi.org/10.1146/annurev-ecolsys-102710-145015>
- Hampe, A., y R.J. Petit. 2005. *Conserving biodiversity under climate change: the rear edge matters*. Ecology Letters 8 (5): 461-467. <https://doi.org/10.1111/j.1461-0248.2005.00739.x>
- Hicks, B. F. 1989. *Prehistoric Development and Dispersal of the Desert Fan Palm*. Principes 33 (1): 33-39. <https://www.cabdirect.org/abstracts/19920663603.html>
- Holsinger, K.E., y B.S. Weir. 2009. *Genetics in geographically structured populations: defining, estimating and interpreting F_{ST}* . Nature Reviews Genetics 10 (9): 639-650. <https://doi.org/10.1038/nrg2611>
- Imaz-Lamadrid, M.A., J. Wurl, O. Arizpe-Covarrubias y E. Romero-Vadillo. 2020. *Deterioration of oases subject to climate change and coastal development: The case of Todos Santos Oasis, Baja California Sur, Mexico*. Groundwater for Sustainable Development 11: 100401. <https://doi.org/10.1016/j.gsd.2020.100401>
- Klimova, A., J.N. Gutiérrez-Rivera, A. Ortega-Rubio y L.E. Eguiarte Fruns. 2024. *Population genomics and distribution modeling revealed the history and suggested a possible future of the endemic *Agave aurea* (Asparagaceae) complex in the Baja California Peninsula*. Ecology and Evolution 14 (7): e70027 <https://doi.org/10.1002/ece3.70027>
- Klimova, A., J.I. Hoffman, J.N. Gutierrez-Rivera, J.L. De la Luz y A. Ortega-Rubio. 2017. *Molecular genetic analysis of two native desert palm genera, *Washingtonia* and *Brahea*, from the Baja California Peninsula and Guadalupe Island*. Ecology and Evolution 7(13): 4919-4935. <https://doi.org/10.1002/ece3.3036>
- Klimova, A. y J. Landis. 2025. *Everchanging range: How the changing environment has influenced the genetic diversity and differentiation of an iconic North American palm species*. Annals of Botany 135 (6): 1107-1124. <https://doi.org/10.1093/aob/mcaf022>

- Klimova, A., A. Ortega-Rubio, D.L.J. Vendrami y J.I. Hoffman. 2018. *Genotyping by sequencing reveals contrasting patterns of population structure, ecologically mediated divergence, and long-distance dispersal in North American palms*. *Ecology and Evolution* 8 (11): 5873-5890. <https://doi.org/10.1002/ece3.4125>
- Klimova, A., R. Rodríguez-Estrella, G. Meng, J.N. Gutiérrez-Rivera, M. Jimenez-Jimenez y S. Liu. 2023. *Metabarcoding reveals seasonal and spatial patterns of arthropod community assemblages in two contrasting habitats: Desert and oasis of the Baja California Peninsula, Mexico*. *Diversity and Distributions* 29 (3): 438-461. <https://doi.org/10.1111/ddi.13672>
- Láruson, A.J., M.C. Fitzpatrick, S.R. Keller, B.C. Haller y K.E. Lotterhos. 2022. *Seeing the forest for the trees: Assessing genetic offset predictions from gradient forest*. *Evolutionary Applications* 15 (3): 403-416. <https://doi.org/10.1111/eva.13354>
- Li, Q., Y. Liu, D.M. Meko, T. Nakatsuka, Y. Pan, H. Song, R. Liu, C. Sun y C. Fang. 2022. *Water Resource Management Implications for a Desert Oasis from Tree-Ring $\delta^{18}O$ Variations in Populus Euphratica in Northwest China*. *Water Resources Research* 58 (4): e2022WR031953. <https://doi.org/10.1029/2022wr031953>
- Liu, Y. C., X. Sun, C. Driscoll, D.G. Miquelle, X. Xu, P. Martelli, O. Uphyrkina, J.L.D. Smith, S.J. O'Brien y S.J. Luo. 2018. *Genome-Wide Evolutionary Analysis of Natural History and Adaptation in the World's Tigers*. *Current Biology* 28: 3840-3849.e6. <https://doi.org/10.1016/j.cub.2018.09.019>
- López-Delgado, J., y P.G. Meirmans. 2021. *History or demography? Determining the drivers of genetic variation in North American plants*. *Molecular Ecology* 31 (7): 1951-1962. <https://doi.org/10.1111/mec.16230>
- Love, S.J., J.A. Schweitzer, S.A. Woolbright y J.K. Bailey. 2023. *Sky Islands are a Global Tool for Predicting the Ecological and Evolutionary Consequences of Climate Change*. *Annual Review of Ecology Evolution and Systematics* 54 (1): 219-236. <https://doi.org/10.1146/annurev-ecolsys-102221-050029>
- McClenaghan, L.R., y A.C. Beauchamp. 1986. *Low genic differentiation among isolated populations of the california fan palm (Washingtonia filifera)*. *Evolution* 40(2): 315-322. <https://doi.org/10.1111/j.1558-5646.1986.tb00473.x>
- McMahon, B.J., E.C. Teeling y J. Höglund. 2014. *How and why should we implement genomics into conservation?* *Evolutionary Applications* 7 (9): 999-1007. <https://doi.org/10.1111/eva.12193>
- Minnich, R., E. Franco-Vizcaíno y M. Salazar-Ceseña. 2011. *Distribution and Regional Ecology of Californian Palm Oases Interpreted from Google Earth Images*. *Aliso: A Journal of Systematic and Floristic Botany* 29 (1): 1-12. <https://doi.org/10.5642/aliso.20112901.02>

- Morales Cortez A.P. 2016. *Cochimíes, indios del norte. Etnohistoria y Patrimonio cultural del desierto central de baja california. Siglo XVIII al presente*. Tesis de Maestría, Colegio de la Frontera Norte. México. 220 pp.
- Nelson, G.J., y N.I. Platnick. 1981. *Systematics and Biogeography: Cladistics and Vicariance*. Columbia University Press. New York. United States of America. 567 pp.
- Nielsen, E.S., M. Beger, R. Henriques y S. Von Der Heyden. 2020. *A comparison of genetic and genomic approaches to represent evolutionary potential in conservation planning*. Biological Conservation 251: 108770. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2020.108770>
- Parker, S.S., A. Zdon, W.T. Christian, B.S. Cohen, M.P. Mejia, N.S. Fraga, E.E. Curd, K. Edalati y M.A. Renshaw. 2020. *Conservation of Mojave Desert springs and associated biota: status, threats, and policy opportunities*. Biodiversity and Conservation 30 (2): 311-327. <https://doi.org/10.1007/s10531-020-02090-7>
- Parmesan, C. 2006. *Ecological and Evolutionary Responses to Recent Climate Change*. Annual Review of Ecology Evolution and Systematics 37 (1): 637-669. <https://doi.org/10.1146/annurev.ecolsys.37.091305.110100>
- Pellissier, L., P.B. Eidesen, D. Ehrich, P. Descombes, P. Schönswetter, A. Tribsch, K.B. Westergaard, N. Alvarez, A. Guisan, N.E. Zimmermann, S. Normand, P. Vittoz, M. Luoto, C. Damgaard, C. Brochmann, M.S. Wisz y I.G. Alsos. 2015. *Past climate-driven range shifts and population genetic diversity in arctic plants*. Journal of Biogeography 43 (3): 461-470. <https://doi.org/10.1111/jbi.12657>
- Rellstab, C., B. Dauphin y M. Exposito-Alonso. 2021. *Prospects and limitations of genomic offset in conservation management*. Evolutionary Applications 14 (5): 1202-1212. <https://doi.org/10.1111/eva.13205>
- Riddell, E.A., K.J. Iknayan, L. Hargrove, S. Tremor, J.L. Patton, R. Ramirez, B.O. Wolf y S.R. Beissinger. 2021. *Exposure to climate change drives stability or collapse of desert mammal and bird communities*. Science 371 (6529): 633-636. <https://doi.org/10.1126/science.abd4605>
- Riemann, H., y E. Ezcurra. 2007. *Endemic regions of the vascular flora of the peninsula of Baja California, Mexico*. Journal of Vegetation Science 18 (3): 327-336. <https://doi.org/10.1111/j.1654-1103.2007.tb02544.x>
- Riemann, H., y E. Ezcurra. 2005. *Plant endemism and natural protected areas in the peninsula of Baja California, Mexico*. Biological Conservation 122 (1): 141-150. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2004.07.008>

- Roberts, D.R., y A. Hamann. 2015. *Glacial refugia and modern genetic diversity of 22 western North American tree species*. Proceedings of the Royal Society B Biological Sciences 282(1804): 20142903. <https://doi.org/10.1098/rspb.2014.2903>
- Román-Palacios, C., y J.J. Wiens. 2020. *Recent responses to climate change reveal the drivers of species extinction and survival*. Proceedings of the National Academy of Sciences 117 (8): 4211-4217. <https://doi.org/10.1073/pnas.1913007117>
- Shepard, W. D. 1993. *Desert springs-both rare and endangered*. Aquatic Conservation Marine and Freshwater Ecosystems 3 (4): 351-359. <https://doi.org/10.1002/aqc.3270030409>
- Spennemann, D.H.R. 2020. *Palms fanning out: a review of the ecological provisioning services provided by Washingtonia filifera and W. robusta in their native and exotic settings*. Plant Ecology and Diversity 13 (3-4): 289-324. <https://doi.org/10.1080/17550874.2020.1819465>
- Villanueva-Almanza, L., P.P. Garcillán, E. Ávila-Lovera, V. Pérez, C.S. Bejarano, E. Focht y E. Ezcurra. 2018. *A Hollywood palm icon unmasked: clinal variation in Washingtonia (Arecaceae) of Peninsular California*. Botanical Journal of the Linnean Society 188 (4): 406-425. <https://doi.org/10.1093/botlinnean/boy066>
- Villanueva-Almanza, L., J.B. Landis, D. Koenig y E. Ezcurra. 2021. *Genetic and morphological differentiation in Washingtonia (Arecaceae): solving a century-old palm mystery*. Botanical Journal of the Linnean Society 196 (4): 506-523. <https://doi.org/10.1093/botlinnean/boab009>
- Wright, S. 1943. *Isolation by distance*. Genetics 28 (2): 114-138. <https://doi.org/10.1093/genetics/28.2.114>

**Ficha curricular:**

- **Dra. Anastasia Klimova**, posdoctorante en el Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste, SNII nivel 1. Línea de investigación incluye genética y genómica de la conservación de las poblaciones de especies de plantas y animales endémicos y en peligro de extinción. anastasia_aleksandrovna@hotmail.com
- **Dr. Jesús Neftalí Gutiérrez Rivera**, Técnico Responsable del Laboratorio de Biología Molecular del Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste, SNII nivel 1. Interesado en la aplicación de las herramientas de biología molecular para resolver problemáticas en áreas como patología, genética, genómica, entre otras. jtali04@cibnor.mx
- **Dr. Alfredo Ortega Rubio**, Director General de El Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste (CIBNOR). Interesado en ecología de la conservación, diseño de áreas naturales protegidas, restauración ecológica, impacto ambiental y estudios poblacionales sobre especies sensibles. Investigador Nacional Emérito.

Cita

Klimova A., J.N. Gutiérrez-Rivera y A. Ortega Rubio. La historia en los genes: las palmeras icónicas de América del Norte. Recursos Naturales y Sociedad, 2026. Vol. 12(1): 72-91. <https://doi.org/10.18846/renaysoc.2026.12.12.01.0005>

Sometido: 27 de agosto de 2025

Aceptado: 9 de diciembre de 2025

Editora asociada: Dra. Carina Gutiérrez Flores

Editora ejecutiva: Dra. Crisalejandra Rivera-Pérez

Diseño gráfico editorial: Ing. Fca. Elizabeth Villegas Carrazco

Why are marine benthic populations so vulnerable to overfishing?

¿Por qué las poblaciones bentónicas marinas son tan vulnerables a la sobrepesca?

Marlene Anaid Luquin-Covarrubias^{1*} y Enrique Morales-Bojórquez¹

Resumen

Las poblaciones bentónicas están formadas por organismos sedentarios, los cuales pueden tener movilidad lenta o limitada. Esto significa que una vez asentados en el fondo marino, sus desplazamientos ocurren a escalas espaciales muy reducidas. En México, los organismos bentónicos constituyen algunas de las pesquerías con mayor importancia biológica, económica y social, ya que constituyen una de las fuentes más importantes de empleo, estabilidad socioeconómica en las comunidades pesqueras y alimento esencial tanto para diversas especies de peces como para el ser humano. Sin embargo, muchas de las pesquerías comerciales han sido sobreexplotadas y sus poblaciones han sufrido un declive drástico en su abundancia, mostrando colapsos rápidos y drásticos, así como recuperaciones lentas. Aunque diversos factores contribuyen a su agotamiento, tales como: aspectos socioeconómicos, también sus características biológicas y ecológicas como su forma de distribución, desplazamiento limitado, reclutamiento variable, alta mortalidad natural y por pesca, las convierte en organismos más vulnerables a la sobrepesca.

Palabras clave: sobrepesca, organismos sedentarios, abundancia, distribución, metapoblación.

¹Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste, S.C. (CIBNOR). Instituto Politécnico Nacional 195, Playa Palo Santa Rita Sur, La Paz, Baja California Sur, 23096, México.

* Autor de correspondencia: marlene.luquin@gmail.com



Abstract

Benthic populations are composed of sedentary organisms, which may have slow or limited mobility. This means that once settled on the seabed, their movements occur on limited small spatial scales. In Mexico, benthic organisms constitute some of the most biologically, economically, and socially important fisheries, like they are the main source of employment, socioeconomic stability in fishing communities, and essential food for various fish species as well as for humans. However, many commercial fisheries have been overexploited, and their populations have suffered a drastic decline in abundance, exhibiting faster and more dramatic collapses, as well as slower recoveries. Although several factors contribute to their depletion, such as socioeconomic aspects, also their ecological and biological characteristics as spatial distribution patterns, limited movement, variable recruitment, and high natural and fishing mortality, make them more vulnerable to overfishing.

Keywords: Overfishing, sedentary organism, abundance, distribution, metapopulation.

Introducción

La sobrepesca es definida como la captura excesiva de los individuos de una población, la cual cae a niveles tan bajos que pone en riesgo su capacidad de recuperación. Este fenómeno ocurre cuando los individuos acuáticos están sujetos a una presión pesquera más allá del nivel óptimo que permita la sustentabilidad de la pesquería. Cuando las capturas superan este nivel, la población pierde la capacidad de reponerse por reproducción, afectando su renovación (United States. National Marine Fisheries Service, 2006.). Como consecuencia, la abundancia disminuye progresivamente y se compromete su capacidad de mantenerse sostenible en el tiempo, lo que puede conducir al colapso de la pesquería, generando impactos negativos en aspectos ecológicos, económicos y sociales. Actualmente, a nivel global, las estadísticas muestran una disminución en la proporción de poblaciones marinas en estado de sustentabilidad (FAO, 2016). Durante 2022 la producción pesquera mundial alcanzó un valor histórico máximo de 223.2 millones de toneladas, y los bentónicos, particularmente los bivalvos marinos, aportaron el 14 % de la producción total.

¿Quiénes son los organismos bentónicos y por qué son tan importantes?

Las poblaciones bentónicas son aquellas que habitan en el fondo marino y están conformadas por individuos sedentarios. Sin embargo, esto no significa que sean necesariamente sésiles o inmóviles. Más bien, se trata de individuos que pueden permanecer la mayor parte del tiempo en un mismo lugar, o bien, desplazarse de manera lenta o limitada. Así, todos los organismos bentónicos viven en el fondo, pero no todos son sésiles (Orensanz *et al.* 2016). Las diferencias entre ambos conceptos se muestran en la Tabla 1. Los organismos bentónicos incluyen las almejas, caracoles, mejillones, anémonas, cangrejos, estrellas de mar y pepinos de mar, entre otros. Ellos se distribuyen en una amplia variedad de hábitats, desde zonas intermareales hasta grandes profundidades oceánicas, y ocupan distintos tipos de sustrato, como arena, lodo y rocas, ya sea enterrados en el fondo marino o sobre él. De esta manera, una vez que los organismos se asientan en el fondo marino, sus desplazamientos ocurren a escalas espaciales muy reducidas en comparación con procesos biológicos de mayor cobertura espacial, como la dispersión larvaria. Algunas especies incluso viven completamente enterradas, perdiendo casi por completo su capacidad de desplazamiento (Yuxin, 2021).

Tabla 1. Diferencias y características principales entre organismos bentónicos, sésiles y sedentarios.

Característica	Organismos bentónicos	Organismos sésiles	Organismos sedentarios
¿Qué describe el término?	Su hábitat	Su capacidad de movimiento	Su capacidad de movimiento
Lugar donde viven	Fondo de mares, océanos, ríos o lagos	Fijos a un sustrato	Permanecen en un lugar la mayor parte de su ciclo de vida
Desplazamiento	Puede ser activo o nulo	Nulo	Lento y ocasional
Ambiente	Solo acuático	Acuático o terrestre	Acuático o terrestre
Relación entre ellos	Incluye sésiles y móviles	Pueden ser bentónicos o no	Pueden ser bentónicos o no
Ejemplos	Cangrejos, estrellas de mar, almejas	Corales, esponjas, percebes	Caracoles, erizos de mar, lombrices



Los organismos bentónicos desempeñan un papel fundamental, ya que facilitan la transferencia de energía entre los productores primarios, los cuales producen su propio alimento y productores secundarios, que se alimentan de otros animales. En particular, los bivalvos (animales acuáticos con concha formada por dos partes llamadas valvas) cumplen funciones ecológicas clave, como la filtración del agua, reciclaje de nutrientes, incluso la presencia de algunas especies puede ser un indicador del estado de salud de los ecosistemas marinos (Gerhardt, 2002; Morales-Zárate et al. 2016).

En México, los bentónicos forman parte de las pesquerías artesanales con mayor relevancia biológica, económica y social, ya que constituyen una de las fuentes más importantes de empleo, ingresos económicos y estabilidad socioeconómica en las comunidades pesqueras. Adicionalmente, son alimento esencial tanto para diversas especies de peces como para el ser humano (Fig. 1) (Ríos-Jara et al. 2008). En las últimas décadas, numerosas poblaciones de organismos bentónicos de importancia comercial han sufrido un notable agotamiento, lo que ha impactado negativamente a sus pesquerías. De acuerdo con las leyes mexicanas muchas de estas pesquerías se encuentran en estado de deterioro, sobreexplotación o recuperación después de sufrir una caída severa (DOF, 2023). Especies como el abulón (*Haliotis* spp), la almeja catariana (*Argopecten ventricosus*) y la almeja de sifón (*Panopea* spp) han experimentado sobrepesca y sus poblaciones se han visto comprometidas debido a las severas disminuciones en su abundancia (Hernández-Padilla et al. 2024; Luquin-Covarrubias et al. 2022). Asimismo, la almeja chocolata (*Megapitaria squalida*) y callo de hacha (*Pinna rugosa*, *Atrina maura* y *Atrina oldroydii*), se encuentran en estado de deterioro, mientras que la almeja pismo (*Tivela stultorum*) está catalogada en estado de protección.

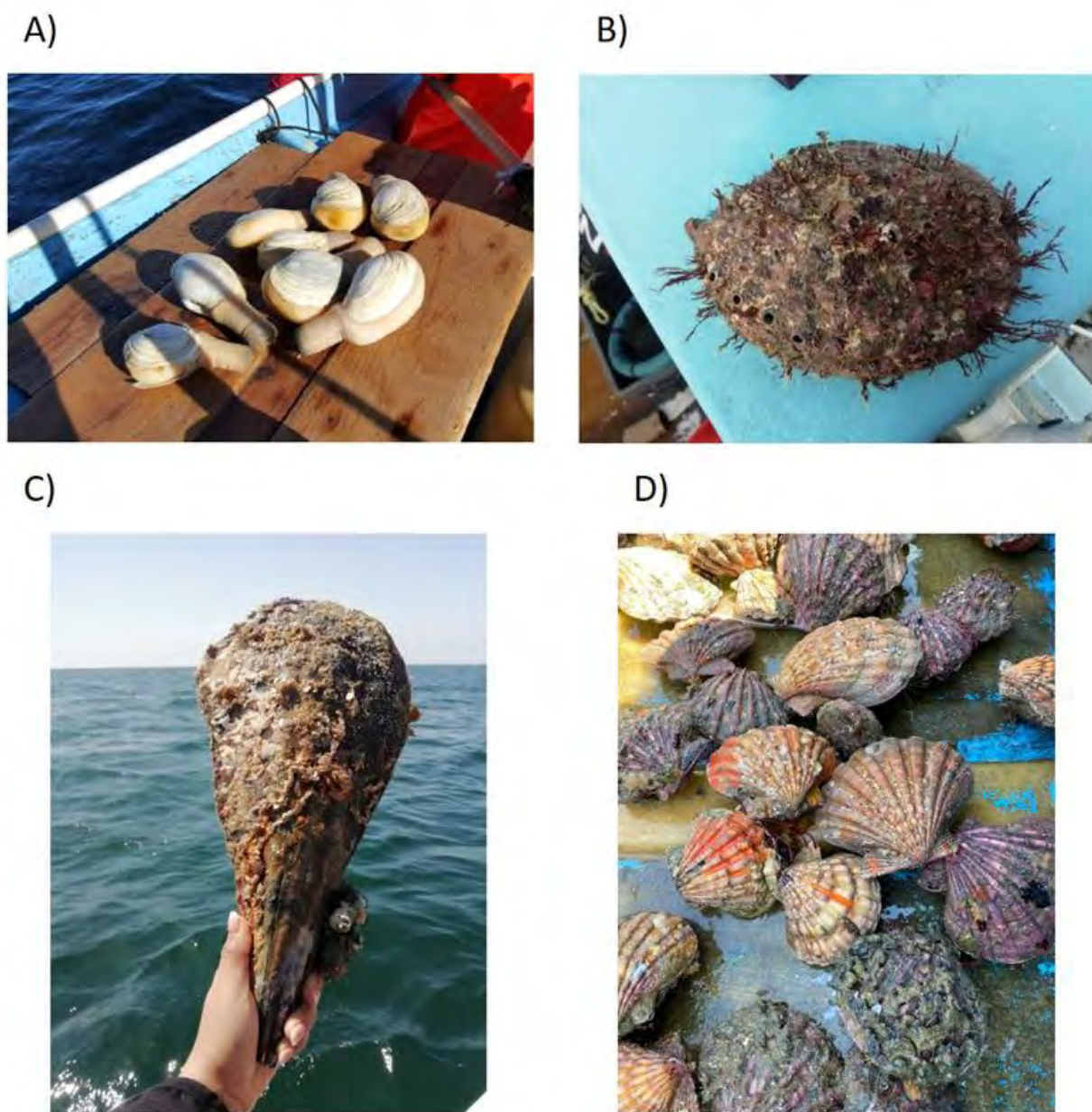


Figura 1. Especies de bentónicos de importancia comercial. A) Almeja generosa (*Panopea globosa*) crédito: Dra. Estafani Larios Castro, B) Abulón (*Haliotis fulgens*), C) Callo de hacha (*Atrina maura*), D) Almeja mano de león (*Nodipecten subnodosus*) crédito: Marlene A. Luquin Covarrubias.

La disminución en la abundancia de las poblaciones acuáticas puede ocurrir por diversos factores. La sobrepesca constituye una causa importante en el declive de muchas pesquerías alrededor del mundo; sin embargo, también pueden influir las características biológicas de cada especie, factores ambientales relacionados con el cambio climático y degradación de hábitat, y aspectos socioeconómicos (Martínez-Aguilar et al. 2009). Un factor clave que contribuye a la sobrepesca es el precio en el mercado. Este influye directamente en las decisiones de los pescadores, quienes



tienden a enfocarse en capturar las especies más valiosas para aumentar sus ingresos (Tsikliras y Polymeros, 2014). Cuando ciertas especies alcanzan una alta demanda y precios elevados, aumenta la presión sobre sus poblaciones. En algunos casos, esto puede derivar incluso en prácticas ilegales y en el incumplimiento de las regulaciones establecidas para la pesquería (Fig. 2) (Pedroza-Gutiérrez y López-Rocha, 2021).

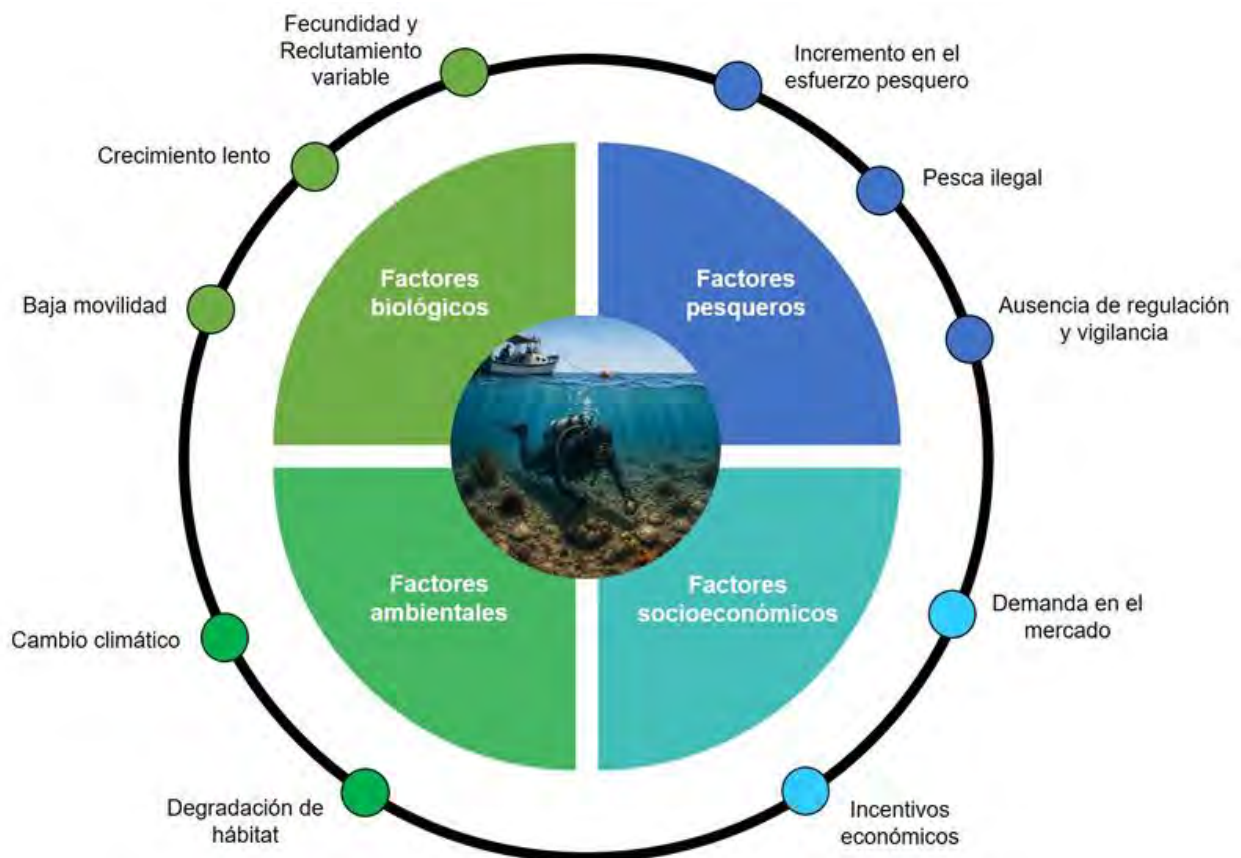


Figura 2. Esquema conceptual de los principales factores que contribuyen a la sobrepesca. Se ilustran cuatro dimensiones clave: factores biológicos (como crecimiento lento y baja movilidad), pesqueros (incremento en esfuerzo pesquero, pesca ilegal, ausencia en regulación y vigilancia) ambientales (cambio climático y degradación del hábitat) y socioeconómicos (demanda de mercado e incentivos económicos), los cuales interactúan y aumentan la presión sobre los recursos marinos.

La paradoja de la abundancia: cuando la pesca parece ir bien, pero no lo está

En pesquerías, uno de los principales retos es evaluar correctamente las poblaciones marinas e implementar estrategias de manejo para su preservación a largo plazo. No obstante, las variaciones en las capturas y en el esfuerzo pesquero pueden dificultar la evaluación del estado real de las poblaciones. Como consecuencia, la sobrepesca puede pasar inadvertida hasta que la población se encuentra seriamente deteriorada o en condición vulnerable (Larios-Castro *et al.* 2023). Este problema puede estar asociado con ciertos mecanismos que operan dentro de la actividad pesquera, destacando los siguientes:

1. La hiperestabilidad, ocurre cuando las tasas de capturas se mantienen altas a pesar de que la abundancia de la población está disminuyendo, lo que puede llevar a sobreestimar el tamaño de la población o a subestimar la mortalidad causada por la pesca. Este fenómeno puede deberse al comportamiento de algunas especies, que tienden a concentrarse en grupos más grandes a medida que su población se reduce, a preferir ciertos hábitats o a agruparse durante la época de reproducción. Lo anterior, permite mantener las tasas de captura relativamente altas aun cuando la población está en declive (Harley *et al.* 2001).
2. La depensación, o efecto Allee, este fenómeno se observa cuando la tasa de crecimiento de una población disminuye conforme su densidad o abundancia se reduce a niveles muy bajos. Si la población cae por debajo de un umbral crítico o está muy dispersa, su capacidad de sobrevivir y reproducirse disminuye perdiendo su capacidad de recuperarse; lo anterior, puede conducir a la extinción local (Liermann y Hilborn, 2001).
3. El agotamiento en serie es una forma de sobrepesca que afecta a las poblaciones de bentónicos de manera silenciosa. Dado que los individuos tienden a agruparse en áreas pequeñas o parches, ellos pueden ser fácilmente localizados. Así, los pescadores seleccionan el área con mayor abundancia y una vez que esta área queda agotada, buscan nuevas áreas con alta cantidad de individuos. En la medida que la pesca va cambiando a áreas más productivas, las cuales siguen generando ganancias económicas, se tiene una creencia errónea de que la pesquería sigue siendo sustentable. Sin embargo, otras áreas quedan sobreexplotadas, hasta que, de manera repentina la actividad de pesca deja de ser redituable (Luquin-Covarrubias *et al.* 2020).



Cuando ser pocos es un problema: el riesgo de colapso en las poblaciones bentónicas

La capacidad de las poblaciones marinas para resistir impactos, adaptarse al cambio y recuperarse rápidamente frente a factores estresantes como la sobrepesca, depende en gran medida de su capacidad para compensar biológicamente el aumento de la mortalidad y la disminución de la abundancia (Batoool *et al.* 2025; Larios-Castro *et al.* 2021). En algunas especies de bentónicos, la escasa movilidad y su forma de distribución espacial, puede afectar su supervivencia y aumentar su riesgo de colapso poblacional; ya que usualmente, los bentónicos están distribuidos en metapoblaciones, es decir, conjuntos de subpoblaciones de la misma especie espacialmente separadas, pero conectadas entre sí, principalmente a través de la dispersión larvaria (Orensanz *et al.* 2016). Dentro de las subpoblaciones, los individuos suelen agruparse en parches de alta densidad, lo que facilita su localización y captura. De tal manera que, las pesquerías suelen concentrar el esfuerzo en estos parches, incluso los individuos pueden ser seleccionados con base en los criterios demandados en el mercado, tal como la talla, el color o el sexo. Lo anterior, los hace particularmente vulnerables a la sobrepesca en comparación con poblaciones que exhiben alta movilidad, como los peces.

Durante la década de 1980 se consideraba que las poblaciones bentónicas se recuperaban rápidamente a la sobrepesca, debido a que generalmente la liberación de gametos (células sexuales) ocurre en grandes cantidades y un alto número de nuevos individuos serían incorporados a la población para la renovación natural (Tracey y Lyle, 2011). No obstante, la reproducción de estos individuos depende en gran medida de la proximidad entre ellos. Cuando la abundancia disminuye o las poblaciones se encuentran dispersas, la probabilidad de encuentro entre individuos o gametos liberados en el agua, se reduce drásticamente. Lo anterior, afecta la capacidad de la población para producir individuos nuevos, que remplacen a los individuos existentes e incrementen la abundancia. Cuando los individuos adultos son escasos, la estructura de tallas y edades de la población también se modifica. Adicionalmente, la supervivencia de larvas disminuye, debido a que las hembras adultas proporcionan mayor cantidad de nutrientes en los huevos, lo que les permite crecer y desarrollarse rápidamente. En poblaciones pequeñas, los individuos son más vulnerables a los cambios ambientales y pueden ser más vulnerables a depredadores. Estos cambios biológicos y ecológicos aceleran la reducción de la población a un nivel crítico, dificultando su recuperación y pudiendo conducir a extinciones locales o totales (Cheung y Sumaila, 2015; Liermann y Hilborn, 2001).

Consideraciones finales y perspectivas

Durante décadas, los individuos bentónicos han sido vulnerables a la sobrepesca. Muchos factores han influido en el declive de sus poblaciones, los más destacados son sus características biológicas asociadas a su tipo de distribución, baja movilidad y rasgos específicos en su dinámica poblacional; su susceptibilidad a los cambios ambientales; la ausencia de regulaciones de manejo efectivas; así como la alta demanda y precio en el mercado. Lo anterior, incrementa la vulnerabilidad de las poblaciones y dificulta su recuperación, pudiendo conducir a colapsos parciales o totales. Procesos en donde la disminución de la abundancia es poco visible, tales como, la hiperestabilidad, el agotamiento en serie y la depensación poblacional han operado en sus poblaciones, incluso antes de que los pescadores y manejadores pudieran detectarlo. Esta situación, conlleva a mayores desafíos para evaluar correctamente sus poblaciones e implementar estrategias de manejo eficaces. Un aspecto fundamental a considerar en la estimación de abundancia, es su estructura metapoblacional. Estimar su abundancia a partir de pequeñas áreas aisladas puede dar una imagen engañosa de cómo está constituida la población y cuántos individuos hay realmente; por el contrario, analizar su distribución completa, permite conocer su dinámica poblacional real.

Una necesidad básica en las pesquerías de recursos bentónicos es el establecimiento de límites o umbrales permisibles, en los cuales la abundancia debe mantenerse para que la pesquería sea sustentable. Por otro lado, establecer límites de precaución o peligro podría ayudar a detener la pesca antes de un daño irreversible como el colapso. En diversas pesquerías de bentónicos alrededor del mundo, la aplicación de regulaciones basadas en la rotación de áreas de pesca ha sido efectiva. Sin embargo, su implementación no es del todo sencilla, ya que previamente se requiere conocer muchos aspectos sobre la población. Lo mínimo necesario es tener una evaluación de la abundancia, saber cómo los individuos están distribuidos y que dimensión de área ocupan. Una vez evaluados estos aspectos, entonces se debe establecer el tipo de rotación que se va a realizar: 1) rotación en pulso, donde se pesca de manera intensa durante periodos cortos en un área específica. Después, esa zona se deja descansar por un tiempo antes de volver a utilizarla, o 2) rotación simétrica, que consiste en repartir la actividad pesquera de forma más equilibrada. En este caso, las áreas se abren y se cierran por periodos similares, de modo que pasan aproximadamente la mitad del tiempo en uso y la otra mitad en descanso, lo que ayuda a que las especies se recuperen.

En México, existen muchas limitantes para la aplicación de acciones de manejo. Uno de los principales obstáculos es la ausencia de datos para las diferentes especies y sus poblaciones explotadas comercialmente. Realizar muestreos exhaustivos en áreas extensas resulta ser



altamente costoso, además de requerir personal y equipo que no siempre están disponibles. Ante este panorama, un concepto que ha tomado fuerza en la literatura y es usado cada vez más frecuentemente es el comanejo, en donde las regulaciones de manejo son consensuadas por los diferentes actores de la pesca (pescadores, científicos, autoridades, manejadores) y la autorregulación y participación por parte de las comunidades pesqueras es esencial en el funcionamiento de este esquema. Existen casos de éxito en donde las pesquerías alcanzan la sustentabilidad con el co-manejo, tal es el caso de la langosta en el Pacífico mexicano y el ostión roca en Nayarit, México (De la Cruz-González *et al.* 2018). De esta manera, se vuelve indispensable fortalecer la colaboración entre las instituciones académicas, gubernamentales y organizaciones de pescadores que permitan vincular el conocimiento científico con la experiencia en el campo. Una participación colaborativa podría facilitar la colecta y disponibilidad de datos para diferentes pesquerías de bentónicos. La generación de un reservorio de datos que sea constantemente actualizado y ampliado permitiría la construcción de evaluaciones y modelos pesqueros más sólidos y confiables.

Literatura citada

- Batool, S., S. Parveen, R. Javed, M.S. Saleem, K. Fatima, N. Ijaz, y A. Naseer. 2025. *From overfishing to resilience: A global review of fisheries management strategies*. Haya: The Saudi Journal of Life Sciences 10(8): 317–326.
- Cheung, W.W. y U.R. Sumaila. 2015. *Economic incentives and overfishing: a bioeconomic vulnerability index*. Marine Ecology Progress Series 530: 223–232.
- De la Cruz-González, F.J., J.L. Patiño-Valencia, M.C. Luna-Raya, y A.M. Cisneros-Montemayor. 2018. *Self-empowerment and successful co-management in an artisanal fishing community: Santa Cruz de Miramar, Mexico*. Ocean & Coastal Management 154: 96–102.
- DOF. 2023. Diario Oficial de la Federación. *Actualización de la Carta Nacional Pesquera*. <https://www.gob.mx/imipas/acciones-y-programas/carta-nacional-pesquera-51204>.
- FAO. 2016. *The State of World Fisheries and Aquaculture 2016–Contributing to food security and nutrition for all*. Rome. <https://openknowledge.fao.org/handle/20.500.14283/i5555e>.

- FAO. 2024. *The State of World Fisheries and Aquaculture 2024 – Blue Transformation in action*. Rome. <https://doi.org/10.4060/cd0683en>.
- Gerhardt, A. 2002. *Bioindicator species and their use in biomonitoring*. Environmental monitoring, 1: 77–123.
- Harley, S.J., R.A. Myers y A. Dunn. 2001. *Is catch-per-unit-effort proportional to abundance?* Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences 58(9): 1760–1772.
- Hernández-Padilla, J.C., M.A. Luquin-Covarrubias, E. Morales-Bojórquez, S. Salas, J.A. Navarro-Gonzalez, C.H. Rabago-Quiroz y N. Capetillo-Piñar. 2024. *Stock assessment and fishing management of green abalone (Haliotis fulgens) along the West Coast of Baja California Sur, Mexico*. Ocean and Coastal Management 253: 107134.
- Larios-Castro, E., E. Morales-Bojórquez, J.G. Díaz-Urbe, V.G. Vargas-López y J.A. Massó-Rojas. 2021. *Historical reconstruction of biomass of Panopea globosa from the Southwestern coast of Baja California Peninsula, Mexico: A new perspective for geoduck fishery management*. Journal of Shellfish Research 40(1): 49–61.
- Larios-Castro, E., E. Morales-Bojórquez, S.S. González-Peláez, J.G. Díaz-Urbe, M.A. Luquin-Covarrubias y H. Villalobos. 2023. *An enhancement in the management practices of geoduck clam Panopea globosa: The estimation of reference points in the short and long term*. Ocean and Coastal Management 243: 106755.
- Liermann, M y R. Hilborn. 2001. *Depensation: evidence, models and implications*. Fish and Fisheries 2(1): 33–58.
- Luquin-Covarrubias, M.A., E. Morales-Bojórquez, J.A. García-Borbón, J.S. Amezcua-Castro, S.A. Pérez-Valencia y E. Larios-Castro. 2020. *Evidence of overfishing of geoduck clam Panopea globosa from a length-based stock assessment approach*. PeerJ 8: e9069.
- Luquin-Covarrubias, M.A., E. Morales-Bojórquez y S.S. González-Peláez. 2022. *The last geoduck: The experience of geoduck clam fishery management in the Mexican Pacific Ocean*. Marine Policy 143: 105145.
- Martínez-Aguilar, S., J.A. de Anda-Montañez, F. Arreguín-Sánchez y M.Á. Cisneros-Mata. 2009. *Constant harvest rate for the Pacific sardine (Sardinops caeruleus) fishery in the Gulf of California based on catchability-at-length estimations*. Fisheries Research 99(2): 74–82.



- Morales-Zárate, M.V., A. Zayas-Álvarez, C.A. Salinas-Zavala y A. Mejía-Rebollo. 2016. *Biocenosis de la comunidad bentónica en la Laguna Guerrero Negro, Baja California Sur, México: caracterización espacio-temporal*. Latin American Journal of Aquatic Research 44(4): 726–741.
- Orensanz J.M., A.M. Parma y S.J. Smith. 2016. *Dynamics, Assessment, and Management of Exploited Natural Scallop Populations*. pp. 611–676. En: Shumway, S.E. y Parsons, G.J. (eds.). *Scallops: Biology, Ecology, Aquaculture, and Fisheries*. Elsevier. 3th ed. Amsterdam, Netherlands.
- Pedroza-Gutiérrez, C. y J.A. López-Rocha. 2021. *Ungovernable systems: The strength of informal institutions in the sea cucumber fishery in Yucatan, Mexico*. Plos One, 16(3): e0249132.
- Ríos-Jara, E., C.M. Navarro-Caravantes, N.N. Sarmiento, C.M. Galván-Villa y E. López-Uriarte. 2008. *Bivalvos y gasterópodos (Mollusca) de importancia comercial y potencial de las costas de Chiapas y Oaxaca, México*. Revista Ciencia y Mar XII (35): 3–20.
- Tracey, S.R. y J.M. Lyle. 2011. *Linking scallop distribution and abundance with fisher behaviour: implication for management to avoid repeated stock collapse in a recreational fishery*. Fisheries Management and Ecology 18(3): 221–232.
- Tsikliras, A.C. y K. Polymeros. 2014. *Fish market prices drive overfishing of the ‘big ones’*. PeerJ 2: e638.
- United States. National Marine Fisheries Service. 2006. NOAA Fisheries glossary. https://repository.library.noaa.gov/view/noaa/12856/noaa_12856_DS1.pdf. 03 mayo de 2026.
- Yuxin, M. 2021. *Overview of benthos*. Journal of Fisheries Research 5(4): 1–2.

Fichas curriculares de los autores

- **Marlene Anaid Luquin Covarrubias** es Doctora en Ciencias en Uso, Manejo y Preservación de los Recursos Naturales del Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste (CIBNOR). Actualmente realiza una estancia posdoctoral con el proyecto titulado “Estrategias de conservación de *Panopea globosa* que promuevan la economía de los pescadores ribereños”. Su interés de investigación está orientado a temas de modelación y manejo pesquero, evaluación de poblaciones marinas y dinámica poblacional. Es miembro del Sistema Nacional de Investigación (SNII-Candidata). marlene.luquin@gmail.com
- **Enrique Morales Bojórquez** es Doctor en ciencias por el Centro Interdisciplinario de Ciencias Marinas (CICIMAR-IPN). Su línea de investigación se centra en análisis de pesquerías marinas y recursos marinos potenciales y ecología marina cuantitativa. Actualmente es investigador titular C en el CIBNOR y miembro del Sistema Nacional de Investigación (SNII-III). emorales@cibnor.mx

Cita

Luquin-Covarrubias, M.A., y E. Morales-Bojórquez. ¿Por qué las poblaciones bentónicas marinas son tan vulnerables a la sobrepesca? *Recursos Naturales y Sociedad*, 2026. Vol. 12(1): 93-105. <https://doi.org/10.18846/renaysoc.2026.12.12.01.0006>.

Sometido: 20 de febrero de 2025

Aceptado: 7 de mayo de 2026

Editor asociado: Dr. Arturo Sánchez Paz

Editor ejecutivo: Dr. Arturo Sánchez Paz

Diseño gráfico editorial: Ing. Fca. Elizabeth Villegas Carrazco

Knowledge of the Sea:
Science in Artisanal Fisheries

Saberes del mar: la ciencia en la pesca artesanal

Katherin Soto-López¹, Daniela Alejandra Murillo-Cisneros¹,
Orlando Lugo-Lugo¹, Tania Zenteno-Savín^{1*}

Resumen

Mucho antes de que los satélites cartografiaran las corrientes y la ciencia describiera patrones migratorios, los pescadores ya sabían “leer” el mar. El conocimiento empírico adquirido por la observación diaria y transmitido entre generaciones les permite identificar la estacionalidad, hábitat, alimentación y periodos reproductivos de diversas especies, siendo recursos valiosos para la ciencia y la gestión pesquera. Ejemplos de colaboración entre pescadores e investigadores muestran coincidencias entre el conocimiento local y estudios científicos sobre especies como el jurel (*Seriola lalandi*), el calamar gigante (*Dosidicus gigas*) y varias especies de tiburones, incluyendo patrones migratorios, reproductivos y de abundancia vinculados a condiciones ambientales. Lo mismo sucede con el reconocimiento de las relaciones entre las poblaciones de especies marinas y cambios interanuales asociados a fenómenos climáticos como El Niño o La Niña. Este diálogo entre ciencia académica y conocimiento ecológico tradicional no sólo mejora la comprensión de los ecosistemas, sino que también facilita la implementación de medidas de manejo sostenible, asegurando la preservación de recursos y saberes para las generaciones futuras.

Palabras claves: Conocimiento ecológico tradicional, conocimiento empírico, pescadores, pesquerías.

¹ Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste, S.C. (CIBNOR). Instituto Politécnico Nacional 195, Playa Palo Santa Rita Sur, La Paz, Baja California Sur, 23096, México.

* Autor de correspondencia: tzenteno04@cibnor.mx Teléfono: +52 (612) 123 8502



Abstract

Long before satellites mapped ocean currents and science described migratory patterns, fishers already knew how to read the sea. The empirical knowledge acquired through daily observation and transmitted across generations allows them to identify the seasonality, habitat, feeding habits, and reproductive periods of various species, making it a valuable resource for science and fisheries management. Examples of collaboration between fishers and researchers reveal overlaps between local knowledge and scientific studies on species such as the yellowtail (*Seriola lalandi*), the jumbo squid (*Dosidicus gigas*), and several shark species, including migratory, reproductive, and abundance patterns linked to environmental conditions. The same applies to the recognition of relationships between marine populations and interannual changes associated with climatic phenomena such as El Niño. This dialogue between academic science and traditional ecological knowledge not only enhances the understanding of ecosystems but also facilitates the implementation of sustainable management measures, ensuring the preservation of resources and knowledge for future generations.

Keywords: Empirical knowledge, fisheries, fishers, traditional ecological knowledge.

¿Cómo los pescadores leían el mar antes de la ciencia moderna?

Desde la escuela primaria aprendemos que la vida surgió en el mar y que tres cuartas partes de la superficie terrestre están cubiertas por agua. En consecuencia, los océanos albergan extensos ecosistemas marinos que proveen alimento y empleo a numerosas poblaciones en todo el mundo. En este contexto, la pesca se reconoce como uno de los oficios más antiguos de la humanidad, y además, puede considerarse una de las disciplinas pioneras en el conocimiento y aprovechamiento de las especies marinas presentes en el planeta.

Los pescadores desarrollan este conocimiento de manera empírica, a partir de la observación del día a día en su jornada de trabajo, llegando a conocer la estacionalidad de las especies, la preferencia de hábitat, de alimentación e incluso la temporada reproductiva de las especies que son capturadas (Silvano y Valbo-Jørgensen, 2008; Fulton *et al.*, 2019). Todo este entendimiento es transmitido generación tras generación, acumulando información valiosa que los biólogos pueden utilizar para desarrollar proyectos de investigación encausados a generar medidas de manejo y/o conservación de las especies.

A partir de las vivencias de los pescadores resulta importante establecer una relación entre los pescadores y la ciencia. Este conocimiento empírico desarrollado por generaciones dentro de las familias de pescadores representa una fuente valiosa de información que puede complementar los estudios científicos sobre la ecología y biología de las especies aprovechadas.

Dada la importancia de la actividad pesquera ribereña, en 2017, la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO, por sus siglas en inglés) declaró el año 2022 como el Año Internacional de la Pesca Artesanal y la Acuicultura. El objetivo de esta declaración era reconocer la importancia de los pescadores artesanales y acuicultores en sus contribuciones en la seguridad alimentaria y nutrición, la mitigación de la pobreza (sustento de la economía costera), y el bienestar humano mediante el uso responsable de los recursos pesqueros y acuícolas, fomentando así la comprensión global de los recursos explotados y las acciones para apoyar su sustentabilidad (IMIPAS, 2022; FAO, 2023).

Conocimiento tradicional como ciencia

En tiempos donde se habla de la sobrepesca y el cambio climático, el conocimiento que poseen los pescadores resulta clave para la sostenibilidad de los recursos marinos. Cada pesquería tiene sus especies objetivos y especies asociadas, así como artes de pesca con características distintas según la zona y estación del año (Gluyas-Millán y Quiñonez-Velázquez, 2022).

En general, las pesquerías industriales se enfocan en la captura masiva de especies de alto valor comercial o gran abundancia, como atún, sardina, anchoveta o camarón, utilizando embarcaciones de gran tamaño y artes de pesca tecnificadas, como redes de cerco y redes de arrastre. Aunque estas pesquerías abastecen mercados nacionales e internacionales, también pueden generar mayores impactos ambientales, entre ellos la captura incidental de especies no objetivo y alteraciones en los ecosistemas marinos. En contraste, en México se reconoce la importancia de la pesca artesanal o ribereña, la cual involucra a más de 223 mil personas quienes dependen directamente del mar para su subsistencia (Gluyas-Millán y Quiñonez-Velázquez, 2022; IMIPAS, 2022). Entre los años de 2020 a 2024, esta actividad representó el 38% del promedio de la producción total nacional pesquera (DOF, 2020). A diferencia de la pesca industrial, que utiliza grandes embarcaciones y tecnología avanzada, la pesca artesanal opera a pequeña escala, con embarcaciones menores (<10.5 m de eslora) llamadas “*pangas*” (Fig. 1) y artes de pesca que incluyen redes (Fig. 2), anzuelos, trampas y buceo, siendo de bajo impacto ambiental y destinado al consumo local o autoconsumo, resultando vital para la económica de comunidades costeras.



Figura 1. Pangas utilizadas dentro de la pesca artesanal en Santa Rosalía, Baja California Sur.



Figura 2. Redes empleadas dentro de la pesca artesanal en Santa Rosalía, Baja California Sur.

En diversas regiones del país, investigadores y pescadores artesanales trabajan en colaboración para generar información más completa sobre la biología de especies que componen diferentes pesquerías. El conocimiento empírico de los pescadores puede aportar información relevante sobre la temporalidad de captura, profundidad de pesca y presencia de organismos juveniles y adultos, contribuyendo a orientar los esfuerzos de muestreo biológico. A su vez, la información científica relacionada con aspectos reproductivos, distribución y agregaciones de las especies puede

contribuir a dirigir las actividades de pesca. Un ejemplo de esto es el conocimiento que presentan los pescadores de la zona de Santa Rosalía, Mulegé, Baja California Sur, sobre el jurel (*Seriola dorsalis* o *Seriola lalandi*) (Fig. 3).

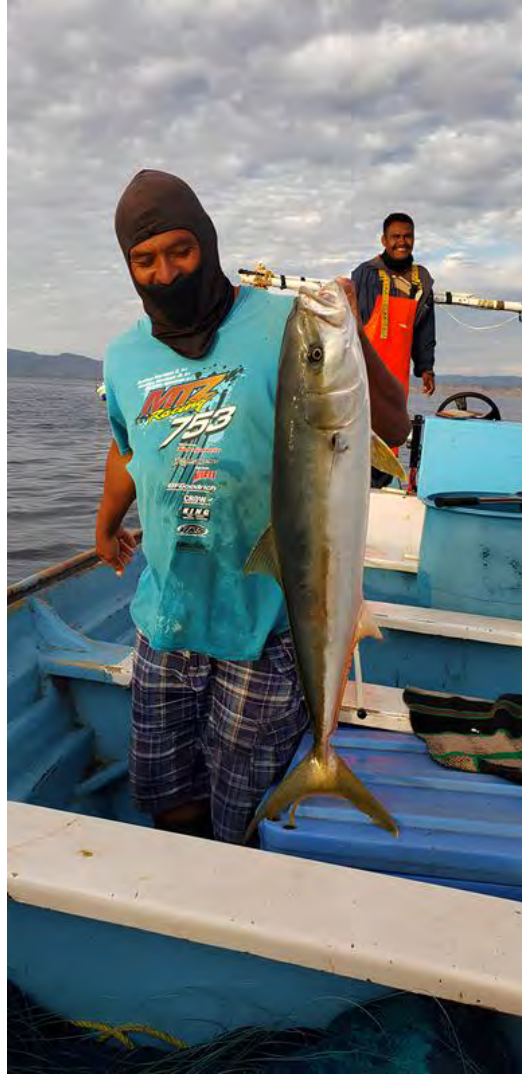


Figura 3. Jurel, *Seriola dorsalis*, capturado en Santa Rosalía, Baja California Sur.

Al inicio de la temporada de captura del jurel, en el mes de marzo, se emplean redes superficiales que se colocan en sitios donde se localizan los jureles, a profundidades de 2 brazas (aproximadamente 4 metros). Los pescadores han podido describir que en la localidad de Santa Rosalía el jurel es una especie de “corrida” ya que no está presente todo el año; que en marzo presentan huevos maduros, señal de que están por reproducirse; que viajan del sur de Santa Rosalía con dirección hacia el norte, hasta las islas de la Bahía de los Ángeles, en Baja California (Fig. 4),



donde desovan y empiezan a descender hacia el sur nuevamente en los meses de julio y agosto (G. Quezada, com. pers.).



Figura 4. Localización de la zona de Santa Rosalía (Baja California Sur) y Bahía de los Ángeles (Baja California) mostrando la dirección de la corrida del jurel en los meses de marzo (línea punteada).

En el periodo de la corrida de retorno a Santa Rosalía, los pescadores reportan que los primeros organismos en pasar son los de mayor tamaño, los adultos, y que los individuos de menor tamaño regresan en los meses de noviembre y diciembre. Además, el arte de pesca cambia en la temporada de julio-agosto, cuando la captura se hace por medio de líneas de mano o redes de fondo. En esta temporada, la temperatura superficial del mar es alta (de 27 a 29°C) y el jurel busca aguas más frías pasando frente a las costas de Santa Rosalía a mayor profundidad (G. Quezada, com. pers.).

El reconocimiento de este conocimiento empírico y su combinación con la investigación científica se ven reflejados en estudios sobre la reproducción del jurel. Con estos estudios se ha podido determinar el inicio de la temporada de desove en primavera-verano cuando las temperaturas del agua varían entre 15 y 23°C (Sala *et al.* 2003; Mechaly *et al.* 2025; Stuart y Drawbridge, 2025). Lo anterior coincide con las observaciones de los pescadores, quienes señalan que los organismos capturados en Santa Rosalía corresponden a individuos en migración hacia zonas más al norte de la península de Baja California, donde ocurre el desove.

Los pescadores han identificado una relación entre la presencia y/o ausencia de distintas especies marinas asociadas. Por ejemplo, en la zona de Santa Rosalía, la temporada de jurel comienza en el mes de marzo con la aparición del barrilete (*Euthynnus lineatus*) en las capturas, un recurso que no se aprovecha localmente debido a la calidad de su carne, y finaliza con la presencia de la bonita (*Sarda orientalis*), especie que indica que el jurel siguió su migración hacia el norte de la península de Baja California para desovar (G. Quezada, com. pers.). Por otra parte, la presencia de la corrida de las mantas cubanas (*Mobula munkiana*, *Mobula tarapacana*) indica el inicio de la corrida de diferentes especies de tiburones. Se estima que de 10 a 12 días después de la presencia de mantas cubanas, se observa la presencia del tiburón piloto (*Carcharhinus falciformis*) y posteriormente la presencia del tiburón coludo (*Alopias pelagicus*) (G. Quezada, com. pers.).

El conocimiento transmitido a través del tiempo ha permitido distinguir la estacionalidad de las especies en las zonas de pesca, como ocurre con el calamar (*Dosidicus gigas*; fig. 5). En Santa Rosalía, el registro histórico de la pesca del calamar inició en 1974. En los años 80's su captura era de gran importancia y reflejaba la alta abundancia del recurso; sin embargo, inesperadamente desapareció y dejó de ser una fuente de sustento. Esto fue atribuido a cambios en la temperatura del agua por el fenómeno climático de El Niño (Ehrhardt *et al.* 1986; Klett, 1996; Martínez-Aguilar *et al.* 2004).



Figura 5. Calamar gigante, *Dosidicus gigas*, capturado en la temporada 2025 en Santa Rosalía, Baja California Sur.



La pesca del calamar resurgió en los años 1995 a 1998, cuando se observó un patrón estacional bien marcado, localizándose en la región de Santa Rosalía durante los meses de verano (mayo a octubre) (Markaida y Sosa-Nishizaki, 2001). En esta época se registraron ejemplares de gran tamaño (hembras madurando a los 75 cm de longitud de manto (LM) y machos a los 53–67 cm LM) (Markaida y Sosa-Nishizaki, 2001). El calamar volvió a desaparecer después del evento climático de El Niño de 1997–1998 (Morales-Bojórquez *et al.*, 2001). Para el año 2003 se observó nuevamente la presencia de calamar en la zona; en ese año se registró una fase del fenómeno climático de El Niño (que, de hecho, inició desde noviembre de 2002) (Devis, 2003). En ese tiempo, se pescaron calamares con tallas de 34 a 88 cm de LM, y se reportó que las hembras maduraban cuando alcanzaban tallas entre los 69 y 77 cm LM y los machos entre 57 y 59 cm LM (Bazzino *et al.*, 2007). Los pescadores apreciaron la estacionalidad y la disminución en las tallas del calamar y el recurso se siguió aprovechando por su alto valor en el mercado, aún con tallas menores.

Actualmente, los pescadores han notado un nuevo aumento en la abundancia y tamaño del calamar. Su aparición empezó en el mes de abril del 2025, cuando se encontraron ejemplares de calamar durante la captura del jurel y cazón (nombre utilizado para referirse a tiburones de talla pequeña menores de 1.5 m de longitud total), y se registraron individuos de talla chica con peso de alrededor de 300 gramos. Para finales de julio y principios de agosto, los calamares capturados eran de mayor tamaño, llegando a pesar hasta 7 kilos con un tamaño aproximado de 150 cm (manto y tentáculos); los pescadores señalan que no habían capturado calamares de estos tamaños desde hace 12 años (G. Quezada, com. pers.). Esto se relaciona con una fase neutral del fenómeno climático El Niño, es decir, un periodo transitorio entre el evento El Niño y el establecimiento del fenómeno La Niña (Organización Meteorológica Mundial, 2025). Los registros que comparten los pescadores contribuyen a generar información en la serie de tiempo de la biología del calamar, resaltando la fuerte variabilidad interanual que se observa en relación con las variables ambientales que influyen en la distribución y abundancia de la especie.

Compartir e incorporar el conocimiento ecológico tradicional o ciencia empírica que poseen los pescadores con los resultados de la investigación científica, particularmente en relación con cuestiones como sobrepesca y cambio climático, es clave para la sostenibilidad de las especies marinas.

Saberes que se transmiten ... y también se pierden

El conocimiento que proviene de los pescadores no se aprende en libros, sino en las historias que se cuentan de generación en generación, a través de relatos compartidos en las faenas de trabajo, historias contadas por padres y abuelos, y prácticas repetidas en el mar hasta convertirse en habilidades cotidianas (Berkes, 1999). Un abuelo puede mostrar a su nieto cómo el color del agua revela la presencia de peces, o cómo el vuelo de las aves anuncia la cercanía de un cardumen. Un padre transmite a su hijo la importancia de observar las corrientes, de escuchar el viento, de reconocer los ciclos de la luna y las mareas. Estos aprendizajes, compartidos entre relatos, consejos prácticos y rituales colectivos, conforman lo que se conoce como conocimiento ecológico tradicional, una forma de ciencia empírica que ha permitido a los pescadores convivir y sostenerse del océano por generaciones (Berkes, 1999).

Sin embargo, este legado enfrenta amenazas que ponen en riesgo su continuidad. La migración de los jóvenes hacia ciudades en busca de empleos alternativos, los cambios en las dinámicas familiares, la presión de la pesca industrial y la disminución del interés de las nuevas generaciones por continuar con el oficio de los padres y abuelos, asociada también a la reducción en la rentabilidad de algunas pesquerías, son factores que interrumpen la transmisión de estos saberes y enseñanzas (de Sousa *et al.* 2022).

La pérdida de este conocimiento no sólo sería cultural, porque desaparece una forma única de entender el mundo marino, sino también ecológica, pues los pescadores han acumulado observaciones y prácticas que han favorecido un uso más sustentable de los recursos marinos durante siglos (Johannes, 1981; García-Dueñas *et al.* 2022).

Ante este panorama, han surgido distintas estrategias de conservación del conocimiento, como talleres comunitarios, programas escolares que integran el conocimiento local y proyectos de ciencia ciudadana que promueven la colaboración entre pescadores y científicos (Fernández-Rivera *et al.* 2024). En este sentido, preservar los recursos marinos significa también resguardar los conocimientos que los sostienen. Sin las historias, prácticas y saberes transmitidos de generación en generación, se pierde no sólo información útil para el manejo ecológico, sino también una manera de relacionarnos con el océano, una mirada singular para comprenderlo y cuidarlo de él.



Perspectivas y Consideraciones

Reconocer el conocimiento local y combinarlo con la investigación científica es un paso necesario para conservar nuestros mares y asegurar que las próximas generaciones sigan heredando los recursos, pero también las historias y enseñanzas del mar. Este diálogo entre el saber tradicional y la ciencia académica no solamente genera información más completa, sino que además facilita que las comunidades adopten medidas de manejo, como vedas temporales o zonas de refugio pesquero. Muchas de las observaciones presentadas por las comunidades de pescadores coinciden con hallazgos científicos sobre reproducción, migración y comportamiento de peces. Como lo reportado por DeCelles *et al.* (2017) al describir la distribución espacial y temporal del desove del bacalao en el Banco Georges, en el océano Atlántico, y revelando que los pescadores poseen un conocimiento detallado de la distribución espacial y temporal del período de desove, así como de las particularidades del hábitat del bacalao, lo que contribuyó a enriquecer el registro científico de esta especie.

La combinación de ambos conocimientos (científico y tradicional) es utilizado para el manejo de diferentes recursos pesqueros. Por ejemplo, los conocimientos tradicionales y, en particular los saberes tecno-productivos de pesca, resultaron de gran importancia en el Manejo Integrado de Zonas Costeras en Cuba (García-Dueñas *et al.* 2022), donde las acciones realizadas a partir de estos saberes resultaron importantes en función del desarrollo sostenible de dichas zonas costeras. Por su parte, en el Caribe Colombiano, los conocimientos ecológicos tradicionales de los pescadores Wayuu sobre tortugas marinas permitieron identificar zonas de alimentación, temporadas de mayor ocurrencia y sitios clave para su conservación, información que ayudó a cubrir vacíos de conocimiento y ayudaron a los investigadores en la gestión pesquera y la conservación de la biodiversidad en la zona (Vásquez-Carrillo y Peláez-Ossa, 2021). Otro caso similar se presentó en la gestión pesquera en Galicia, España, donde un mapeo participativo con la aplicación de cuestionarios a los pescadores aportó datos sobre las características sociales, técnicas y ecológicas de la pesquería del pulpo común *Octopus vulgaris*; ello contribuyó a mejorar las estrategias, regulaciones y procesos de supervisión garantizando la sostenibilidad ambiental de esta región económicamente importante en España (de Sousa *et al.* 2022).

Este diálogo entre ciencia académica y conocimiento ecológico tradicional no sólo mejora la comprensión de los ecosistemas, sino que también facilita la implementación de medidas de manejo sostenible, asegurando la preservación de recursos y saberes para las generaciones futuras.

“La ciencia no sólo está en los laboratorios; también se encuentra en las manos curtidas por el mar que leen el viento y las olas.”

Agradecimientos

A los pescadores del puerto de Santa Rosalía, Mulegé, Baja California Sur, en especial al pescador Gabriel Quezada Flores por la información proporcionada para la redacción del presente artículo.

Bibliografía

- Bazzino, G., C. Salinas-Zavala y U. Markaida. 2007. *Variability in the population structure of jumbo squid (Dosidicus gigas) in Santa Rosalía, central Gulf of California*. Ciencias Marinas 33(2): 173-186.
- Berkes, F. 1999. *Sacred Ecology: Traditional Ecological Knowledge and Resource Management*. Taylor & Francis, Philadelphia, USA. 203pp.
- DeCelles, G.R., D. Martins, D.R. Zemeckis y S.X. Cadrin. 2017. *Using Fishermen's Ecological Knowledge to map Atlantic cod spawning grounds on Georges Bank*. ICES Journal of Marine Science 74(6): 1587–1601.
- de Sousa, W.L., D.M. Zacardi, T.A. Vieira. 2022. *Traditional Ecological Knowledge of Fishermen: People Contributing towards Environmental Preservation*. Sustainability 14: 4899.
- Devis, A.M. 2003. *Evolución del evento El Niño 2002-2003 y efectos sobre la cuenca del Pacífico colombiana y la Bahía de Tumaco*. Boletín Científico CCCP 10: 15-30.
- DOF, 2020. *Programa Nacional de Pesca y Acuicultura 2020-2024*. En: [https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5609194&fecha=30/12/2020#gsc.ta](https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5609194&fecha=30/12/2020#gsc.tab=0) b=0 (consultado el 03/09/2025).



- Ehrhardt, N.M., N.A. Solis, P.S. Jaquemin, C.J. Ortiz, P. Ulloa, G. González, B.F. García, 1986. *Análisis de la biología y condiciones del stock del calamar gigante Dosidicus gigas en el Golfo de California, México, durante 1980*. Ciencia pesquera. (5):63-76
- FAO. 2023. *International Year of Artisanal Fisheries and Aquaculture 2022 – Final report*. Rome. En: <https://doi.org/10.4060/cc5034en> (consultado el 03/09/2025).
- Fernández-Rivera M.F., J. Torre, G.A. Cuevas-Gómez, I.G. Amador-Castro, M.A. Velázquez-Castillo y A. Espinoza-Tenorio. 2024. *Inheriting wisdom: transfer of traditional, scientific, and ecological knowledge in fishing communities in Mexico*. Frontiers in Sustainability 5: 1386259.
- Fulton, S., C. López-Sagástegui, A.H. Weaver, F. Fitzmaurice-Cahluni, C. Galindo, M.F. Fernández-Rivera, S. Yee, M.B. Ojeda-Villegas, D.A. Fuentes y E. Torres-Bahena. 2019. *Untapped Potential of Citizen Science in Mexican Small-Scale Fisheries*. Frontiers in Marine Science 6:517.
- García-Dueñas, R.Y., S.D. Soler-Marchán, M.E. Castellanos-González, y M. Morales-Calatayud, 2022. *Contribuciones desde la gestión del conocimiento tradicional a la implementación de la agenda 2030. Estudio de caso*. Revista Universidad y Sociedad 14(4): 138-155.
- Gluyas-Millán, M. G. y C. Quiñonez-Velázquez. 2022. *Pesca artesanal en México: contexto y realidades*. Ciencia pesquera 30(1-2): 97-117.
- IMIPAS, 2022. *Año Internacional de la Pesca y la Acuicultura Artesanales*. En: <https://www.gob.mx/imipas/es/articulos/ano-internacional-de-la-pesca-y-la-acuicultura-artesanales?idiom=es> (consultado el 28/08/2025).
- Johannes, R. E. 1981. *Words of the Lagoon: Fishing and Marine Lore in the Palau District of Micronesia*. University of California Press. Berkeley, California. 197 pp.
- Klett, T. A., 1996. Pesquería del calamar gigante *Dosidicus gigas*, In: Casas-Valdez, M., Ponce-Díaz, G., (Eds.), Estudio del potencial pesquero y acuícola de Baja California Sur, Vol. I. CIB-CICIMAR-UABCS. 127-149 p.
- Markaida, U. y O. Sosa-Nishizaki. 2001. *Reproductive biology of jumbo squid Dosidicus gigas in the Gulf of California, 1995–1997*. Fisheries Research 54(1): 63–82.

- Martínez-Aguilar, S., E. Morales-Bojórquez, J.G. Díaz-Urbe, M.C. Suárez-Higuera y A. Hernández-Herrera. 2004. *La Pesquería del Calamar Gigante (Dosidicus gigas) en el Golfo de California. Recomendaciones de Investigación y Tácticas de Regulación*. Comisión Nacional de Acuacultura y Pesca, Instituto Nacional de la Pesca, Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación. México. 77 pp.
- Mechaly, A. S., A. Elizur, S. Escobar-Aguirre, J. Hirt-Chabbert, R.B. Inohuye-Rivera, W. Knibb, J. Nocillado, J.C. Pérez-Urbiola, H.K.A. Premachandra, G.M. Somoza, D. Tovar-Ramírez y B. Wang. 2025. *Advances in Reproduction, Nutrition and Disease Research in the Yellowtail Kingfish (Seriola lalandi) Aquaculture*. Reviews in Aquaculture 17(3): e70034.
- Morales-Bojórquez, E., M.A. Cisneros-Mata, M.O. Nevárez-Martínez y A. Hernández-Herrera. 2001. *Review of stock assessment and fishery biology of Dosidicus gigas in the Gulf of California, Mexico*. Fisheries Research 54: 83–94.
- Organización Meteorológica Mundial. 2025. *El niño/La niña hoy. Boletín Febrero 2025*. En: <https://wmo.int/es/files/el-ninola-nina-hoy-febrero-de-2025> (consultado el 25/08/2025).
- Sala, E., O. Aburto-Oropeza, G. Paredes y G. Thompson. 2003. *Spawning aggregations and reproductive behavior of reef fishes in the Gulf of California*. Bulletin of Marine Science 72(1): 103-121.
- Silvano, R. A. M. y J. Valbo-Jørgensen. 2008. *Beyond fishermen's tales: contributions of fishers' local ecological knowledge to fish ecology and fisheries management*. Environment, Development and Sustainability 10:657-675.
- Stuart, K., y M. Drawbridge. 2025. *First controlled out of season spawning for California yellowtail (Seriola dorsalis)*. Aquaculture Reports 42: 102861.
- Vásquez-Carrillo, C. y M. Peláez-Ossa. 2021. *Insights into the ecology of sea turtles and the fisheries of eastern Guajira from the traditional knowledge of fishermen*. Fisheries Research 238: 105915.

**Cita**

Soto-López, K., D.A. Murillo-Cisneros, O. Lugo-Lugo y T. Zenteno-Savín. Saberes del mar: la ciencia en la pesca artesanal. Recursos Naturales y Sociedad, 2026. Vol. 12(1): 107-120. <https://doi.org/10.18846/renaysoc.2026.12.12.01.0007>

Sometido: 12 de septiembre de 2025

Aceptado: 18 de mayo de 2026

Editora asociada: Dra. Crisalejandra Rivera Pérez

Editora ejecutiva: Dra. Crisalejandra Rivera Pérez

Diseño gráfico editorial: Ing. Fca. Elizabeth Villegas Carrazco

Tilapia Consumption: How Safe Is It? An Exposure Study in Sonoran Reservoirs

Consumo de tilapia: ¿qué tan seguro es? Un estudio de exposición en presas de Sonora

Carolina León-Marín¹, Chrystian Mariana Rodríguez-Armenta¹, Christian Minjarez-Osorio¹,
Enrique De La Re-Vega¹, Martín Enrique Jara-Marini², Ángel Martínez-Durazo^{1*}

Resumen

Una de las principales causas por la que los humanos se encuentran expuestos al mercurio (Hg), es por el consumo de pescado contaminado con este metal. Sus principales riesgos se deben a su alta toxicidad, su persistencia en el medio ambiente, así como a su elevado factor de bioacumulación y biomagnificación, es decir, la manera en la se transfiere a través de las cadenas alimenticias hasta llegar a distintos organismos, particularmente a los peces. El consumo de pescado en Sonora ha crecido en los últimos años, debido a su accesibilidad y su alto valor nutricional. En particular, el consumo de tilapia ha aumentado como resultado del crecimiento de la acuicultura de la especie en el estado, impulsada tanto por el crecimiento en su producción como por los programas de repoblamiento. En los últimos años, las condiciones ambientales de los embalses de Sonora se han visto afectadas por las actividades humanas, lo que representa un riesgo ecológico y alimentario significativo para las comunidades que consumen especies locales. Los niveles de contaminación registrados indican una potencial amenaza para los consumidores de la región debido a la bioacumulación de metales en la cadena trófica, lo cual refleja la calidad del ambiente acuático local y los riesgos asociados al consumo frecuente de estos peces.

Palabras clave: Tilapia, mercurio, trama trófica, presas de Sonora.

¹ Departamento de Investigaciones Científicas y Tecnológicas, Universidad de Sonora, Hermosillo, Sonora, México.

² Centro de investigación en alimentación y Desarrollo, AC. Coordinación de Ciencias de los Alimentos.

* Autor de correspondencia: angel.martinez@unison.mx



Abstract

The consumption of fish contaminated with mercury (Hg) is considered a primary global exposure pathway for humans to this metal. Its principal risks stem from its high toxicity, environmental persistence, and significant bioaccumulation and biomagnification factors—the mechanisms by which it transfers through food chains to various organisms, particularly fish. In Sonora, fish consumption has increased in recent years due to its accessibility and high nutritional value. Specifically, Tilapia consumption has risen following the growth of regional aquaculture, driven by increased production and restocking programs. However, anthropogenic activities have degraded the environmental conditions of Sonora's reservoirs, posing a significant ecological and food safety risk to communities consuming local species. Recorded pollution levels indicate a potential threat to regional consumers due to the bioaccumulation of metals within the trophic web, reflecting the current quality of the local aquatic environment and the risks associated with the frequent consumption of these fish.

Key words: Tilapia, mercury, trophic web, Sonoran dams.

Introducción

El consumo de pescado contaminado con mercurio (Hg) es considerado, a nivel mundial, una de las principales rutas de exposición de los humanos a este metal. El mercurio se encuentra presente en el medio ambiente (aire, suelo, agua, sedimentos y biota), en diferentes cantidades y formas químicas. Sus principales riesgos se deben a su alta toxicidad, su persistencia en el medio ambiente, así como a su elevado factor de bioacumulación y biomagnificación, es decir, la manera en la se transfiere a través de las cadenas alimenticias hasta llegar a distintos organismos, particularmente a los peces (Kola et al. 2019).

El pescado contaminado con mercurio representa un riesgo importante para los consumidores humanos como los grupos de población vulnerables como mujeres embarazadas, lactantes, individuos con enfermedades crónico-degenerativas y dependientes de la pesca (Kola et al. 2019). Entre sus efectos adversos del mercurio se encuentran las afectaciones al sistema nervioso, cardiovascular, renal, digestivo, hematológico, pulmonar, inmunológico y endocrino, lo que puede provocar una amplia variedad de problemas graves de salud pública (Rice et al. 2014).

Por otro lado, el pescado es considerado un alimento altamente nutritivo debido a su aporte de proteínas de buena calidad, ácidos grasos esenciales, vitaminas y otros nutrientes (FAO, 2022). En México, el consumo per cápita anual de productos pesqueros alcanzó su punto máximo en 2017, con un registro de 13.1 kg, cifra menor que la media mundial de 20.2 kg, por lo que su consumo resulta fundamental en la dieta humana (FAO, 2022).

Específicamente, el consumo de pescado en Sonora ha crecido en los últimos años, debido a su accesibilidad y su alto valor nutricional. En particular, el consumo de tilapia ha aumentado como resultado del crecimiento de la acuicultura de la especie en el estado, impulsada tanto por el crecimiento en su producción como por los programas de repoblamiento.

En el año 2023, Sonora mantuvo su posición como líder nacional en acuicultura con una producción total de 96,282 toneladas, de las cuales 1200 toneladas correspondieron a la tilapia (CONAPESCA, 2023). El Instituto de Acuicultura del Estado de Sonora (IAES) reportó un aumento del 196% en la producción de crías de tilapia, alcanzando 1,351,285 ejemplares. De estos, el 19% fue destinado a engorda comercial mientras que el 81% se orientó al repoblamiento de presas en el marco de programas de pesca de subsistencia y mejora ambiental (SAGARHPA, 2024).

El valor nutricional de la tilapia ha sido ampliamente reconocido por autoridades sanitarias y alimenticias, no obstante, el incremento en su consumo y producción también implica retos sanitarios importantes. Uno de los principales riesgos es que la bioacumulación, que es el proceso de absorción y retención de contaminantes, tales como el mercurio, representa un riesgo si el consumo es constante y sobre todo en grupos poblacionales vulnerables (López-Ríos y Lechuga-Anaya, 2001). Además, diversas investigaciones han documentado la presencia de otros metales que también pueden bioacumularse a lo largo de la cadena trófica y afectar potencialmente la salud humana (Jara-Marini *et al.* 2020).

En los últimos años, las condiciones ambientales de los embalses de Sonora se han visto afectadas por las actividades humanas, lo que representa un riesgo ecológico y alimentario significativo para las comunidades. Esto se debe a la concentración de algunos metales reportada en algunos estudios (concentraciones de mercurio mayores a 0.001 mg/L, que es el límite normado, en aguas del Río Sonora y mayores a 0.5 mg/kg en filete de pez en algunas presas de la cuenca del Río Yaqui) y a la severa sequía que afecta al estado, (temperaturas elevadas propician altas tasas de evaporación y la falta de precipitaciones evita el efecto de dilución en las concentraciones de metales) (Martínez-Durazo, 2022; SEMARNAT, 2023). Ante este panorama, la implementación de



buenas prácticas acuícolas resulta fundamental para garantizar la inocuidad de los productos destinados al consumo humano.

La evaluación de mercurio en la tilapia (*Oreochromis niloticus*) debe de ser un objetivo prioritario para la salud pública en el estado de Sonora; si bien los niveles de mercurio en este pez son relativamente inofensivos (generalmente por debajo de los 0.5 mg kg^{-1}), se tiene que poner cuidado en áreas con alta incidencia de consumo de este pescado, especialmente en trabajadores pertenecientes al sector pesquero y acuícola, ya que son los que los consumen con mayor frecuencia. Los niveles de contaminación indican una potencial amenaza (concentraciones de mercurio que van desde los 0.001 hasta los 0.5 mg kg^{-1} de Hg total en filetes de tilapia, colectadas en presas de la cuenca del Río Yaqui) para los consumidores de la región debido a que se encuentran en el límite máximo permitido por la Secretaría de Salud (0.5 mg kg^{-1} de Hg total) y por el proceso de bioacumulación de metales en la cadena trófica, lo cual refleja la calidad del ambiente acuático (Norma Oficial Mexicana NOM-242-SSA1-2009, 2011; Balderrama-Carmona *et al.* 2019; Martínez-Durazo, 2022; León Marín, 2025).

Problemática de contaminación por metales en ecosistemas acuáticos

Debido a las actividades antropogénicas que se realizan alrededores de los ecosistemas acuáticos (lagunas, ríos, presas y lagos), éstos se encuentran bajo una presión por parte de las actividades humanas contaminantes cada vez mayor, (Ouma *et al.* 2022). Gran parte de los contaminantes generados por estas son emitidos y frecuentemente terminan en los cuerpos de agua, lo que indica que estos ecosistemas están acumulando y transfiriendo entre sus reservorios, provocando su deterioro y su funcionamiento (Bashir *et al.* 2020).

El mercurio, en particular, es un elemento que no posee una función biológica conocida y sus características químicas lo convierten en un elemento muy peligroso, incluso a concentraciones muy bajas (Tabla 1).

Tabla 1. Concentraciones de mercurio en algunos órganos de peces (modificado de Martínez-Durazo, 2022).

Metal	Tejido	Concentración (µg g ⁻¹)	Efecto	Referencia
Hg	Branquias	0.01	Fusión lamelar y necrosis	Suhendrayatna <i>et al.</i> (2019)
Hg	Gónada	15.01	Ovocitos atrésicos, hiperplasia	Zhang <i>et al.</i> (2016)
Hg	Hígado	1.24	Necrosis, picnosis, vacuolización	Brasco <i>et al.</i> (2012)

Generalmente, su destino final son los ecosistemas cercanos a los sitios donde se libera, aunque sus propiedades químicas le permiten viajar grandes distancias y depositarse en sitios tan lejanos como los casquetes polares (Bashir *et al.*, 2020).

Fuente de mercurio al ambiente

El Hg es un elemento distribuido en la naturaleza y puede provenir de distintos orígenes. Sus fuentes naturales son variadas e incluyen procesos como los incendios forestales, la volatilización de las superficies acuáticas, la meteorización mineral (proceso de desintegración de rocas y minerales) y de la corteza terrestre, así como distintos procesos geológicos como la actividad volcánica y geotérmica (Fig. 1) (Kolarova y Napiórkowski, 2021).

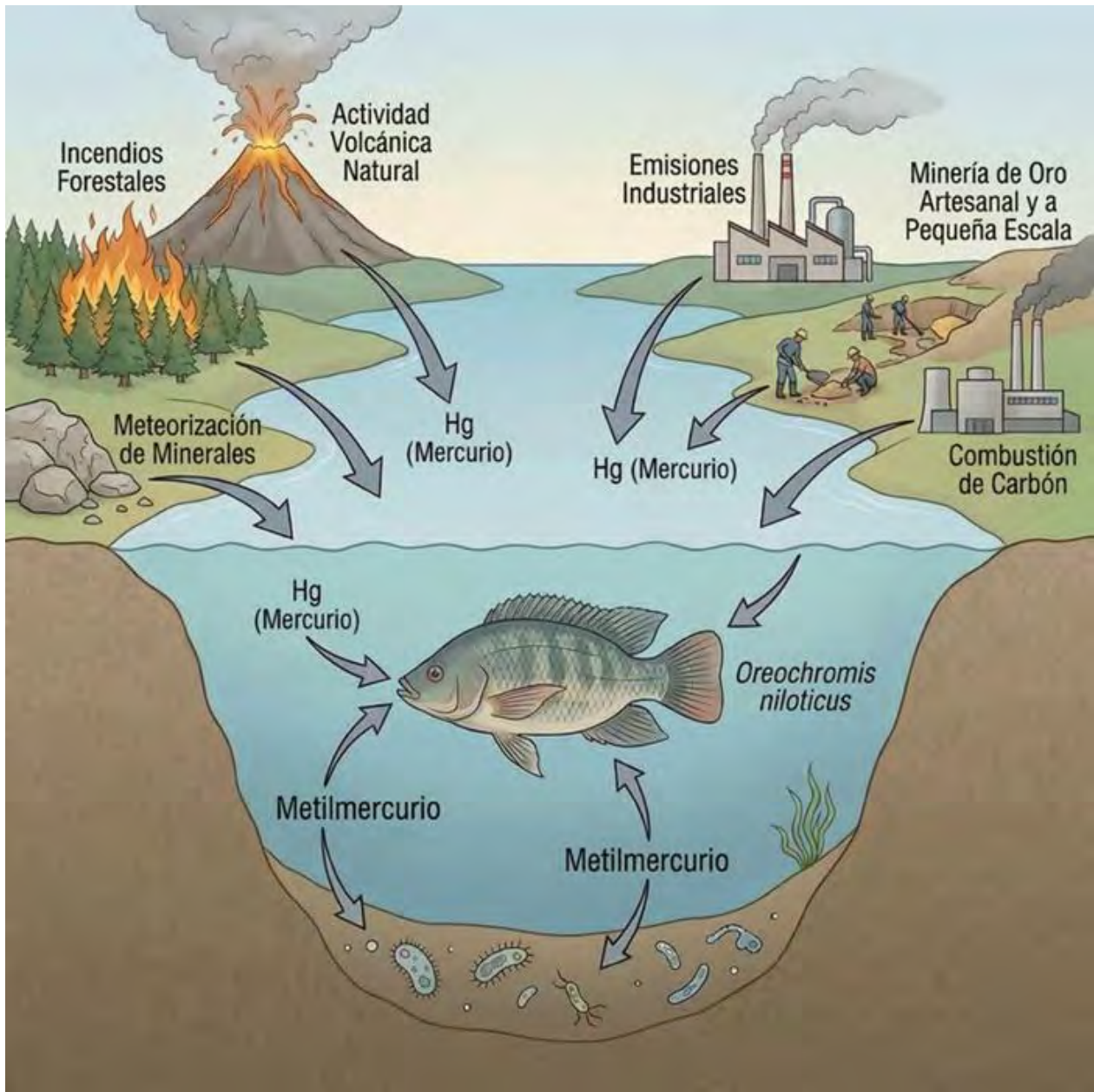


Figura 1. Fuentes de contaminación hacia los ecosistemas acuáticos que afectan a la tilapia, *O. niloticus*. Imagen generada con Arlist AI, 2026.

Dentro de las fuentes naturales de mercurio, los procesos geológicos desempeñan un papel importante en la liberación de este elemento hacia el ambiente, siendo los responsables de aproximadamente entre el 10 y el 30% del aporte total en el planeta tierra (Viana *et al.*, 2021); mientras que los volcanes y la geotermia generan aproximadamente el 50% de los aportes, siendo las erupciones violentas las responsables de liberar grandes cantidades de este elemento (Fig. 2).

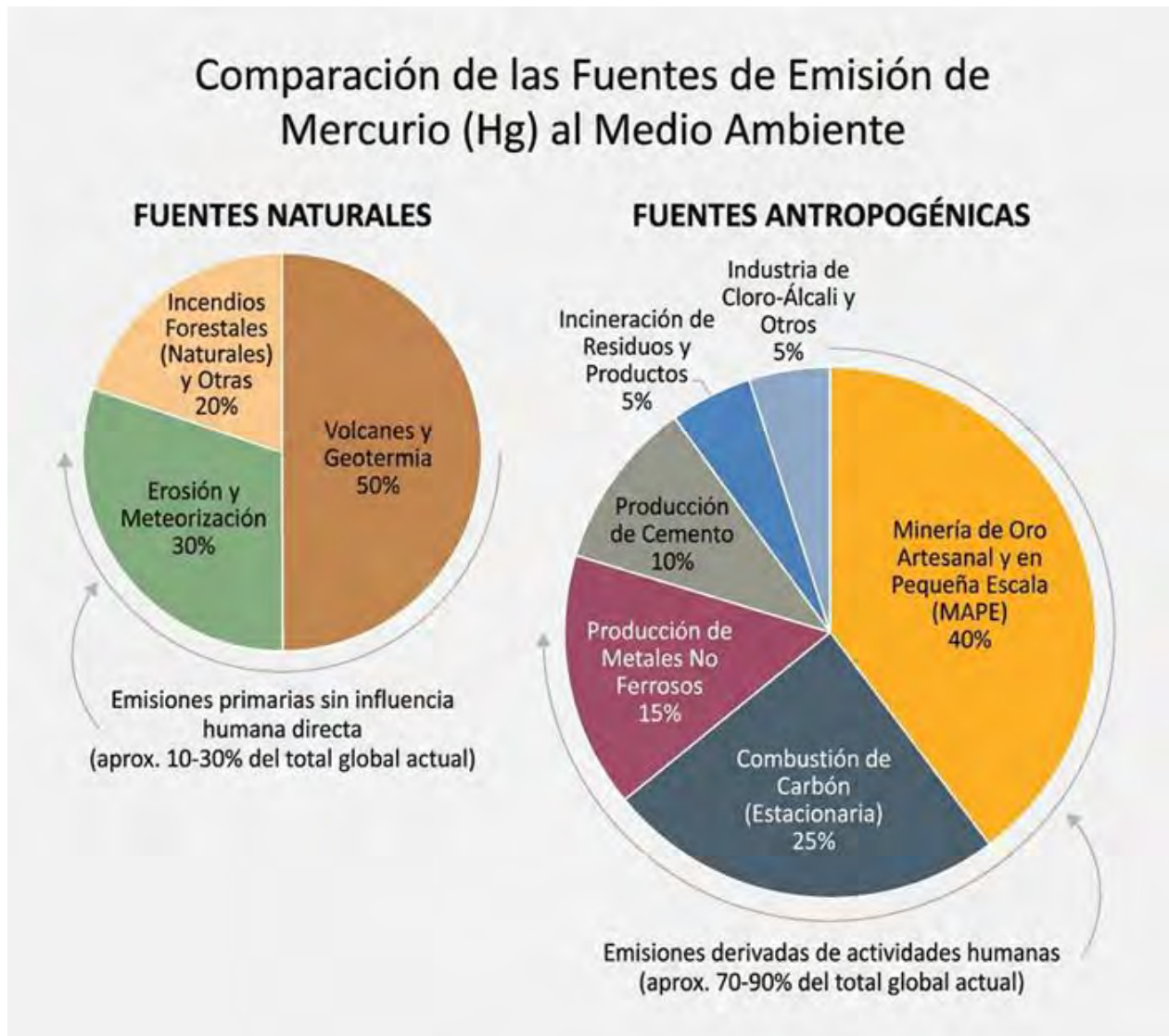


Figura 2. Actividades antropogénicas y naturales que aportan mercurio hacia el medio ambiente. Imagen generada con Arlist AI, 2026.

Los procesos de meteorización que ocurren en la corteza terrestre aportan aproximadamente el 30% del mercurio liberado al ambiente. A pesar de tratarse de un fenómeno natural, es una de las fuentes más relevantes de contaminación ambiental en las cuencas hidrológicas. Esto se debe a que los minerales presentes en estas matrices pueden liberarse con facilidad hacia el medio ambiente ante cambios mínimos de pH (James *et al.* 2020).

En contraste, las actividades antropogénicas son actualmente las que más contribuyen a la liberación de mercurio hacia el ambiente. En Sonora, la minería de oro artesanal, mejor conocida



como gambusinaje, libera 924 g/día por cada municipio en el que se lleva a cabo esta actividad, siendo 44 municipios los que producen este metal por medio de dicho método (INECC, 2021). La falta de control y de un manejo adecuado de los residuos provoca que estos terminen, en muchos casos, en los ecosistemas cercanos, generando un volumen considerable de contaminación metálica (Zhou *et al.* 2025).

En las últimas décadas, la presencia de mercurio de origen antropogénico ha aumentado significativamente (entre el 50 y 75% de las emisiones totales provienen de actividades humanas), alcanzando niveles aproximadamente 4.5 veces mayores que los aportes provenientes de fuentes naturales (Piro *et al.* 2023). Las actividades humanas que mayormente aportan este contaminante hacia la naturaleza son la producción de oro artesanal, cloro-álcali, cemento, metales, combustión de carbón para la generación de energía eléctrica, incineración de diversos productos, entre otras (Fig. 2).

Especiación química del mercurio

El mercurio posee un alto potencial tóxico debido a su capacidad de transformarse en distintas formas químicas, que son altamente reactivas en los organismos, interfiriendo en diversos procesos metabólicos (Piro *et al.* 2023). Esta característica lo convierte en un elemento altamente dinámico en los ecosistemas acuáticos, donde puede interactuar de diversas maneras y afectar a los organismos que habitan en ellos (Clarkson y Magos, 2006). Cabe señalar que, el término especiación química se refiere a las diferentes formas químicas en que el mercurio puede existir en el ambiente acuático, ya sea en estado elemental, inorgánico u orgánico. Cada una de estas especies presentan comportamientos químicos diferentes y, en consecuencia, distintos niveles de potencial tóxico (Fig.3) (Zhou *et al.* 2025).

Diagrama de la Especiación del Mercurio (Hg) en Ecosistemas Acuáticos

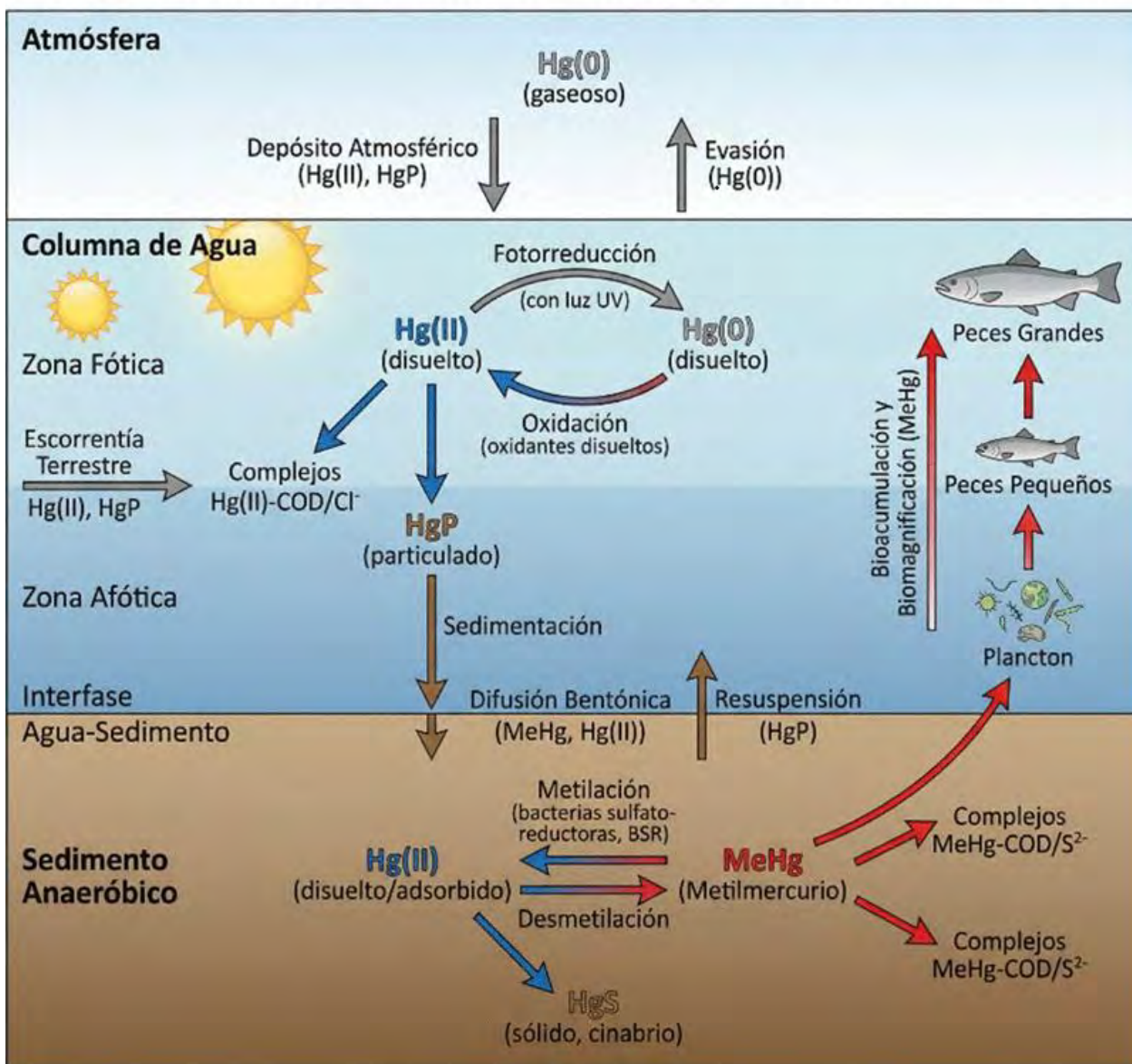


Figura 3. Procesos de especiación química del mercurio (Hg) en los ecosistemas acuáticos. Imagen generada con Arlist AI, 2026.

El mercurio elemental (Hg^0) es volátil y puede ser transportado a través de la atmósfera, mientras que el mercurio inorgánico (Hg^{2+}) y orgánico como el metil-mercurio (CH_3Hg^+) y etil-mercurio ($\text{C}_2\text{H}_5\text{Hg}$), presentan una mayor solubilidad en agua (Fig. 3). El mercurio elemental (Hg^0) es relativamente inerte y presenta una baja solubilidad en agua. Sin embargo, cómo puede ser oxidado a mercurio inorgánico (Hg^{2+}) en condiciones oxigenadas, especialmente en presencia de compuestos fotoquímicos y agentes oxidantes, su volatilidad facilita el transporte atmosférico,



además su deposición en cuerpos de agua se facilita a través de la lluvia, pudiéndolo transportar hacia áreas bastante alejadas de las fuentes de emisión (Ullrich *et al.* 2001).

A su vez, el mercurio inorgánico (Hg^{2+}) es la forma más comúnmente detectada en cuerpos de agua, y su comportamiento químico está fuertemente influenciado por la formación de complejos con ligandos inorgánicos como cloruros, sulfatos, tiosulfatos y acetatos (Fig. 3). Estas interacciones determinan su solubilidad, movilidad y biodisponibilidad. Entre las formas solubles más relevantes se encuentran el cloruro de mercurio (HgCl_2), nitrato de mercurio ($\text{Hg}(\text{NO}_3)_2$), sulfato de mercurio (HgSO_4), acetato de mercurio ($\text{Hg}(\text{CH}_3\text{COO})_2$) y tiosulfato de mercurio ($\text{Hg}(\text{SCN})_2$), todas con diferentes grados de solubilidad en agua y reactividad ambiental (Berlín *et al.*, 2015). Estas especies pueden participar en procesos de transformación microbiana y química, que convierte el mercurio inorgánico (Hg^{2+}) en formas orgánicas más tóxicas como el metil-mercurio (CH_3Hg^+) (Hintelmann y Evans, 1997).

Los ligandos naturales como la materia orgánica disuelta (MOD) y aniones como los cloruros, forman complejos con Hg^{2+} que alteran su biodisponibilidad y toxicidad (Ullrich *et al.* 2001). Finalmente, las bacterias sulfato-reductoras son claves en la metilación (proceso por el cual las bacterias de los fondos acuáticos agregan un grupo metilo al mercurio) del Hg^{2+} ya que utilizan sulfatos como receptores de electrones en condiciones anóxicas (Canham *et al.*, 2021). Durante este proceso biológico se incrementa significativamente la formación de metilmercurio (CH_3Hg^+) en los sedimentos acuáticos, especialmente en ambientes ricos en materia orgánica y bajos en oxígeno (Benoit *et al.* 1999).

Es importante señalar que la especiación del mercurio depende de factores como el pH, el potencial oxido reducción (proceso por el cual los elementos ganan o pierden electrones), la temperatura, y la presencia de materia orgánica disuelta, así como de factores biológicos como la especie, hábitos alimenticios, posición trófica y nicho ecológico. Todos estos elementos determinan de manera directa su nivel de toxicidad y su potencial de bioacumulación y biomagnificación en los organismos (Berlín *et al.* 2015).

Dinámica del mercurio en los ecosistemas acuáticos

Las principales transformaciones químicas del mercurio comienzan a ocurrir en la columna de agua, una vez que este metal entra en contacto con los distintos compuestos químicos e interactúan con las condiciones físicas del medio (Fig. 4). Esto permite que, en algunos casos, aumente la

disponibilidad del mercurio y se mantenga en formas accesibles para los organismos. Por otro lado, los sedimentos, tanto superficiales como profundos, actúan como depósitos finales de estos elementos (Fig.4). No obstante, podrían convertirse en fuentes importantes de liberación, dependiendo de procesos fisicoquímicos como la especiación química, pH, temperatura, resuspensión sedimentaria y potencial oxido reducción (Viana *et al.* 2021).



Figura 4. Dinámica del Mercurio en ecosistemas acuáticos. Tomado de León- Marin, 2025.

En los ecosistemas acuáticos, el mercurio posee una alta estabilidad química, lo cual le permite permanecer por un tiempo prolongado lo que favorece su acumulación y magnificación en las cadenas tróficas (Viana *et al.* 2021). Esta estabilidad (denominada persistencia) dificulta su degradación biológica, lo cual lo convierte en un contaminante sumamente peligroso (Cadavid-Muñoz *et al.* 2020; Viana *et al.* 2021).

Las descargas de residuos industriales y domésticos hacia los ecosistemas acuáticos han provocado impactos severos, tanto para el medio ambiente como para la salud humana. Un ejemplo emblemático de esta problemática es la contaminación de la Bahía de Minamata en Japón, donde durante años se vertieron grandes cantidades de desechos con altas concentraciones de mercurio. Esta situación generó una serie de afecciones a la salud de la población local, con repercusiones especialmente severas en adultos mayores, niños y mujeres embarazadas, (Harada *et al.* 1999; James *et al.* 2020).



La tilapia y el mercurio ¿Cuáles son los efectos sobre la especie?

Las tilapias son peces de hábitos alimenticios omnívoros, es decir, tienen una amplia gama de alimentos, lo cual los convierte en organismos clave para la transferencia de energía dentro de las tramas tróficas de los ecosistemas acuáticos, ya que su gran capacidad de adaptación les permite aprovechar una amplia variedad de fuentes de alimento. Debido a ello, las tilapias pueden exponerse al mercurio en sus distintas formas químicas, lo cual las convierte en importantes vectores de contaminación al transferir este metal hacia los niveles tróficos superiores. Particularmente, en la tilapia, la acumulación del mercurio sigue un patrón particular, ya que por lo general se tiende a acumular de manera decreciente en el hígado, las branquias, el estómago, las gónadas y finalmente en el tejido muscular. Este último es especialmente relevante, ya que es la parte del pez que es consumida por el ser humano (Martínez-Durazo *et al.* 2020).

La acumulación selectiva de metales en los tejidos de las tilapias está determinada por las características biológicas de los mismos. Por ejemplo, el hígado es el tejido en el cual se llevan a cabo todas las transformaciones bioquímicas de los contaminantes en los organismos vertebrados, razón por lo cual suele concentrar metales en grandes cantidades. Por otro lado, las branquias al ser las estructuras respiratorias de los peces, pueden acumular metales como el mercurio que se encuentren en forma soluble en la columna de agua y, de esta manera, acumularlos en el resto de sus órganos internos. Es por lo anterior que las branquias suelen ser consideradas un órgano indicador de la contaminación en los ecosistemas acuáticos. Por su parte, el estómago tiende a acumular metales provenientes del contenido alimenticio, reflejando de esta manera la concentración presente en los alimentos consumidos. Es importante mencionar que esta vía de exposición es la más relevante en los organismos, ya que tiene una relación directa con la dinámica trófica de las especies, por lo que se considera un reflejo importante de los procesos de bioacumulación y biomagnificación.

Las gónadas, por su parte, son los órganos reproductores encargados de producir las células sexuales o gametos. Se trata de estructuras de vital importancia para los seres vivos, ya que garantizan la perpetuación de las especies, así como su éxito biológico. Es importante señalar que las gónadas contienen una concentración considerable de lípidos, lo que facilita que metales como el mercurio se acumulen en ellas con mayor facilidad debido a su gran afinidad por este tipo de compuestos.

Finalmente, el músculo es el tejido en donde se acumula la menor cantidad de metales, incluyendo el mercurio. Esto ocurre porque el organismo cuenta con mecanismos naturales de defensa como el hígado y los riñones, los cuales se encargan tanto de transformar las sustancias como de eliminarlas. Gracias a este proceso, la concentración de metales en músculo suele ser baja, en comparación con el hígado y, en condiciones normales, no representa un problema importante (las concentraciones de metales suelen ser de 6 a 10 veces mayores en el hígado en comparación con el músculo, dependiendo de la especie y del grado de contaminación) (Rossi, 2026). Sin embargo, cuando existen escenarios de contaminación muy severos en los ecosistemas, en donde las concentraciones en el agua son muy altas (mayores a 0.001 mg/L), la capacidad de detoxificación de los organismos puede verse comprometida. En estos casos, los metales pueden empezar a acumularse en mayor cantidad y superar los límites máximos permisibles en el filete que se consume.

Caso de estudio: Contenido de mercurio en la tilapia de las presas del Río Yaqui

Se llevo a cabo un estudio para evaluar los efectos de los metales en tilapias colectadas en las presas La Angostura, El Cajón de Onapa y El Oviachic que pertenecen a la cuenca del Río Yaqui. En dicho estudio, se colectaron alrededor de 180 ejemplares de tilapia, *O. niloticus*, en dos épocas climáticas contrastante (secas y lluvias). A los organismos colectados, se les determinaron sus datos biométricos (longitud total, peso total, sexo, edad), con la finalidad de establecer su condición biológica. Los organismos fueron sacrificados de acuerdo con los estándares internacionales y disectados de los distintos órganos (branquias, estómagos, gónadas, hígados y músculos) para su posterior análisis de metales. Los músculos fueron liofilizados, pulverizados, pesados (0.250 ± 0.003 g) y digeridos con ácido nítrico concentrado (HNO_3 al 68%). La determinación de mercurio se llevó a cabo en los músculos mediante espectrofotometría de absorción atómica mediante el método de generador de vapor e hidruros. Los límites de detección estimados fueron de $\text{Hg} = 0.83 \mu\text{g g}^{-1}$. Los datos obtenidos se utilizaron para hacer el cálculo del riesgo aparente en las poblaciones aledañas (Martínez-Durazo, 2022; Martínez-Durazo *et al.* 2023; León-Marín, 2025).

Los resultados revelaron que los niveles de mercurio presentan variaciones asociadas tanto a la temporada del año como a la zona de muestreo. La temporada de lluvias mostró las concentraciones más elevadas en comparación con la temporada seca. Mientras que El Oviachic presentó los valores promedio más altos ($0.21 \pm 0.10 \text{ mg kg}^{-1}$ en temporada de lluvias y $0.10 \pm 0.02 \text{ mg kg}^{-1}$ en temporada seca). En la presa El Cajón de Onapa, las concentraciones se mantuvieron estables entre temporadas ($0.16 \pm 0.07 \text{ mg kg}^{-1}$ en temporada de lluvias y $0.15 \pm 0.07 \text{ mg kg}^{-1}$ en



temporada seca). Por el contrario, en la presa La Angostura se observó un patrón inverso, con valores superiores en la temporada seca ($0.15 \pm 0.10 \text{ mg kg}^{-1}$), respecto a la temporada de lluvias ($0.09 \pm 0.01 \text{ mg kg}^{-1}$). Estos resultados indican que tanto las características propias de cada ecosistema como la época del año influyen de manera diferente en la bioacumulación de mercurio en la tilapia (León-Marín, 2025). A pesar de las fluctuaciones, los niveles de mercurio registrados en todos los casos se mantuvieron por debajo del límite permitido de 0.5 mg kg^{-1} establecido por la NOM-027-SSA01-1993 lo que sugiere que el consumo ocasional de tilapia no representa un daño para la salud. Sin embargo, se detectaron organismos que tuvieron concentración en el límite máximo permisible, por lo que los monitoreos deben de ser permanentes en estos cuerpos de agua.

Riesgos para la salud humana

El consumo de pescado contaminado con mercurio resulta especialmente peligroso para mujeres embarazadas, lactantes y niños, debido a que este metal puede afectar el desarrollo del sistema nervioso. En adultos, la exposición al mercurio se ha asociado con la aparición de trastornos neurológicos, cardiovasculares y renales. Sin embargo, estos efectos no se manifiestan de la misma forma en todas las personas, ya que están condicionados por factores biológicos, sociales, ambientales y estructurales. Por esta razón, su estudio y evaluación requieren un enfoque interdisciplinario (Palma-Yrigoyen y Flores-Pacherres, 2024).

Por otro lado, la población femenina presenta una alta vulnerabilidad a los efectos provocados por consumir pescado contaminado y este fenómeno se explica en gran parte por razones fisiológicas. El mercurio es capaz de atravesar la barrera placentaria, además de ser excretado a través de la leche materna, afectando directamente al feto y al lactante en etapas clave del desarrollo neurológico (Bank-Nielsen *et al.* 2019; James *et al.* 2020). Adicionalmente, se ha observado que las concentraciones de mercurio en la sangre del cordón umbilical pueden alcanzar valores superiores a los de la sangre de la madre, generando riesgos de déficits cognitivos, disfunciones motoras y retraso en el desarrollo neurosensorial (OPS, 2024).

Adicionalmente, el riesgo al que están expuestas las mujeres es aún mayor debido a factores sociales y laborales. Esto es especialmente evidente en regiones donde se práctica la minería artesanal y de pequeña escala, ya que en estos contextos las mujeres participan directamente en actividades como amalgamación, así como la quema y manipulación mineral. A ello se suma el hecho de que con frecuencia habitan en comunidades cercanas a las zonas productivas, lo que incrementa su exposición al mercurio (Palma-Yrigoyen y Flores-Pacherres, 2024). Esta situación se

intensifica en comunidades ribereñas o rurales, donde el consumo de pescado constituye una parte fundamental e incluso casi exclusiva, de la dieta cotidiana. Orduño-Parra *et al.* (2025), estimó un rango de frecuencia de consumo de los pobladores cercanos a dos presas del Río Sonora donde la frecuencia de consumo aumenta (consumen hasta cuatro veces pescado por semana) cuando es temporada de pesca. La exposición prolongada al mercurio a través de esta vía se ha asociado con diversos efectos adversos en la salud reproductiva, incluyendo abortos espontáneos, partos prematuros y alteraciones en el eje endocrino (Barone *et al.* 2021; Gimenes *et al.* 2021).

Los niños representan un grupo poblacional vulnerable a los efectos del mercurio, siendo el sistema nervioso en desarrollo especialmente susceptible a sus efectos neurotóxicos de los metales. Se estima que más de 600,000 recién nacidos al año se encuentran expuestos a niveles intrauterinos superiores a los valores considerados como seguros ($0.1 \mu\text{g g}^{-1}/\text{kg}/\text{día}$ de metilmercurio, lo que equivale a $5.8 \mu\text{g/L}$ de Hg total en sangre) (Grandjean *et al.* 2014; Ruggieri *et al.* 2017). Algunos estudios históricos como los casos de Minamata (Japón) y Nueva Zelanda han documentado efectos como parálisis cerebral, ceguera, microcefalia y otras secuelas graves en recién nacidos cuyas madres consumieron pescado contaminado por mercurio durante la gestación (Llop *et al.* 2013). A lo anterior, se suman condiciones de precariedad nutricional en zonas mineras, como anemia, malnutrición y parasitismo infantil, lo que puede presentar un efecto sinérgico o bien, enmascarar los efectos del mercurio (Monrroy y Benefice, 2007).

De igual manera, los mayores riesgos asociados al consumo se presentan en las personas que lo ingieren de forma frecuente (más de tres veces por semana). Aunque este grupo no necesariamente se considera una población vulnerable desde el punto de vista clínico o estructural, si constituye un sector prioritario en las estrategias de vigilancia sanitaria, debido a que el pescado representa la principal vía de exposición al mercurio en seres humanos (Gimenes *et al.* 2021).



Consideraciones especiales y perspectivas a futuro

La problemática de contaminación de las cuencas de Sonora y en particular en los reservorios de agua dulce para consumo humano, es un problema que ha sido abordado desde distintos ángulos y por especialistas de distintas áreas. A pesar de los esfuerzos realizados, aun no se ha logrado una solución definitiva que permita garantizar la calidad ambiental de estos.

El consumo de pescado contaminado por mercurio o cualquier otro metal y/o metaloide, representa un riesgo de importancia toxicológica, no solo para los seres humanos, sino también para el conjunto de organismos que habitan estos ecosistemas. La dinámica de bioacumulación y biomagnificación de este tipo de contaminantes suele afectar a varios grupos biológicos, alterando procesos ecológicos y, en consecuencia, el equilibrio natural de los ambientes acuáticos.

En México, existen instituciones gubernamentales encargadas de monitorear la presencia de metales y metaloides en cuerpos de agua y en alimentos. Sin embargo, en muchas ocasiones los recursos económicos son limitados y los programas de vigilancia no se llevan a cabo de manera constante en todos los ecosistemas. Como consecuencia, las poblaciones que habitan en zonas aledañas a estos reservorios pueden encontrarse expuestas de forma prolongada a contaminantes, lo que incrementa el riesgo a desarrollar enfermedades crónicas o crónico-degenerativas.

Por lo anterior, resulta fundamental fortalecer y ampliar los programas de monitoreo ambiental, con el fin de establecer concentraciones seguras de metales en los productos provenientes de las presas del Río Yaqui y, en general, del estado de Sonora.

Conclusión

La presencia de mercurio en las presas de la cuenca del Río Yaqui representa un problema latente que requiere atención desde el ámbito tanto científico como social. Si bien, los niveles actuales de mercurio en la tilapia no superan los límites permisibles establecidos o se encuentran en el límite máximo por la normativa para peces, resulta fundamental mantener programas de monitoreo continuo para garantizar la seguridad alimentaria de las comunidades locales, ya que solo mediante la generación de información y la implementación de medidas preventivas será posible mitigar el impacto de este contaminante en la salud pública.

En la cuenca del Río Yaqui, se localizan diversas fuentes potenciales de contaminación que aportan metales hacia los ecosistemas acuáticos. Estos aportes varían de acuerdo con la localidad y están estrechamente relacionados con las actividades económicas que se desarrollan en cada zona. Un ejemplo de ello es la presa La Angostura, situada dentro del distrito minero de Nacozari de García, uno de los yacimientos de cobre más importantes a nivel mundial. La posible liberación de mercurio asociada a este tipo de actividades mineras representa un factor de relevancia toxicológica que debe ser considerado en los esfuerzos de gestión ambiental y de protección a la salud.

Sin embargo, es importante recalcar que, al menos en las tres presas en las que se realizó el estudio, los valores promedio se encuentran por debajo de los límites máximos permisibles establecidos por la secretaría de salud. Si bien hay que valorar todos los factores que influye en el cálculo del riesgo asociado al consumo, los trabajos de monitoreo se tendrían que seguir llevando a cabo en toda la zona.

Bibliografía

- Balderrama-Carmona, A.P. Bisher-Álvarez, N.P. Silva-Beltrán, P. Ayala-Parra A. Ortega-Fonseca F.X. 2019. *Estimación del riesgo a la salud por consumo de Oreochromis niloticus, agua de grifo, agua superficial y sedimentos de presa, contaminados con metales pesados en comunidades cercanas a una mina de cobre y a la presa Adolfo Ruiz Cortines, Sonora, México*. Revista BioCiencias. 6(12): 26-36.
- Bank-Nielsen, P.I., Long, M. Bonefeld-Jørgensen, E.C. 2019. *Pregnant Inuit women's exposure to metals and association with fetal growth outcomes*. International Journal of Environmental Research and Public Health. 16(7): 1-7
- Barone, G. Storelli, A. Meleleo, D. Dambrosio, A. Garofalo, R. Busco A. Storelli, M.M. 2021. *Levels of mercury, methylmercury and selenium in fish: Insights into children food safety*. Toxics. 9(2): 1-14
- Bashir, I. Lone, F.A. Bhat, R.A. Mir, S.A. Dar Z.A. Dar, S.A. 2020. *Concerns and threats of contamination on aquatic ecosystems*. Bioremediation and biotechnology. Springer. 1-26.
- Benoit, J. Gilmour, C. Mason, R. Heyes, A. 1999. *Sulfide controls on mercury speciation and bioavailability to methylating bacteria in sediment pore waters*. Environmental Science and Technology. 33(6): 951-957.



- Berlín, M. Zalups, R.K. Fowler, B.A. 2015. *Toxicology of mercury*. En: Nordberg, G.F., Fowler, B.A., Nordberg, M. y Friberg, L.T. (eds.), *Handbook on the toxicology of metals*, 4(2): 1013–1075.
- Branco V, Ramos P, Canário J, Lu J, Holmgren A, Carvalho C. (2012). *Biomarkers of adverse response to mercury: histopathology versus thioredoxin reductase activity*. J Biomed Biotechnol; 2012:359879. doi: 10.1155/2012/359879. Epub 2012 Jul 19. PMID: 22888199; PMCID: PMC3408678.
- Brisna Paola Orduño-Parra, Trinidad Quizán-Plata, Graciela Caire-Juvera, Jaqueline García-Hernández & Martín Enrique Jara-Marini (29 Jul 2025): *Metal concentration in tilapia (*Oreochromis niloticus*) and largemouth bass (*Micropterus salmoides*) and the associated consumption risk for populations around two dams in northwestern Mexico*, International Journal of Environmental Health Research, DOI: 10.1080/09603123.2025.2538507
- Cadavid-Muñoz, N. Arango-Ruiz, A. 2020. *El mercurio como contaminante y factor de riesgo para la salud humana*. Revista Lasallista de Investigación. 17(2): 280-296.
- Canham, R. González-Prieto, A.M. Elliott, J.E. 2021. *Mercury exposure and toxicological consequences in fish and fish-eating wildlife from anthropogenic activity in Latin America*. Integrated Environmental Assessment and Management. 17(1): 13–26.
- Clarkson, T.W. Magos, L. 2006. *The toxicology of mercury and its chemical compounds*. Critical Reviews in Toxicology. 36(8): 609–662.
- Comisión Nacional de Acuacultura y Pesca (CONAPESCA). 2023. *Anuario estadístico de acuacultura y pesca 2023*.
- Gimenes, T. C. Penteado, J.O. Dos Santos, M. Da Silva-Júnior, F.M.A. 2021. *Methylmercury in fish from the Amazon regional review focused on eating habits*. Water, Air, and Soil Pollution. 232(5): 178.
- Grandjean, P., Weihe, P. Debes, F. Choi A.L. Budtz-Jorgensen, E. 2014. *Neurotoxicity from prenatal and postnatal exposure to methylmercury*. Neurotoxicology and Teratology 43: 5–12.
- Häder, D.P. Banaszak, A.T. Villafañe, V.E. Narvarte, M.A. González, R.A. Helbling, E.W. 2020. *Anthropogenic pollution of aquatic ecosystems: Emerging problems with global implications*. Science of the Total Environment. 15(713): 1-7.

- Hintelmann, H. Evans, R.D. 1997. *Aplicación de isótopos estables en estudios de trazadores ambientales: medición de monometilmercurio (CH_3Hg^+) mediante dilución de isótopos ICP-MS y detección de transformación de especies*. Fresenius Journal of Analytical Chemistry. 358(1): 378–385.
- INECC. (2021). *Determinación de la meteorología y transporte de contaminantes en el aire en sitios con minería de oro artesanal y a pequeña escala en México. Informe Final*. Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático; Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.
- James, A.K. Nehzati, S. Dolgova, N.V. Sokaras, D. Kroll, T. Eto, K. O'Donoghue, J.L. Watson, G.E. Myers, G.J. Krone, P.H. Pickering, I.J. George, G.N. 2020. *Rethinking the Minamata tragedy: What mercury species was really responsible?* Environmental Science and Technology. 54(5): 2726–2733.
- Jara-Marini, M.E. Molina-García, A. Martínez-Durazo, A. Páez-Osuna, F. 2020. Trace metal trophic transference and biomagnification in a semiarid coastal lagoon impacted by agriculture and shrimp aquaculture. Environmental Science and Pollution Research 27(5): 5323–5336.
- Jeong, H. Ali, W. Zinck, P. Souissi, S. Lee, J.S. 2024. *Toxicity of methylmercury in aquatic organisms and interaction with environmental factors and coexisting pollutants: A review*. Science of the Total Environment. 15(943): 1-14.
- Kola, S. Kanja, L.W. Mbaria, J.M. Maina, J.G. Okumu, M.O. 2019. *Levels of mercury in Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*), water, and sediment in the Migori gold mining belt, Kenya, and the potential ramifications to human health*. Food Research. 8(1): 1244-1249.
- Kolarova, N. Napiórkowski, P. 2021. *Trace elements in aquatic environment: Origin, distribution, assessment and toxicity effect for the aquatic biota*. Ecohydrology and Hydrobiology. 21 (4): 655–668.
- León-Marín, C. 2025. *Contenido de Mercurio (Hg) y riesgo a la salud femenina asociado al consumo de tilapia proveniente de tres presas de la cuenca del Río Yaqui*. Tesis de Licenciatura en Biología, Universidad de Sonora. 36 pp.
- Llop, S. Ibarlucea, J. Sunyer, J. Ballester, F. 2013. *Estado actual sobre la exposición alimentaria al mercurio durante el embarazo y la infancia, y recomendaciones en salud pública*. Gaceta Sanitaria. 27 (3): 273–278.
- López-Ríos, O. Lechuga-Anaya, M. 2001. *Contaminantes en los cuerpos de agua del sur de Sonora*. Salud Pública de México. 43 (4): 298–305.



- Martínez-Durazo, Á. 2022. *Evaluación de la contaminación por metales y metaloides en tres presas de la cuenca del río Yaqui, utilizando biomarcadores en tilapia y lobina*. Tesis de Doctorado, Centro de Investigación en Alimentación y Desarrollo, A.C. Hermosillo, Sonora, México.
- Martínez-Durazo, Á. 2026. Actividades antropogénicas y naturales que aportan mercurio hacia el medio ambiente. Artlist <https://toolkit.artlist.io/image-videogenerator?mode=image&modelGroupID=363>
- Martínez-Durazo, Á. 2026. Fuentes de contaminación hacia los ecosistemas acuáticos que afectan a la tilapia, *O. niloticus*. Artlist. <https://toolkit.artlist.io/image-videogenerator?mode=image&modelGroupID=363>
- Martínez-Durazo, Á. 2026. Procesos de especiación química del mercurio (Hg) en los ecosistemas acuáticos. Artlist. <https://toolkit.artlist.io/image-videogenerator?mode=image&modelGroupID=363>
- Martínez-Durazo, Á. Cruz-Acevedo, E. Betancourt-Lozano, M. Jara-Marini, M.E. 2021. *Comparative assessment of metal bioaccumulation in tilapia and largemouth bass from three dams of the Yaqui River*. Biological Trace Element Research. 199 (8): 3112–3125.
- Martínez-Durazo, Á., E. Cruz-Acevedo, M. Betancourt-Lozano y M. E. Jara-Marini. 2020. *Comparative assessment of metal bioaccumulation in tilapia and largemouth bass from three dams of the Yaqui River*. Biological Trace Element Research 199(8): 3112–3125.
- Martínez-Durazo, Á., Rivera-Domínguez, M., García-Gasca, S.A. et al. *Assessing metal(loid)s concentrations and biomarkers in tilapia (*Oreochromis niloticus*) and largemouth bass (*Micropterus salmoides*) of three ecosystems of the Yaqui River Basin, Mexico*. Ecotoxicology 32, 166–187 (2023).
- Monrroy, S.X.L. Benefice, E. 2007. *Exposición a mercurio de mujeres y niños de comunidades indígenas del río Beni (Bolivia), con relación a problemas de salud (malnutrición, parasitismo, anemia) endémicos en el área*. Tesis de Maestría, Instituto de Ciencias Biológicas y Biomédicas, Universidad Mayor de San Andrés, La Paz, Bolivia.
- Morel, F.M.M. Kraepiel, A.M.L. Amyot, M. 1998. *The chemical cycle and bioaccumulation of mercury*. Annual Review of Ecology and Systematics. 29(1): 543–566.
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). 2022. *El estado mundial de la pesca y la acuicultura 2022. Hacia la transformación azul*. FAO, Roma.

- Organización Panamericana de la Salud (OPS). 2024. *Las mujeres son especialmente vulnerables a los efectos del mercurio en su salud*.
- Ouma, K.O. Shane, A. Syampungani, S. 2022. *Aquatic ecological risk of heavy-metal pollution associated with degraded mining landscapes of the Southern Africa river basins: a review*. Minerals. 12(2): 225-232.
- Palma-Yrigoyen, N. Flores-Pacherres, V. 2024. *Estrategias de prevención por exposición a mercurio, en poblaciones vulnerables en zonas impactadas por la minería artesanal y a pequeña escala: revisión sistemática cualitativa*. Tesis de licenciatura, Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas, Santiago de Surco, Perú.
- Piro, A.J. Taipale, S.J. Laiho, H.M. Eerola, E.S. Kahilainen, K.K. 2023. *Fish muscle mercury concentration and bioaccumulation fluctuate year-round: insights from cyprinid and percid fishes in a humic boreal lake*. Environmental Research. 231(1): 1-9.
- Qun-Fang Zhang, Ying-Wen Li, Zhi-Hao Liu, Qi-Liang Chen (2016). *Reproductive toxicity of inorganic mercury exposure in adult zebrafish: Histological damage, oxidative stress, and alterations of sex hormone and gene expression in the hypothalamic-pituitary-gonadal axis*. Aquatic Toxicology. Volume 177. Pages 417-424, ISSN 0166-445X
- Rice, K.M. Walker, E.M. Wu, M. Gillette, C. Blough, E.R. 2014. *Environmental mercury and its toxic effects*. Journal of Preventive Medicine and Public Health. 47(2): 74–83.
- Rossi, G. (2026). *Estudio comparativo de metales (Cu, Al, Cr, Cd, Hg, Ni) y metaloides (As) potencialmente tóxicos en hígado y tejido muscular y su influencia sobre el porcentaje de proteína en carne de pollo*. Rev. investig. vet. Perú [online]. 2025, vol.36, n.5.
- Ruggieri F, Majorani C, Domanico F, Alimonti A. *Mercury in Children: Current State on Exposure through Human Biomonitoring Studies*. Int J Environ Res Public Health. 2017 May 12;14(5):519. doi: 10.3390/ijerph14050519. PMID: 28498344; PMCID: PMC5451970.
- SAGARHPA (Secretaría de Agricultura, Ganadería, Recursos Hidráulicos, Pesca y Acuicultura de Sonora). 2024.
- Sánchez-Alarcón, S. R. 2009. *Distribución de bacterias sulfato reductoras y metilmercurio en sedimentos de lagunas de inundación del río Beni, Amazonia Boliviana (Tesis doctoral)*. Universidad Mayor de San Andrés, La Paz, Bolivia.
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). (2023). *Dictamen Diagnóstico Ambiental Río Sonora*. Gobierno de México.



- Secretaría de Salud. (2009). *Norma Oficial Mexicana NOM-242-SSA1-2009, Productos y servicios. Productos de la pesca frescos, refrigerados, congelados y procesados. Especificaciones sanitarias y métodos de prueba*. Diario Oficial de la Federación. [1, 2, 3]
- Suhendrayatna S, Arahman N, Sipahutar LW, Rinidar R, Elvitriana E. *Toxicity and Organ Distribution of Mercury in Freshwater Fish (Oreochromis niloticus) after Exposure to Water Contaminated Mercury (HgII)*. *Toxics*. 2019 Nov 19;7(4):58. doi: 10.3390/toxics7040058. PMID: 31752384; PMCID: PMC6958402.
- Ullrich, S.M. Tanton, T.W. Abdrashitova, S.A. 2001. *Mercury in the aquatic environment: A review of factors affecting methylation*. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*. 31(3): 241–293.
- Viana, L.F. Kummrow, F. Cardoso, C.A.L De Lima, N.A. Solórzano, J.C.J. Crispim, B.A. Barufatti, A. Florentino, A.C. 2021. *High concentrations of metals in the waters from Araguari River lower section (Amazon biome): Relationship with land use and cover, ecotoxicological effects and risks to aquatic biota*. *Chemosphere*. 285(1): 1-16.
- Zamora-Arellano, N.Y. Betancourt-Lozano, M. Ilizaliturri-Hernández, C. García-Hernández, J Jara-Marini, M.E. Chávez-Sánchez, C. Ruelas-Inzunza, J.R. 2018. *Mercury levels and risk implications through fish consumption on the Sinaloa coasts (Gulf of California, Northwest Mexico)*. *Risk Analysis*, 38(12): 2646–2658.
- Zhou, Y. Li, S. Tang, W. Zhong, H. 2025. *Mercury transformations by reactive oxygen species: Occurrence, detection, evidence, and challenges*. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*.

Ficha curricular de los autores:

- **Dr. Ángel Martínez Durazo**, Departamento de Investigaciones Científicas y Tecnológicas, Universidad de Sonora. SNI C. Especialista en Ecotoxicología de metales y metaloides de especies acuáticas.
- **Biól. Carolina León Marín**, Licenciatura en Biología. Departamento de Investigaciones Científicas y Tecnológicas, Universidad de Sonora, Hermosillo, Sonora, México. a217206015@unison.mx.
- **Dra. Chrystian Mariana Rodríguez-Armenta**, Departamento de Investigaciones Científicas y Tecnológicas, Universidad de Sonora, Hermosillo, Sonora, México. SNI 1, especialista en Biología Molecular de organismos acuáticos. chrystian.rodriguez@unison.mx, ORCID: 0000-0002-8757-2583
- **Dr. Christian Minjarez-Osorio**, Departamento de Investigaciones Científicas y Tecnológicas, Universidad de Sonora, Hermosillo, Sonora, México. SNI 1. Especialista en nutrición acuícola. christian.minjarez@unison.mx, ORCID: 0000-0003-1197-3345
- **Dr. Enrique De La Re-Vega**, Departamento de Investigaciones Científicas y Tecnológicas, Universidad de Sonora, Hermosillo, Sonora, México. SNI 1. Especialista en Biología Molecular de Organismos Acuáticos. enrique.delare@unison.mx, ORCID: 0000-0001-7265-911X
- **Dr. Martín Enrique Jara Marín**, Centro de investigación en alimentación y Desarrollo, AC. Coordinación de Ciencias de los Alimentos. Hermosillo, Sonora, México Alimentos. SNI 2. Especialista en Ecotoxicología de metales y metaloides. mjara@ciad.mx, ORCID: 0000-0003-3346-6416
- **Dr. Ángel Martínez Durazo**, Departamento de Investigaciones Científicas y Tecnológicas, Universidad de Sonora, Hermosillo, Sonora, México, angel.martinez@unison.mx, ORCID: 0000-0002-0010-5668

**Cita**

León-Marín, C., C.M. Rodríguez-Armenta, C. Minjarez-Osorio, E. De la Re-Vega, M.E. Jara-Marini y A. Martínez-Durazo. Consumo de tilapia, ¿qué tan seguro es?, un estudio de exposición en presas de Sonora. Recursos Naturales y Sociedad, 2026. Vol. 12(1): 122-145. <https://doi.org/10.18846/renaysoc.2026.12.12.01.0008>.

Sometido: 09 de marzo de 2026

Aceptado: 18 de mayo de 2026

Editor asociado: Dra. Crisalejandra Rivera Pérez

Editor ejecutivo: Dra. Crisalejandra Rivera Pérez

Diseño gráfico editorial: Ing. Fca. Elizabeth Villegas Carrazco

**Lizards and pollutants:
adaptations to environmental change**

Lagartijas y contaminantes químicos en México: Adaptaciones a un ambiente cambiante

**Miranda C. Villa-Muñoz^{1*}, Tania Zenteno-Savín¹,
M. Carmen Blázquez-Moreno¹, Alfredo Ortega-Rubio¹**

Resumen

México es un país megadiverso que alberga más de 800 especies de reptiles, de las cuales alrededor de 500 son lagartijas, muchas de ellas endémicas. Sin embargo, el desarrollo humano ha incrementado la liberación de contaminantes químicos: como agroquímicos, desechos industriales y urbanos, afectando la salud de los ecosistemas y de las poblaciones silvestres. En este sentido, diversos grupos de lagartijas pueden funcionar como especies centinelas: organismos que evidencian la presencia de contaminantes mediante cambios fisiológicos o del comportamiento. Aunque la investigación se ha centrado en aves y mamíferos, los reptiles, particularmente las lagartijas, representan un grupo prometedor debido a su alta sensibilidad ambiental, su baja movilidad y su estrecha relación con el entorno. Las lagartijas cumplen funciones ecológicas clave, como el control de insectos, pero enfrentan riesgos por exposición a contaminantes a través de la dieta, suelo o el aire. Estos compuestos pueden alterar su metabolismo, sistema inmune, reproducción y comportamiento. En México, los estudios sobre estos efectos en lagartijas aún son limitados, aunque investigaciones recientes evidencian respuestas fisiológicas en distintas especies. Comprender estas respuestas es fundamental para fortalecer estrategias de conservación, contribuyendo así a la protección de la biodiversidad y la salud de los ecosistemas.

Palabras clave:

Lagartijas, contaminantes químicos, especies centinela, biomarcadores, conservación

¹Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste, S.C. (CIBNOR). Instituto Politécnico Nacional 195, Playa Palo Santa Rita Sur, La Paz, Baja California Sur, 23096, México.

* Autor de correspondencia: mvilla@pg.cibnor.mx



Abstract

Mexico is a megadiverse country that hosts more than 800 species of reptiles, of which around 500 are lizards, many of them endemic. However, human development has increased the release of chemical contaminants: such as agrochemicals, industrial waste, and urban pollutants that affect the health of ecosystems and wild populations.

In this context, various lizard groups can function as sentinel species: organisms that reveal the presence of contaminants through physiological or behavioral changes. Although research has primarily focused on birds and mammals, reptiles, particularly lizards, represent a promising group due to their high environmental sensitivity, low mobility, and close interaction with their surroundings.

Lizards play key ecological roles, such as controlling insect populations, but they face risks from exposure to contaminants through diet, soil, or air. These compounds can alter their metabolism, immune system, reproduction, and behavior. In Mexico, studies on these effects in lizards remain limited, although recent research has documented physiological responses in different species. Understanding these responses is essential to strengthen conservation strategies, thereby contributing to the protection of biodiversity and ecosystem health.

Keywords:

Lizards, chemical pollutants, sentinel species, biomarkers, conservation

México se caracteriza por ser un país megadiverso y ocupa el segundo lugar a nivel mundial en diversidad de especies de reptiles. Más del 50% de estas especies son endémicas, es decir, sólo se encuentran en el país. De las más de 800 especies registradas, alrededor de 500 son lagartijas (Fig. 1) y, aunque muchas veces pasan desapercibidas, desempeñan un papel importante en los ecosistemas donde se encuentran (Balderas-Valdivia y González-Hernández, 2025; Flores-Villela, 2014).



Figura. 1. Ejemplos de la diversidad de lagartijas en México. En el país se han registrado al menos 500 especies, lo que lo posiciona como uno de los más diversos a nivel mundial para este grupo de reptiles.

Debido a la presión humana sobre los ecosistemas naturales, actualmente se observa una pérdida y fragmentación de hábitats, considerados como los principales factores de riesgo para la herpetofauna (reptiles y anfibios) (Cordier *et al.* 2021). Además, el uso intensivo de agroquímicos en cultivos, la contaminación de cuerpos de agua por descargas industriales y, la expansión urbana, entre otros factores han puesto en riesgo la salud de los ecosistemas y con ello a las poblaciones silvestres expuestas a estos contaminantes (Riojas-Rodríguez *et al.* 2013; SEMARNAT, 2019). Todo lo anterior afecta negativamente a las poblaciones silvestres de reptiles y, para afrontarlo, deben recurrir a sus habilidades de adaptación y resiliencia. Pero, ¿qué estrategias han desarrollado estos animales para enfrentar los crecientes retos en su entorno, como lo son los contaminantes?

Un espejo del ambiente: especies centinela

Las especies centinela funcionan como monitores biológicos que reaccionan a los cambios en su ecosistema, incluyendo contaminantes ambientales. Estas especies presentan una respuesta medible como la acumulación de contaminantes en sus tejidos o cambios fisiológicos o en su comportamiento y, por lo tanto, se pueden usar para detectar potenciales riesgos para el ambiente y la salud (Fossi, 2017; NRC, 1991).



Un buen ejemplo en México que se conoce bien, es el de los ajolotes en los canales de Xochimilco. El ajolote mexicano (*Ambystoma mexicanum*) es un anfibio emblemático endémico de la Ciudad de México. Estos animales son altamente sensibles a cambios en su entorno, especialmente a la presencia de contaminantes en el agua, los cuales pueden afectar su desarrollo y supervivencia. Durante las últimas décadas, sus poblaciones se han reducido drásticamente y los estudios científicos sugieren que la causa es la contaminación por metales, plaguicidas y fertilizantes, así como la proliferación de especies invasoras, incluyendo la carpa y tilapia (Castán-Aquino *et al.* 2021; Hernández-Rojas, 2024). La disminución de las poblaciones del ajolote envía una señal de alerta sobre la degradación de ese ecosistema, lo que afecta no sólo a esta especie, sino también a otras, incluido el ser humano. Los científicos estudian otros animales (invertebrados marinos o terrestres, reptiles, aves o mamíferos) y plantas, como potenciales especies centinela o bioindicadoras.

Reptiles como potenciales especies centinela: ¿qué sabemos?

Una búsqueda exploratoria en bases de datos académicos (Scopus, Google Scholar, ScienceDirect), evidencía que la investigación sobre contaminantes químicos y su impacto en vertebrados terrestres y en potenciales especies centinela se ha enfocado mayoritariamente en mamíferos y aves. En menor cantidad encontramos estudios para grupos como reptiles y anfibios, aunque en las últimas dos décadas éstos han aumentado. Históricamente, mamíferos, aves y peces se han considerado especies subrogadas (sustitutos o modelos) para los reptiles. Sin embargo, aunque algunas respuestas ante condiciones adversas son comunes o similares entre vertebrados, esa extrapolación tiene validez limitada ya que algunos contaminantes resultan más tóxicos para reptiles que para otros grupos y viceversa. Además, los reptiles son organismos ectotermos, es decir, dependen del ambiente para regular su temperatura corporal, a diferencia de las aves y los mamíferos, por lo que su fisiología y metabolismo son distintos, haciéndolos potencialmente más sensibles (Ortiz-Santaliestra *et al.* 2018; Silva *et al.* 2020).

En un estudio pionero, Weir *et al.* (2010) compararon la sensibilidad entre aves y reptiles ante distintos compuestos químicos. Estos autores compararon 17 estudios, incluyendo 15 compuestos diferentes, y concluyeron que hay diferencias importantes entre los dos grupos y que la información disponible para reptiles es escasa y restringida para algunas especies. Por ejemplo, las lagartijas resultaron más sensibles a explosivos de uso militar, como la ciclonita (RDX) y el trinitrotolueno (TNT) que las aves, mientras que éstas últimas, fueron más vulnerables que los reptiles a ciertos plaguicidas organofosforados (malatión, paratión, propoxur y fenitrotión) y a los insecticidas de la familia de las piretrinas.

En ambientes terrestres, los reptiles, especialmente las lagartijas, destacan como potenciales especies centinela ya que la contaminación ambiental y otros factores, como el cambio climático, son considerados entre las principales amenazas a sus poblaciones. Además, las lagartijas suelen ser abundantes a nivel local, presentan tasas de migración bajas y tienen un rango de movilidad reducido, lo que facilita el estudio de sus poblaciones (Aguilera *et al.* 2012; Ortiz-Santaliestra *et al.* 2018; Silva *et al.* 2020).

Lagartijas y contaminantes químicos

Las lagartijas habitan desde desiertos hasta selvas y bosques, y poseen una gran plasticidad fisiológica y de comportamiento. Por ejemplo, se mueven constantemente entre el sol y la sombra para regular su temperatura, sus coloraciones les permiten camuflajearse con su entorno, y pueden desprender su cola de manera voluntaria (autotomía caudal) para distraer a los depredadores y huir (Vitt y Caldwell, 2014). Además, cumplen una función esencial en los ecosistemas: controlan poblaciones de arácnidos e insectos, como termitas, mosquitos y hormigas, al alimentarse de ellos y, a su vez, sirven de alimento para aves y mamíferos. Sin embargo, los contaminantes químicos representan una de las principales amenazas para su supervivencia (Freitas *et al.* 2020; Michael, 2025).

La exposición a contaminantes puede ocurrir principalmente por tres vías: ingesta (al consumir presas contaminadas), pero también por absorción dérmica (a través de contacto con la piel) y por inhalación. La ruta más estudiada y considerada para análisis de riesgo ambiental en Estados Unidos es la dieta. Los contaminantes, como los desechos agrícolas, industriales y mineros, pueden influir en los procesos fisiológicos, disminuir el éxito reproductivo de los individuos y, con ello, comprometer la supervivencia de las poblaciones de lagartijas (Freitas *et al.* 2020; Silva *et al.* 2020) (Fig. 2).

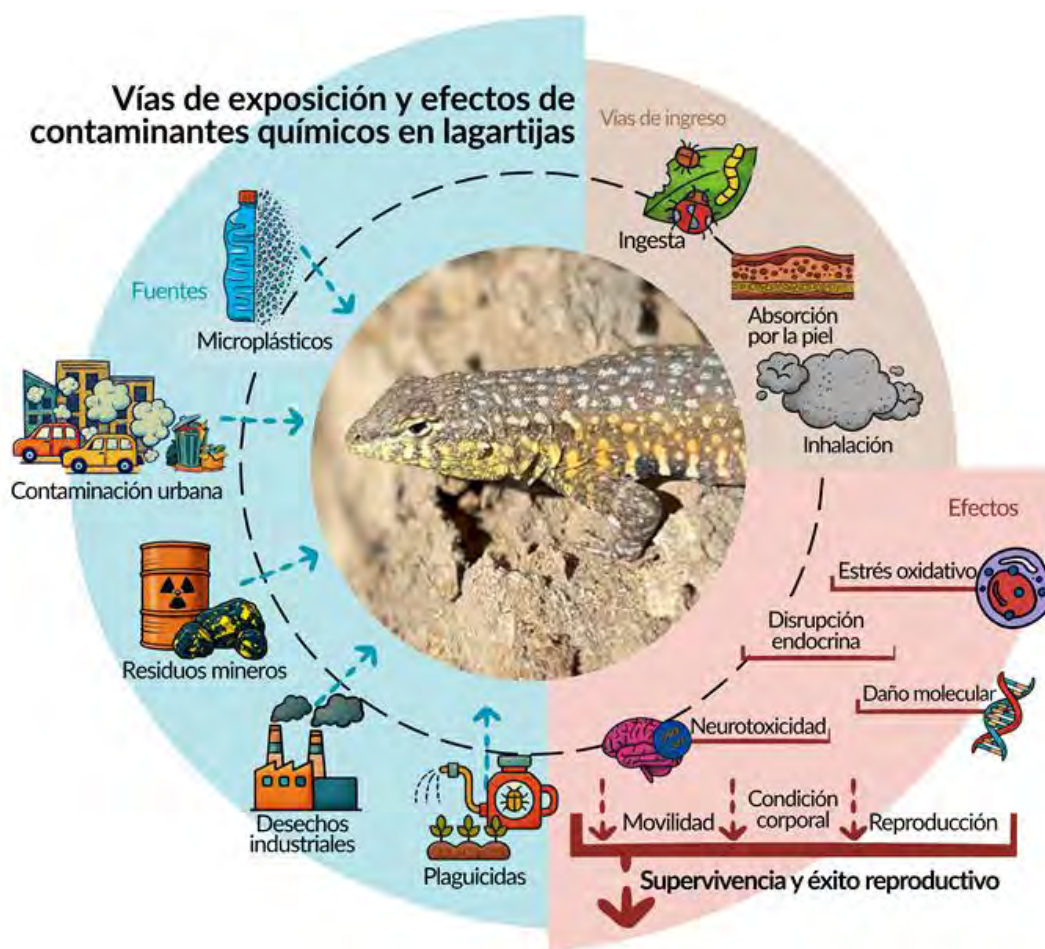


Figura. 2. Vías de exposición y efectos de contaminantes químicos en lagartijas: fuentes de las que provienen estos contaminantes, vías de ingreso al organismo y efectos en el organismo que llevan a la reducción la supervivencia y el éxito reproductivo.

¿Cómo logran sobrevivir las lagartijas en entornos tan desafiantes? Estos reptiles han desarrollado diversas estrategias fisiológicas y bioquímicas que les permiten mitigar los potenciales efectos de los contaminantes (Fig. 3).



Figura 3. Mecanismos de defensa de las lagartijas ante contaminantes químicos: se activan tanto respuestas internas (enzimas antioxidantes, reparación de ADN, secuestro de metales) como conductuales o de comportamiento para reducir su exposición.

Una de las especies de lagartijas más estudiadas como modelo para entender los efectos de contaminantes químicos, principalmente a plaguicidas, es la lagartija roquera de Europa (género *Podarcis*), común en ambientes urbanos y agrícolas. Se ha reportado que la exposición a fungicidas y otros plaguicidas activa mecanismos de desintoxicación en su organismo y puede causar daño oxidativo y al ADN (Buono *et al.* 2007; Capriglione *et al.* 2011; Molledo *et al.* 2023; Simbula *et al.* 2021). Algunos de estos compuestos también alteran su sistema hormonal, afectando el funcionamiento de la tiroides y la reproducción en machos (Bicho *et al.* 2013; Cardone, 2015; De Falco *et al.* 2007). Asimismo, se ha reportado una disminución en la condición corporal de individuos del género *Podarcis* expuestos a plaguicidas en zonas agrícolas (Mingo *et al.* 2017).

También se ha estudiado la contaminación por metales; por ejemplo, en la lagartija de Bosc (*Acanthodactylus boskianus*), en el norte de África. Nasri *et al.* (2020) encontraron una respuesta inmune significativamente menor en individuos de zonas industriales expuestos a metales dañinos que en aquellos no expuestos. En contraste, un estudio con la lagartija roquera de la especie *Podarcis muralis*, encontró que muestran una sorprendente capacidad de resiliencia a la exposición a plomo, sin efectos negativos evidentes en su rendimiento físico, a pesar de presentar concentraciones elevadas de este metal en sangre. Esto sugiere que podrían haber desarrollado mecanismos de tolerancia ante contaminantes químicos (Moore *et al.* 2025).



En el continente americano se han estudiado los efectos de la exposición a contaminantes en distintas especies de lagartijas espinosas (género *Sceloporus*). Por ejemplo, en *S. occidentalis* se ha observado que la exposición a insecticidas organofosforados y carbamatos puede alterar su capacidad locomotora, afectando la velocidad de escape y eficiencia para capturar presas (DuRant et al. 2007; Holem et al. 2006; Holem et al. 2008), mientras que la exposición a plomo, incluso en concentraciones altas, aparentemente no afecta a su desempeño locomotor (Holem et al. 2006). Se ha sugerido también que la exposición al TNT puede alterar la función inmune y el crecimiento, provocando cambios en algunos órganos y en su metabolismo para lidiar con estos desafíos y priorizar ciertos procesos vitales en respuesta a la contaminación. Estos efectos se pueden potenciar si se combinan con otros retos ambientales, como falta de alimento o infección por parásitos, causando alteraciones fisiológicas y pérdida de masa corporal (McFarland et al. 2012).

Por muchos años, los estudios científicos se centraron sólo en determinar concentraciones de contaminantes en tejidos de lagartijas, lo cual, si bien es útil para entender la exposición histórica en ciertas poblaciones, no siempre refleja los efectos en sus hábitats naturales. En la actualidad, distintos estudios se enfocan en evaluar y/o desarrollar métodos para entender los efectos a nivel organismo. Es importante resaltar que la mayoría de estos estudios se han realizado en laboratorio, donde se controlan las dosis y variables externas. No obstante, los estudios en condiciones naturales, donde intervienen distintos factores de manera simultánea, son fundamentales para comprender los efectos en las poblaciones (Campbell et al. 2002; Gavlová et al. 2025; Hopkins, 2005).

Estudios en especies de reptiles en México: un camino por recorrer

En México, los estudios de exposición a contaminantes químicos en lagartijas aún son escasos (Aguilera et al. 2012). Algunos ejemplos incluyen el estudio de dos especies de geckos en áreas urbanas e industriales comparando, *Hemidactylus frenatus*, en México y *Tarentola mauritanica*, en España. En el trabajo realizado en México, se detectó una alta acumulación de 12 metales distintos en tejidos de *H. frenatus*, relacionada a los niveles de contaminación del aire en los sitios muestreados, lo que la convierte en una especie prometedora como monitor de la calidad del aire en zonas urbanas e industriales (Morales-Zamudio et al. 2023).

Aguilera et al. (2012) evaluaron el impacto de la contaminación ambiental mediante la determinación de biomarcadores en colas de lagartijas espinosas (*Sceloporus serrifer* y *S. torquatus*), en un parque industrial del área metropolitana de Monterrey, Nuevo León, en

comparación con lagartijas del Parque Ecológico de Chipinque, un Área Natural Protegida. Los autores encontraron mayor actividad de enzimas relacionadas a procesos de desintoxicación en los individuos del parque industrial, indicando exposición a metales e hidrocarburos. Este trabajo destaca, además, la utilidad del análisis de una porción de la cola como un método mínimamente invasivo para estudios de monitoreo de contaminantes en las poblaciones silvestres de lagartijas. Actualmente, los autores del presente trabajo llevan a cabo investigaciones para evaluar los posibles efectos de la exposición a plaguicidas en zonas agrícolas, empleando marcadores bioquímicos con métodos mínimamente invasivos en la lagartija de costado manchado (*Uta stansburiana*), especie del noroeste del país (datos no publicados).

Perspectivas

Proteger a las lagartijas es importante para preservar la biodiversidad y, con ello, la salud de los ecosistemas. Las lagartijas son piezas clave en las cadenas tróficas y, si sus poblaciones siguen disminuyendo, podrían desencadenarse efectos en cascada que afecten a otras especies y, eventualmente, a los humanos. Para mitigar estos riesgos, es fundamental incluir a los reptiles en las evaluaciones de riesgo ecológico, promover el monitoreo de sus poblaciones a largo plazo y fomentar estrategias de conservación específicas. En México aún hay mucho por descubrir sobre la biología y ecología de las lagartijas. Comprender sus respuestas ante estresores químicos permitirá desarrollar estrategias de conservación más efectivas y reconocer las señales tempranas de alerta.

Recomendaciones

Es necesario profundizar en este campo de estudio, fortalecer la investigación sobre los efectos de los contaminantes como agroquímicos en lagartijas, particularmente en México, para entender su sensibilidad y respuesta ante estos estresores. Esta información permitirá formular pautas para implementar medidas que protejan tanto a los reptiles como a otros seres vivos, por lo que el monitoreo ambiental mediante el empleo especies centinela y el uso integral y responsable de agroquímicos, constituyen estrategias fundamentales para establecer y cumplir. Proteger a las lagartijas no solo implica conservar a estos reptiles, sino también mantener el equilibrio y la salud de los ecosistemas; en los que vivimos, interactuamos y dependemos.



Agradecimientos

Los autores agradecen al Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste (CIBNOR) por las facilidades, al IBQ. O. Lugo-Lugo por su apoyo técnico en el laboratorio de Estrés Oxidativo, al técnico J.A. Cota-Castro por su apoyo en el trabajo de campo y al laboratorio de Toxicología y Salud Pública del Instituto Tecnológico de Sonora. MCVM es receptor de una beca SECIHTI (CVU: 972657).

Literatura citada

- Aguilera, C., P. González del Pliego, R. Mendoza-Alfaro, D. Lazcano y J. Cruz. 2012. *Pollution biomarkers in the spiny lizard (Sceloporus spp.) from two suburban populations of Monterrey, Mexico*. *Ecotoxicology* 21 (8): 2103–2112.
- Balderas-Valdivia, C.J. y A. González-Hernández. 2025. *Inventario de la herpetofauna de México*. Herpetología mexicana. En: <https://herpetologiamexicana.org/inventario-de-especies/> (consultado el 01/11/2025)
- Bicho, R.C., M.J. Amaral, A. Faustino, D.M. Power, A. Rema, M.A. Carretero, A. Soares y R.M. Mann. 2013. *Thyroid disruption in the lizard Podarcis bocagei exposed to a mixture of herbicides: a field study*. *Ecotoxicology* 22 (1): 156–165.
- Buono, S., L. Cristiano, B.D. Angelo, A. Cimini y R. Putti. 2007. *PPARα mediates the effects of the pesticide methyl thiophanate on liver of the lizard Podarcis sicula*. *Comparative Biochemistry and Physiology Part C* 145: 306–314.
- Campbell, K.R. y T.S. Campbell. 2002. *A logical starting point for developing priorities for lizard and snake ecotoxicology: a review of available data*. *Environmental Toxicology and Chemistry* 21 (5): 894–898.
- Capriglione, T., S. De Iorio, F. Gay, A. Capaldo, M.C. Vaccaro, M.A. Morescalchi y V. Laforgia. 2011. *Genotoxic effects of the fungicide thiophanate-methyl on Podarcis sicula assessed by micronucleus test, comet assay and chromosome analysis*. *Ecotoxicology* 20: 885–891.
- Cardone, A. 2015. *Imidacloprid induces morphological and molecular damages on testis of lizard (Podarcis sicula)*. *Ecotoxicology* 24 (1): 94–105.

- Castán-Aquino, Y.I., S.F. Arias-Balderas, E. Rojo-Salinas, E. Cervantes-Rangel, I.A. Ramos-Trujillo y O.O. Solís-Castro. 2020. *El desarrollo temprano y sobrevivencia del ajolote mexicano (Ambystoma mexicanum) son afectados por los pesticidas organofosforados malatión y diclorvos de grado comercial*. Revista Internacional de Contaminación Ambiental 36 (4): 967–975.
- Cordier, J.M., R. Aguilar, J. N. Lescano, G. C. Leynaud, A. Bonino, D. Miloch, R. Loyola, J. Nori. 2021. *A global assessment of amphibian and reptile responses to land-use changes*. Biological Conservation. 253 (80): 108863.
- De Falco, M., R. Sciarriello, A. Capaldo, T. Russo, F. Gay, S. Valiante, L. Varano y V. Laforgia. 2007. *The effects of the fungicide methyl thiophanate on adrenal gland morphophysiology of the lizard Podarcis sicula*. Archives of Environmental Contamination and Toxicology 53 (2): 241–248.
- DuRant, S.E., W.A. Hopkins y L.G. Talent. 2007. *Impaired terrestrial and arboreal locomotor performance in the western fence lizard (Sceloporus occidentalis) after exposure to an AChE-inhibiting pesticide*. Environmental Pollution 149 (1): 18–24.
- Flores-Villela, O. y U.O. García-Vázquez. 2014. *Biodiversidad de reptiles en México*. Revista Mexicana de Biodiversidad 85: S467–S475.
- Fossi, M.C. y C. Panti. 2017. *Sentinel species of marine ecosystems*. Oxford Research Encyclopedia of Environmental Science. Nueva York, Estados Unidos de América.
- Freitas, L.M., J. Paranaíba, A. Pérez, M. Machado y F.C. Lima. 2020. *Toxicity of pesticides in lizards*. Human and Experimental Toxicology 39 (5): 596–604.
- Gavlová, A., P. Jachimowicz, P. Praus y P. Bednár. 2025. *Environment changes everything. How relevant are laboratory studies of sorption of pollutants on microplastics? A critical review*. Journal of Environmental Chemical Engineering 13 (2): 1–13.
- Hernández-Rojas, Y.A. 2024. *Cuidados y mantenimiento para la conservación del ajolote mexicano (Ambystoma mexicanum)*. Tesis de Licenciatura. Universidad Autónoma Metropolitana. México. 22 pp.
- Holem, R.R., W.A. Hopkins y L.G. Talent. 2006. *Effect of acute exposure to malathion and lead on sprint performance of the western fence lizard (Sceloporus occidentalis)*. Archives of Environmental Contamination and Toxicology 51 (1): 111–116.
- Holem, R.R., W.A. Hopkins y L.G. Talent. 2008. *Effects of repeated exposure to malathion on growth, food consumption, and locomotor performance of the western fence lizard (Sceloporus occidentalis)*. Environmental Pollution 152 (1): 92–98.



- Hopkins, W.A., B.P. Staub, J.A. Baionno, B.P. Jackson y L.G. Talent. 2005. *Transfer of selenium from prey to predators in a simulated terrestrial food chain*. Environmental Pollution 134 (3): 447–456.
- McFarland, C.A., L.G. Talent, M.J. Quinn Jr., M.A. Bazar, M.S. Wilbanks, M. Nisanian, R.M. Gogal Jr., M.S. Johnson, E.J. Perkins y K.A. Gust. 2012. *Multiple environmental stressors elicit complex interactive effects in the western fence lizard (Sceloporus occidentalis)*. Ecotoxicology 21 (8): 2372–2390.
- Michael, D.R. 2025. *Guiding principles for conserving reptiles in Australian temperate agricultural landscapes*. Pacific Conservation Biology 31: 1–13.
- Mingo, V., S. Lötters y N. Wagner. 2017. *The impact of land use intensity and associated pesticide applications on fitness and enzymatic activity in reptiles—A field study*. Science of The Total Environment 590–591: 114–124.
- Moltedo, G., B. Catalano, G. Martuccio, G. Sesta, G. Romanelli, A. Lauria, M.T. Berducci, R. Parravano, C. Maggi, G. Simbula, L. Vignoli, F. Onorati y S. D’Antoni. 2023. *Processes involved in biochemical response to pesticides by lizard Podarcis siculus (Rafinesque-Schmaltz, 1810) – A field study*. Toxicology and Applied Pharmacology 467: 1–?.
- Moore, M.M., E.G. Foster, A. Amer, L. Fraire, A. Head, A. Blanchette, S.J. Hankison, A.R. Gunderson y E.J. Gangloff. 2025. *Urban wall lizards are resilient to high levels of blood lead*. Environmental Research 264 (1): 1–8.
- Morales-Zamudio, L., A. Fierro-Cabo, M. Saydur-Rahman y M.A. Dominguez-Crespo. 2023. *Metal contents in house geckos (Squamata: Gekkonidae) from industrial and urban areas of southern Tamaulipas, Mexico and western Andalucía, Spain, may reflect airborne metal pollution*. Journal of Toxicology and Environmental Health Part A. 86 (4): 103 – 118.
- Nasri, I., A. Hammouda, J. Belliure y S. Selmi. 2020. *Decreased cell-mediated immune response in Bosk’s fringe-toed lizards (Acanthodactylus boskianus) inhabiting an industrialized area in southern Tunisia*. Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology 105: 393–396.
- National Research Council (NCR). 1991. *Animals as sentinels of environmental health hazards*. National Academies Press. Washington, Estados Unidos.
- Ortiz-Santaliestra, M.E., J.P. Maia, A. Egea-Serrano y I. Lopes. 2018. *Validity of fish, birds and mammals as surrogates for amphibians and reptiles in pesticide toxicity assessment*. Ecotoxicology 27 (7): 819–833.
- Riojas Rodríguez, H., A. Schilmann, L. López-Carrillo, J. Finkelman. 2013. *La salud ambiental en México: situación actual y perspectivas futuras*. Salud pública Méx. 55 (6): 638 – 649.

- SEMARNAT (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales). 2019. *Informe de la situación del medio ambiente en México, edición 2018*. Gobierno de México. Ciudad de México, México.
- Silva, J.M., J.A. Navoni y E.M. Xavier-Freire. 2020. *Lizards as model organisms to evaluate environmental contamination and biomonitoring*. Environmental Monitoring and Assessment 192 (7): 454.
- Simbula, G., G. Molledo, B. Catalano, G. Martuccio, C. Sebbio, F. Onorati, L. Stellati, A.M. Bissattini y L. Bignoli. 2021. *Biological responses in pesticide exposed lizards (Podarcis siculus)*. Ecotoxicology 30: 1017–1028.
- Vitt, L.J. y J.P. Caldwell. 2014. *Herpetology: an introductory biology of amphibians and reptiles*. Phyllomedusa Journal of Herpetology 12 (2): 147
- Weir, S.M. y J.G. Suski. 2010. *Ecological risk of anthropogenic pollutants to reptiles: evaluating assumptions of sensitivity and exposure*. Environmental Pollution. 158 (12): 3596 – 606.

Cita

Villa-Muñoz, M.C., T. Zenteno-Savín, M.C. Blázquez-Moreno, y A. Ortega-Rubio. Lagartijas y contaminantes químicos en México: Adaptaciones a un ambiente cambiante. Recursos Naturales y Sociedad, 2026. Vol. 12(1): 147-159.
<https://doi.org/10.18846/renaysoc.2026.12.12.01.0009>.

Sometido: 04 de abril de 2026

Aceptado: 22 de mayo de 2026

Editor asociado: Dr. Arturo Sánchez-Paz

Editor ejecutivo: Dr. Arturo Sánchez-Paz

Diseño gráfico editorial: Ing. Fca. Elizabeth Villegas Carrazco

Fleming's lysozyme

La lisozima de Fleming

Martha Reyes-Becerril^{1*}, Kevyn Guerra²

Resumen

Las lisozimas son pequeñas enzimas con gran potencial para atacar bacterias. Estas enzimas fueron descubiertas por el científico escocés Alexander Fleming en el año de 1922. A estas enzimas las podemos encontrar en las secreciones de nuestro cuerpo, como suero, plasma, lágrimas, sudor y moco; además, se encuentran dentro de células blancas llamadas leucocitos, nuestras células de defensa, donde son utilizadas como enzimas de destrucción de patógenos. De allí su nombre, que rompe (liso) lo vivo (zima). En esta revisión se destacan el descubrimiento de esta importante enzima, su función y sus aplicaciones como un antibiótico natural, pero lo más importante es no perder de vista la historia de su importante descubrimiento. Actualmente las lisozimas por sus cualidades químicas son ampliamente utilizadas en diferentes campos de la biotecnología, la industria farmacéutica y la alimenticia. ¡Cuánta razón tenía Fleming al decir: “Algún día oiremos hablar de la lisozima”!

Palabras clave: Enzimas, lisis bacteriana, sistema inmune.

¹Grupo de Inmunología y Vacunología. Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste (CIBNOR), Av. Instituto Politécnico Nacional 195, Playa Palo de Santa Rita Sur, La Paz B.C.S. 23096, México.

²Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de La Paz, Boulevard Forjadores 4720, 8 de octubre Segunda Sección, 23080 La Paz, B.C.S., México.

* Autor de correspondencia: mreyes04@cibnor.mx



Abstract

Lysozymes are small enzymes with great potential for attacking bacteria. These enzymes were discovered by the Scottish scientist Alexander Fleming in 1922. They can be found in our body's secretions, such as serum, plasma, tears, sweat, and mucus. They are also found within white blood cells called leukocytes, our immune cells, where they act as pathogen-destroying enzymes. Hence their name, which means "breaks down living things." This review highlights the discovery of this important enzyme, its function, and its applications as a natural antibiotic, but most importantly, it emphasizes the significance of its discovery. Currently, lysozymes are widely used in various fields of biotechnology, the pharmaceutical industry, and the food industry due to their chemical properties. How right Fleming was when he said, "One day we will hear about lysozyme!"

Keywords: Enzymes, bacterial lysis, immune system.

Introducción

Las enzimas son moléculas, generalmente de naturaleza proteica, que actúan como catalizadores biológicos; esto significa que su función es acelerar drásticamente la velocidad de las reacciones químicas que ocurren dentro de las células. En los organismos vivos, las enzimas tienen un papel muy importante en las funciones biológicas, como la digestión, la división y el desarrollo celular, además de funciones de defensa contra patógenos como las bacterias. Dentro de las enzimas con actividad antimicrobiana se encuentran las lisozimas, biomoléculas de defensa muy importantes del sistema inmune. Dentro de sus características se encuentran las siguientes: son proteínas globulares pequeñas, compuestas por una sola cadena de unos 129 aminoácidos y con un peso molecular aproximado de 14 kDa y poseen enlaces disulfuro que les otorgan gran estabilidad. La principal función de las lisozimas es destruir la pared de las bacterias, principalmente aquellas de tipo Gram-positivas, debido a que la pared de peptidoglucano está expuesta, a diferencia de las Gram-negativas, las cuales contienen una membrana externa que dificulta su ruptura, lo que no significa que no puedan atravesarla y destruirla. Su mecanismo de acción es romper estos enlaces encontrados en el peptidoglucano de la pared celular, la cual se debilita y rompe, entrando solutos y agua, hasta que la bacteria se hincha, estalla y se destruye (Carrillo, 2013). Las lisozimas se pueden

encontrar en mamíferos, plantas, aves e invertebrados como los insectos, y estas se producen en tejidos y fluidos como el moco (de donde fueron descubiertas), las lágrimas, la saliva, el moco, además de encontrarse en células blancas o leucocitos que actúan dentro de los mecanismos que son llevados a cabo por enzimas primarias y secundarias (Niyonsaba y Ogawa, 2005). Desde su descubrimiento por el científico bacteriólogo Alexander Fleming hasta la fecha, esta enzima ha jugado un papel muy importante en muchos aspectos de la biología moderna.

Antecedentes

Lisozima y su participación en el sistema inmune

El sistema inmune es un mecanismo de defensa y protección importante para todos los organismos vivos. Se divide principalmente en dos componentes llamados sistema inmune natural y otro sistema un poco más complejo, pero no menos importante, llamado sistema adaptativo o específico; esto porque se producen en este sistema moléculas de defensa que son súper específicas de un patógeno en específico. Nuestro cuerpo nos protege a través de la activación de estas defensas y de la producción de componentes celulares (o sea, a través de células) y humores (a través de enzimas o proteínas que se producen para atacar a los patógenos). ¡Las lisozimas son enzimas que participan en ambos mecanismos! (Fig. 1). Por un lado, las células de defensa llamadas neutrófilos arrojan pequeños granos o gránulos que atacan a las bacterias, y dentro de estos gránulos están presentes enzimas, entre ellas las lisozimas. Los neutrófilos utilizan estos gránulos en la defensa del huésped contra patógenos invasores (Cho *et al.* 2005) (Fig. 2). Por otra parte, nuestro cuerpo produce secreciones o fluidos corporales como el suero, saliva, lágrimas y moco, donde se encuentran más enzimas de defensa, entre ellas también las lisozimas. Todas estas enzimas secretadas tienen un mismo objetivo, la destrucción de los patógenos.

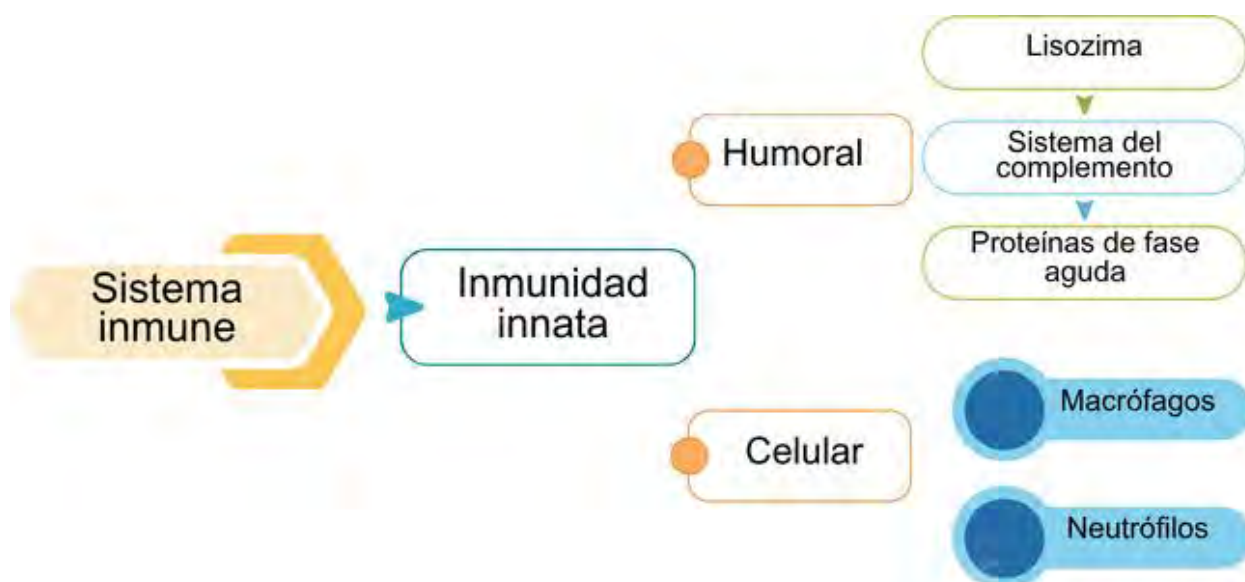


Figura 1. Sistema inmune natural



Figura 2. Sistema inmune celular: neutrófilos y lisozimas.

Descubrimiento: ¡La lisozima de Fleming!

La historia de la lisozima es una antesala a lo que vendría más tarde, el descubrimiento de la penicilina por el mismo investigador, el escocés Alexander Fleming. La historia de la lisozima comienza a principios del siglo XX (en 1922) a raíz de un accidente científico ligado a la observación y la tenacidad. Fleming se encontraba trabajando con unas placas de cultivo bacteriano cuando, por accidente, una secreción de moco cayó en su placa de cultivo bacteriano. Días más tarde, notó que el crecimiento de los microorganismos había sido inhibido. ¿Qué sucedió? Fleming observó grandes

halos transparentes alrededor de la colonia bacteriana, una inhibición del crecimiento, lo que lo llevó a investigar y repetir varios experimentos. Entre ellos, Fleming colocó en un tubo con caldo de cultivo bacteriano fresco unas gotas de moco y esperó unos minutos. ¿Cuál fue su sorpresa? Ver cómo aquel medio de color turbio cambiaba poco a poco hacia un color claro (Fig. 3). Confirmando que alguna sustancia inhibía el crecimiento. ¿Pasaré lo mismo con lágrimas? Sí. El científico Fleming notó que las secreciones corporales tenían el mismo efecto de “lisar” las bacterias. Sin embargo, había que descartar la posibilidad de que esta lisis se debiera a otras bacterias presentes en las secreciones, lo que lo llevó a realizar varios experimentos para descartar el “fenómeno de Twort”, en el que las bacterias pueden destruirse por otros agentes infecciosos. Descartado esto, Fleming llegó a la conclusión de que se trataba de una molécula de naturaleza enzimática, que años más tarde se denominaría lisozima (enzima que lisa o destruye). Fleming no se detuvo aquí; se dispuso a realizar nuevos experimentos, entre ellos, evaluar su efectividad como antibacteriano frente a otros antisépticos, observando el mismo resultado: un mayor halo de inhibición (al colocar moco o lágrimas). Aunque inicialmente descubrió esta enzima en secreciones nasales y lágrimas, Fleming investigó otras sustancias biológicas con esta actividad e identificó a la clara de huevo, una de las fuentes más ricas de esta enzima natural antibacteriana. Para dar una idea de la fuerte acción la lisozima producida por la clara de huevo de gallina, la lisozima aislada de esta fuente produjo una lisis completa frente a bacterias aisladas del cuerpo humano como el meningococo (*Neisseria meningitidis*), *Staphylococcus*, *Streptococcus faecalis*. En 1924 Fleming publica sus resultados sobre la actividad antibacteriana de la clara de huevo en una de las revistas de más prestigio “The Lancet”. Fleming pasó de llevar sus experimentos de una etapa de laboratorio (*in vitro*), a ensayos con animales y finalmente con humanos (*in vivo*). Sin embargo, al llevar sus experimentos a estas últimas etapas, se percató de que la lisozima de clara de huevo, por su naturaleza proteica, provocaba alergias, lo que requirió purificar la enzima para eliminar dichas reacciones. Pese a varios intentos, no lo logró. Con todo y este fracaso, Fleming fue optimista y siguió adelante con sus investigaciones, repitiendo, una y otra vez, que algún día el mundo oiría hablar de la lisozima de Fleming (Prieto y Gómez-Lus, 2006). Y así fue, en 1937 se llevó a cabo por primera vez la purificación de la lisozima, demostrando también su carácter enzimático. En 1965, esta enzima fue la primera proteína en ser resuelta por difracción de rayos X mostrando la estructura tridimensional de la lisozima, lo que permitió comprender exactamente cómo encajan las enzimas y sus sustratos como una “llave en una cerradura” para iniciar reacciones (Jolles *et al.* 1984).



Figura 3. Ensayos de Fleming: cultivos con bacterias y adición de moco.

Modo de acción de la lisozima

Una de las principales cualidades de la lisozima es su función como un importante mecanismo de defensa innato en organismos que carecen de inmunidad desarrollada o adaptativa. La función de la lisozima se centra en su capacidad para romper los enlaces químicos de un componente de la pared celular de las bacterias, llamado peptidoglicano, que constituye el sitio blanco de esta importante enzima. La pared celular está compuesta principalmente por moléculas llamadas N-acetilglucosamina y ácido N-acetilmurámico. La lisozima, rompe el enlace β -1,4 glucosídico entre el ácido N-acetilmurámico y la N-acetilglucosamina produciendo la lisis bacteriana (Fig. 4). La acción antibacteriana de la lisozima es más funcional en las bacterias del tipo Gram-positivas, por su capacidad para romper el enlace β -1,4-glicosídico presente en la capa de polisacáridos de las paredes celulares de estas bacterias y su efecto es más débil en las bacterias Gram-negativas debido a la presencia de una capa protectora de lipopolisacáridos en la membrana externa donde la capa de peptidoglicano se encuentra más al interior (Ragland *et al.* 2017). Sin embargo, estudios sobre la modificación química y física de la lisozima han incrementado la susceptibilidad de estas bacterias a la enzima, lo que ha resultado en la destrucción de bacterias Gram-negativas, como *Escherichia coli* (Pellegrini *et al.* 2000).

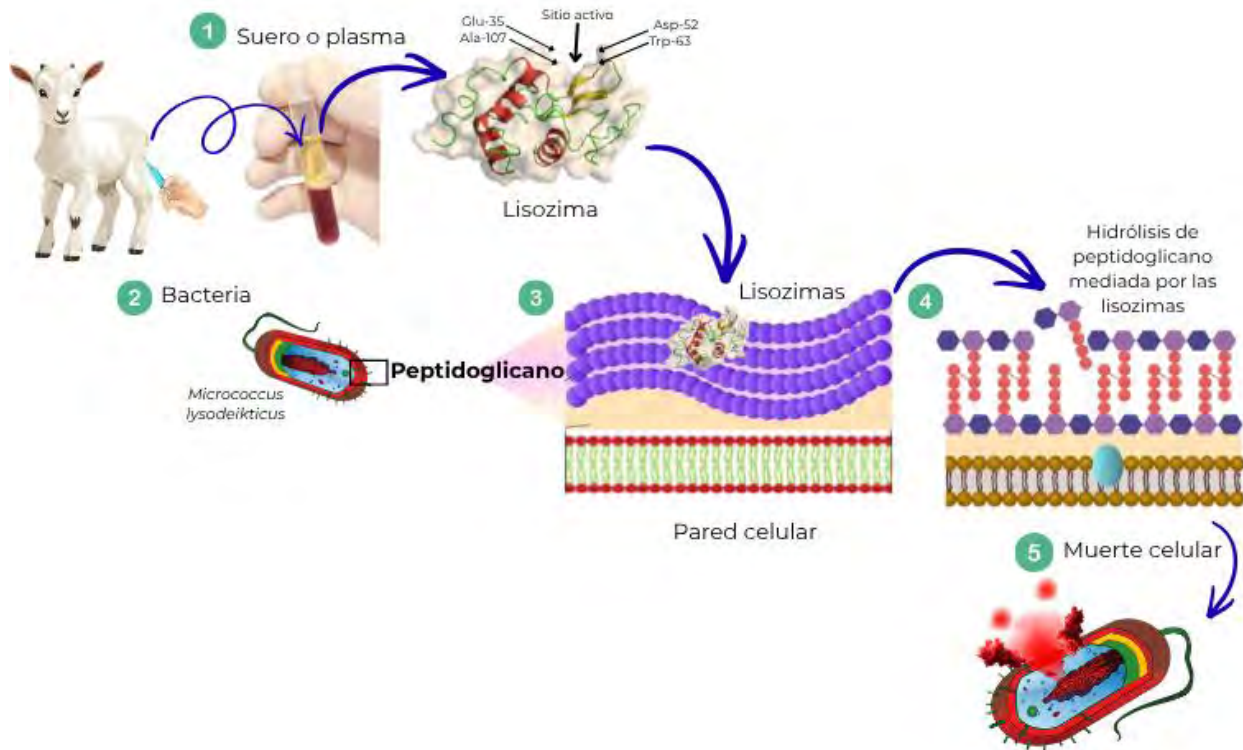


Figura. 4. Mecanismo de acción de las lisozimas.

Tipos de lisozimas

Las lisozimas actúan como un componente más del sistema inmune innato. Sin embargo, vale aclarar que estas enzimas no son exclusivas de mamíferos y, por lo tanto, pueden encontrarse en diversos microorganismos y plantas (Gordon *et al.* 1974). En mamíferos, se producen predominantemente por los macrófagos, y su expresión aumenta durante la diferenciación de los macrófagos (los que circulan en el torrente sanguíneo entran en los tejidos y se transforman en macrófagos especializados). Sin embargo, la lisozima también se encuentra, como ya se mencionó, en secreciones (plasma o suero, lágrimas, leche, saliva o, en el caso de los peces, en mucus), tejidos, órganos y leucocitos. Las lisozimas pueden clasificarse con base en su estructura, su origen o sus propiedades enzimáticas.

Existen tres categorías: lisozima tipo C (lisozima de gallina), lisozima tipo G (lisozima de ganso) y lisozima tipo I (lisozima de invertebrado) que incluyen a lisozimas bacterianas, lisozimas vegetales y lisozimas del fago T4 (Fig. 5). Las lisozimas de los vertebrados pertenecen a los tipos C y G (lisozima de gallina y de ganso). De los tres tipos de lisozima, la lisozima de gallina (tipo C) es la más estudiada por encontrarse en una alta concentración en la clara de huevo (3.4 %), por su fácil obtención y manejo (Carrillo, 2013).



Figura 5. Tipos de lisozimas.

Aplicaciones biotecnológicas de la lisozima

La lisozima tiene diferentes aplicaciones biotecnológicas en las industrias farmacéutica, alimentaria, médica y ganadera, muy importantes no solo por su efecto bactericida, sino también por su capacidad de inactivar ciertos virus y hongos. La fuente más utilizada de lisozima es la de clara de huevo de gallina, por la gran cantidad de lisozima y porque es más económica su producción; sin embargo, puede ser encontrada y aislada de otras fuentes como la leche y el jugo lechoso de frutas como la papaya (Schadt *et al.* 2023). En la industria alimentaria, la lisozima es utilizada como aditivo para preservar los alimentos ya que controla el crecimiento bacteriano en quesos duros y embutidos fermentados (Nawaz *et al.* 2022). En la industria farmacéutica, la lisozima humana recombinante (rhLYZ) es utilizada en soluciones para uso oftalmológico, favoreciendo la reparación del epitelio corneal, debido a la disminución microbiana e inflamación ocular. Los estudios indican que las formulaciones a base de lisozima son particularmente eficaces gracias a su doble acción, lubricante y antimicrobiana. En el área de la dermatología al igual que la oftalmología la lisozima desempeña esta doble función en los apósitos y nanogel para el tratamiento de úlceras diabéticas o cirugías quirúrgicas inhibiendo la formación de películas por patógenos como *Staphylococcus aureus* y *Pseudomonas aeruginosa*, además de promover la regeneración tisular (Sarkar *et al.* 2020). En la producción ganadera la lisozima es utilizada como una alternativa a sistemas libres de antibióticos o como aditivo inmunoestimulante, ya que ayuda a la activación del sistema inmune (Ferraboschi *et al.* 2021). En el campo de la biología molecular, la lisozima es utilizada como un reactivo de lisis celular, ya que por sus propiedades se emplea para digerir la pared celular de peptidoglicano de las bacterias Gram-positivas facilitando la ruptura celular en el aislamiento de plásmidos y estudios de expresión de proteínas.

Discusión académica, consideraciones finales y perspectivas

La lisozima descubierta por Alexander Fleming revolucionó el estudio de las enzimas debido a sus propiedades antimicrobianas, su estabilidad química y la facilidad con la que puede obtenerse y manipularse, lo que ha despertado un gran interés científico e industrial. Además, la disponibilidad natural de esta enzima en fuentes como la clara de huevo de gallina y la leche de burra favorece su producción a gran escala y reduce considerablemente los costos de obtención, permitiendo su incorporación en diversas aplicaciones farmacéuticas, alimentarias y veterinarias. Actualmente, la lisozima ha adquirido especial relevancia en sectores como la ganadería y la acuicultura, donde se perfila como una alternativa sostenible frente al uso excesivo de antibióticos químicos. La lisozima representa un ejemplo único de cómo una biomolécula natural puede transformarse en una herramienta biotecnológica de alto valor. Como perspectiva futura, la lisozima podría desempeñar un papel fundamental en el desarrollo de modelos de producción más sostenibles y seguros, especialmente en industrias donde la reducción de antibióticos es una prioridad internacional.

Conclusiones

El descubrimiento de la lisozima por Alexander Fleming marcó un antes y un después en la comprensión de los mecanismos naturales de defensa de los seres vivos. Mucho antes del auge de los antibióticos sintéticos, esta enzima reveló que la naturaleza ya contaba con herramientas eficaces para combatir microorganismos patógenos de manera selectiva y segura. Su capacidad para romper la pared celular de ciertas bacterias la convierte en un componente clave del sistema inmune de animales y humanos, así como en un valioso recurso biotecnológico.

Agradecimientos

Se agradece al Grupo de Investigación de Inmunología y Vacunología, así como al Grupo de Divulgación científica “Inmuno-peques” del CIBNOR.



Literatura citada

- Carrillo, W. 2013. Lisoizima: Actividad antibacteriana y alergenidad. Actualización en nutrición 14:4.
- Cho, J. H., I. P. Fraser, K. Fukase, S. Kusumoto, Y. Fujimoto, G. L Stahl, A. B. Ezekowitz. 2005. *Human peptidoglycan recognition protein S is an effector of neutrophil-mediated innate immunity*. Blood 106: 2551-2558.
- Ferraboschi, P., S. Ciceri, P. Grisenti. 2021. *Applications of lysozyme, an innate immune defense factor, as an alternative antibiotic*. Antibiotics (Basel) 14(12):1534.
- Gordon, S., J. Todd, Z.A. Cohn. 1974. *In vitro synthesis and secretion of lysozyme by mononuclear phagocytes*. The Journal of Experimental Medicine 1:1228-48.
- Jolles, P., J. Jolles. 1984. *What's new in lysozyme research?* Molecular and Cellular Biochemistry 63:165-189.
- Nawaz, N., S. Wen, F. Wang, S. Nawaz, J. Raza, M. Iftikhar, M. Usman. 2022. *Lysozyme and its application as antibacterial agent in food industry*. Molecules 27(19): 6305.
- Niyonsaba, F., H. Ogawa. 2005. Protective roles of the skin against infection: implication of naturally occurring human antimicrobial agents beta-defensins, cathelicidin LL-37 and lysozyme. Journal Dermatology Science 40(3):157-68.
- Pellegrini, A., U. Thomas, P. Wild, E. Schraner, R. Von Fellenberg. 2000. *Effect of lysozyme or modified lysozyme fragments on DNA and RNA synthesis and membrane permeability of Escherichia coli*. Microbiological Research 155:69-77.
- Prieto, P.J., M.L. Gómez-Lus. 2006. *De la lisoizima a la penicilina: un camino tan complejo como interesante*. Revista Española de Quimioterapia 19:291-294
- Ragland, S.A., A.K. Criss. 2017. *From bacterial killing to immune modulation: Recent insights into the functions of lysozyme*. PLoS Pathogens 13:e1006512.
- Sarkar, S., K. Gulati, A. Mishra, K.M. Poluri. 2020. *Protein nanocomposites: Special inferences to lysozyme based nanomaterials*. International Journal Biological Macromolecules 15:467-482.
- Schadt, I., V.M. Marino. 2023. *Lysozyme – An underexploited molecule with high therapeutic potential but of little interest to the pharmaceutical industry*. Current Research in Complementary and Alternative Medicine 7:188.

Datos de los autores:

- **Martha Reyes Becerril**

Es Ingeniera Zootecnista por la Universidad Autónoma de Baja California Sur y Doctor en Ciencias en Uso, Manejo y Preservación de los Recursos Naturales por el CIBNOR. Actualmente es Técnico Titular C, responsable del Laboratorio de Inmunología y Vacunología, y Directora y Fundadora de Inmuno-peques (grupo de divulgación científica del CIBNOR). Su interés se centra en evaluar plantas medicinales, probióticos, prebióticos como inmunoestimulantes en salud animal. Miembro del SNII nivel 3.

- **Kevyn Guerra**

Es Ingeniero Bioquímico del Tecnológico Nacional de México-Instituto Tecnológico de La Paz. Actualmente realiza un doctorado en el Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste, S.C., adscrito al Programa de Agricultura en Zonas Áridas. Es miembro del Grupo de Inmunología y Vacunología y de Inmuno-peques desde su fundación. Profesor investigador del Instituto Tecnológico de La Paz. Su interés se centra en el estudio de Agrotecnología y la búsqueda de compuestos antimicrobianos en microorganismos aislados de ambientes extremos.

Cita

Reyes-Becerril, M., y K. Guerra. La lisozima de Fleming. Recursos Naturales y Sociedad, 2026. Vol. 12(1): 161-171. <https://doi.org/10.18846/renaysoc.2026.12.12.01.0010>.

Sometido: 31 de enero de 2026

Aceptado: 1 de junio de 2026

Editor asociado: Dr. Arturo Sánchez-Paz

Editor ejecutivo: Dr. Arturo Sánchez-Paz

Diseño gráfico editorial: Ing. Fca. Elizabeth Villegas Carrazco

Measles:
An overlooked risk

Sarampión: Un riesgo olvidado

Arturo Sánchez-Paz¹, Tania Enríquez-Espinoza¹,
Fernando Mendoza-Cano¹ y Trinidad Encinas-García^{1*}

El virus que neutraliza nuestras defensas

El sarampión es una enfermedad de origen viral, altamente contagiosa y potencialmente mortal. Uno de los primeros puntos que vale la pena resaltar en este artículo es que, si bien la letalidad de esta enfermedad es relativamente baja, no es insignificante y, en ciertos casos, puede provocar complicaciones graves, como la encefalitis (Fisher *et al.* 2015). Esta fue la primera enfermedad que se reconoció a nivel mundial por incrementar la susceptibilidad a otras enfermedades en las personas contagiadas (Beckford *et al.* 1985). Esto se debe a que el virus del sarampión es capaz de infectar y destruir un par de tipos celulares del sistema inmune, entre ellos las células T y B de memoria. Estas células son responsables de “reconocer” patógenos específicos. En circunstancias normales, las células T y B de memoria reconocen agentes patógenos a los que previamente se habían enfrentado y envían señales químicas (citocinas) a otras células del sistema inmune (como los macrófagos o las células T citotóxicas), para destruirlos eficientemente. Al “recordar” a los patógenos, esta estrategia inmunitaria permite generar una reacción más rápida contra los invasores y resulta casi imposible enfermarse más de dos veces por el mismo patógeno. Aún más, gracias a estas células las vacunas son tan efectivas para evitar los peligrosos efectos de los agentes patógenos que nos rodean. Sin embargo, cuando el virus del sarampión destruye estas células de memoria, se interrumpe el envío de señales químicas y las células encargadas de destruir el patógeno no reciben la información que las activa. Entonces, el sistema inmune es “neutralizado” y no hay defensa contra el ataque de otros agentes patógenos oportunistas.

¹ Laboratorio de Virología. Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste (CIBNOR). Campus Hermosillo. Hermosillo, Sonora, C.P. 83106 México.

* Autor de correspondencia: tencinas@cibnor.mx

Así, el sarampión induce una supresión inmunitaria profunda y prolongada, denominada “*amnesia inmunitaria*” (como resultado, las personas infectadas pueden ser vulnerables, por varios meses o años después de la infección con este virus, a prácticamente cualquier otro virus que hayan enfrentado y superado en el pasado, así como a nuevas infecciones). Actualmente se reconoce que la mayoría de las muertes relacionadas con el sarampión se deben a complicaciones derivadas de infecciones secundarias, en particular neumonía o diarrea, causadas por otros agentes infecciosos oportunistas, como otros virus o bacterias (Moss y Griffin, 2006).

Cronología de una “pequeña plaga”

El sarampión es una enfermedad causada por un virus que pertenece a la familia *Paramyxovirus* y al género *Morbillivirus* (Fig. 1). El nombre del género deriva del nombre que se le dio en Europa durante la Edad Media, cuando el sarampión se denominaba con la palabra latina “*morbili*” (diminutivo de “*morbus*”) que significa “*pequeña enfermedad o pequeña plaga*”, con el propósito de distinguirla de enfermedades más mortales, como la viruela (Berche, 2022). A partir de 2022, el Comité Internacional de Nomenclatura de los Virus (ICTV) denominó oficialmente a este virus como *Morbillivirus hominis* (MeV). Otros virus del género *Morbillivirus* incluyen a los que causan la peste bovina (*Morbillivirus pecoris*), la peste de pequeños rumiantes (como ovejas y cabras, *Morbillivirus caprinae*) y el moquillo canino (*Morbillivirus canis*).

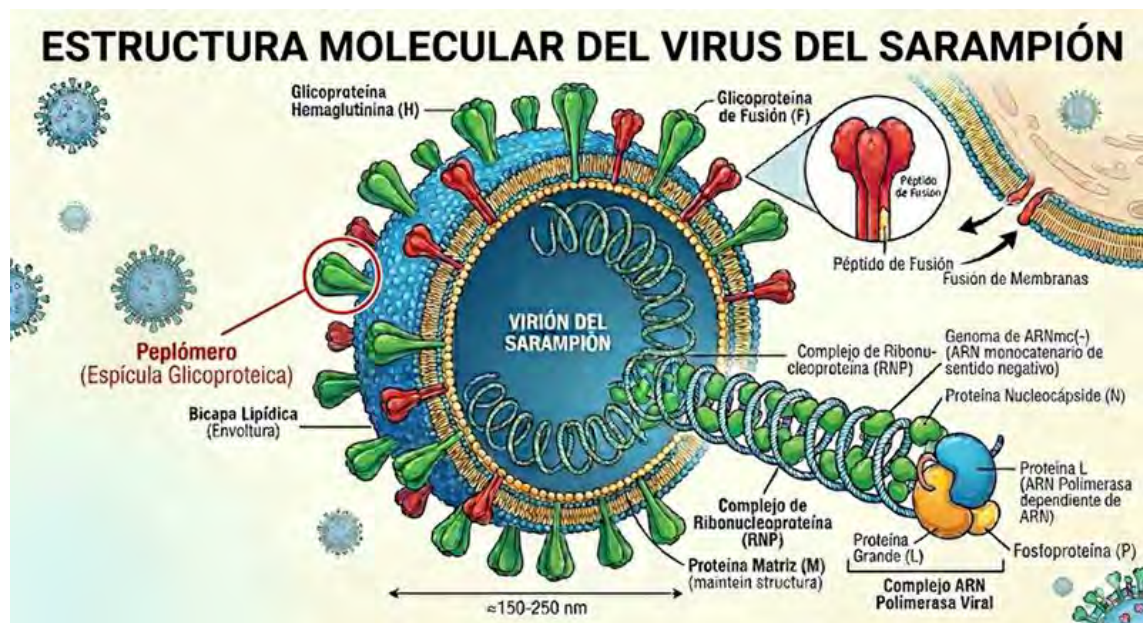


Figura 1. Esquema de la estructura del virus del sarampión (*Morbillivirus hominis* (MeV)): Partícula viral envuelta por una bicapa lipídica y proteínas de matriz (M) y por las glucoproteínas H (hemaglutinina) y F (fusión), responsables de la unión a la célula y de la fusión de membranas durante la infección. En el interior se encuentra la nucleocápside helicoidal formada por el ARN monocatenario de sentido negativo asociado a las proteínas N, P y L, que intervienen en la protección del genoma y en los procesos de transcripción y replicación viral.

Si bien el MeV es un patógeno que solamente infecta a humanos, su historia evolutiva no comenzó en nuestra especie. Como ha ocurrido con muchas otras enfermedades que afectan al ser humano, la evidencia acumulada sugiere que el virus del sarampión tiene un origen zoonótico, es decir, se originó a partir del contacto entre humanos y un grupo específico de animales domésticos: los bovinos. Los estudios genéticos más recientes proponen que el sarampión surgió cuando su pariente más cercano, el *Morbillivirus pecoris*, se transmitió de vacas a humanos, aunque la direccionalidad de este evento de transmisión entre especies no se ha establecido formalmente (Düx *et al.* 2020). Un dato interesante sobre este evento es el descrito por algunos estudios epidemiológicos que señalan que un requisito para que este virus pudiera persistir en el tiempo, es que su aparición ocurriera en una población humana de al menos varios cientos de miles de personas; sin embargo, las poblaciones de ese tamaño no existieron sino hasta hace unos 11,000 años, con el desarrollo de la agricultura (Diamond, 1997). En un estudio más reciente para determinar la fecha de divergencia entre el virus del sarampión y el de la peste bovina, se propuso que ambas especies divergieron en el siglo VI a. C., y a partir de entonces se estableció en las poblaciones humanas (Fig. 2). Es decir, este virus pudo haber surgido hace unos 2600 años, un momento decisivo para la urbanización, marcado por el surgimiento de las ciudades más grandes e influyentes que existieron en el mundo en ese momento, y cuyo crecimiento poblacional fue impulsado por los excedentes agrícolas, la tecnología del hierro y la expansión de las redes comerciales (Düx *et al.* 2020).

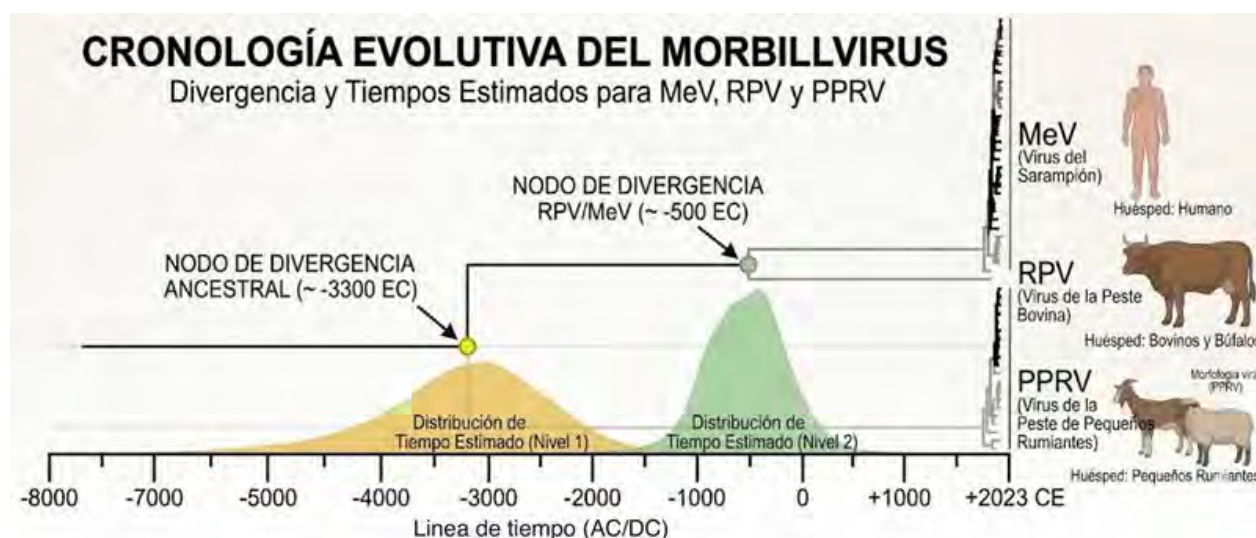


Figura 2. Reconstrucción cronológica y evolutiva del género *Morbillivirus*, incluyendo el virus del sarampión (MeV), el virus de la peste bovina (RPV) y el virus de la peste de los pequeños rumiantes (PPRV). Se indica un nodo de divergencia ancestral estimado en torno a ~3300 AEC, a partir del cual evolucionaron diferentes linajes del grupo. Posteriormente, se observa un evento de divergencia entre RPV y MeV, estimado en ~500 EC.



La alta transmisibilidad del sarampión

El MeV es muy eficaz en el proceso que emplea para infectar al ser humano. Este virus se transmite cuando una persona infectada estornuda o tose en presencia de individuos que no han sido infectados, es decir, no requiere que ocurra algún tipo de contacto físico entre personas. Además, de acuerdo con dos estudios experimentales, este virus mantiene sus propiedades infectivas durante 29-120 minutos (Wellham *et al.* 2026) y sólo requiere la inhalación por parte de un hospedero susceptible para establecer una nueva infección. La información actual sugiere que una sola persona infectada con sarampión podría infectar a entre 12 y 18 personas (por supuesto, sólo si todas fueran susceptibles a la enfermedad, es decir, si no se hubieran vacunado o no se hubieran infectado previamente de sarampión). Esta enfermedad es tan contagiosa que el 90 % de las personas que no han adquirido inmunidad contra ella contraerán el sarampión al entrar en contacto con una persona infectada. Un hecho siniestro de la enfermedad es que, si bien es altamente contagiosa, requiere un periodo relativamente largo para que una persona recién infectada desarrolle los primeros síntomas. Tras una exposición inicial, pueden transcurrir entre 10 y 12 días para que se manifiesten los primeros síntomas de la enfermedad. Es decir, este patógeno posee las características ideales para desencadenar una epidemia: es altamente contagioso y pasa desapercibido por un largo periodo en el que se dispersa ampliamente.

La forma del enemigo

Después de describir algunos de los terribles daños que puede provocar este virus en los humanos, sería muy fácil imaginarlo como un ente de figura ladina y perversa, pero no es así. El virus del sarampión posee una simplicidad sorprendente. Si bien el virus fue descubierto en 1911 por John Anderson y Joseph Goldberger y aislado hasta 1954 por Thomas Peebles y John Enders, no fue sino hasta finales de la década de 1950 y principios de la de 1960 cuando se observó por vez primera con éxito mediante microscopía electrónica.

Para sorpresa de muchos, este virus, que es aproximadamente esférico, no tiene una morfología uniforme, sino que presenta múltiples formas y tamaños (a esto se le llama *pleomórfico*) y apenas mide entre 100 y 300 nanómetros (es decir, si un milímetro se dividiera en un millón de partes, el tamaño del virus ocuparía sólo entre 100 y 300 de esas partes). En su parte más externa, el virus está cubierto por una envoltura de lipoproteínas caracterizada por unas proyecciones superficiales cortas, llamadas peplómeros (o espículas), formadas por dos tipos de proteínas: los peplómeros F están formados por la proteína de fusión (F) que fusiona la membrana del virus y la de la célula del

hospedero lo que induce la penetración del virus al interior de la célula, y los peplómeros H, constituidos por la hemaglutinina (H), son cónicos y su función principal es reconocer el sitio en el que el virus debe “*anclarse*” antes de ingresar a la célula (es decir, un fragmento específico de la hemaglutinina viral hace contacto con una proteína de la superficie celular y “*recibe*” al virus). La envoltura viral cubre una nucleocápside interna helicoidal y el genoma del virus, que consiste en una sola hebra de ARN de sentido negativo (ARN(-)) (Fig. 3). El hecho de que este virus posea este tipo de genoma significa que sus genes no pueden traducirse directamente en proteínas, y para generar un ARN funcional, utiliza una enzima propia, la ARN polimerasa dependiente de ARN (RdRp). Esta enzima le permite al virus transcribir el ARN(-) a ARN de sentido positivo (ARN(+) o ARNm), permitiendo finalmente la síntesis de las seis proteínas virales. Solamente para comprender la simplicidad de este virus, basta con mencionar que la mosca de la fruta (*Drosophila melanogaster*) posee entre 13,600 y 15,600 genes. Es sorprendente que una bolsa proteica llena de ARN pueda causar tanto daño.

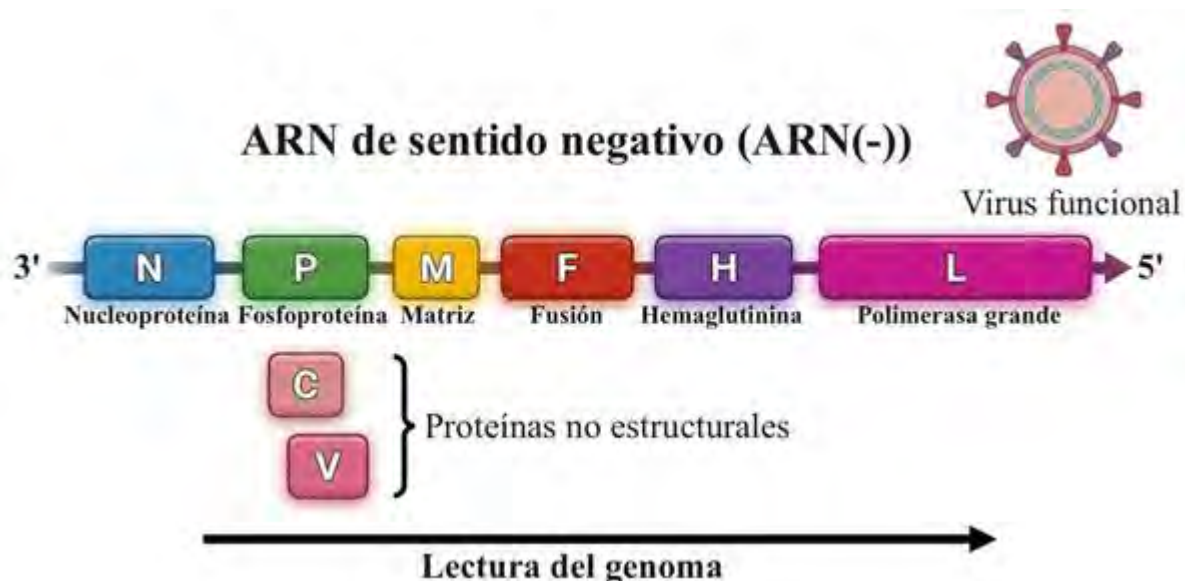


Figura 3. El genoma del virus del sarampión es de ARN monocatenario lineal de sentido negativo. Codifica las proteínas estructurales N, P, M, F, H y L. N: Proteína de la nucleocápside del virus (estructura helicoidal flexible que se liga con el ARN(-) viral); P: Fosfolipasa (componente esencial de la nucleocápside viral que forma un complejo funcional con la gran proteína polimerasa (L) para la replicación y transcripción del ARN viral); M: Proteína de matriz (componente estructural y funcional esencial situado entre la envoltura lipídica del virus y su nucleocápside interna. Desempeña un papel crucial en la organización, ensamblaje y gemación del virus, además de regular la síntesis de ARN viral); F: Proteína de fusión (glicoproteína estructural de superficie que permite la entrada del virus en la célula hospedera mediante la fusión de la envoltura vírica con la membrana celular); H: hemaglutinina (glicoproteína de envoltura responsable de la unión a receptores celulares (SLAM, Nectin-4) y de activar la fusión de membrana. Fundamental para la entrada del virus a la célula); y L: Proteína grande (ARN polimerasa dependiente de ARN (RdRp) esencial para la transcripción y replicación del genoma viral). A partir del gen P se codifican las proteínas no estructurales C y V, que participan en la regulación de la replicación viral y en la interacción con la respuesta inmune del hospedero.



El blanco celular del sarampión

Se entiende por *tropismo celular* la capacidad específica de un virus para infectar y replicarse en ciertos tipos celulares de un hospedero. Es, en términos coloquiales, la preferencia que tienen los virus por ciertos tipos específicos de células en las que pueden replicarse. Por supuesto, los virus no tienen la capacidad real de elegir que células les resultan más útiles o propicias para sus fines. El tropismo celular está determinado principalmente por la afinidad entre algunas moléculas presentes en la superficie viral (como los peplómeros del sarampión) y los receptores que cubren la superficie de la célula huésped. Como se mencionó anteriormente, el virus del sarampión tiene una fuerte preferencia por las células B y T de memoria. Esto se debe a que estas células poseen en su superficie una proteína llamada “*molécula de activación linfocítica señalizadora*” (SLAM o CD150), que es, precisamente, uno de los receptores que reconoce el virus del sarampión para “*anclarse*” a la célula y comenzar el proceso infectivo. Así, otras células que poseen este receptor en su superficie, como los monocitos y las células dendríticas, también pueden ser infectadas por el MeV. Vale la pena mencionar que, al igual que las células T y B de memoria, los monocitos y las células dendríticas también forman parte del amplio arsenal de nuestro sistema inmune.

Sin embargo, el virus del sarampión puede infectar otras células. Nuestro tracto respiratorio está revestido por un epitelio constituido por diferentes tipos de células y en todas ellas se presenta una proteína, la nectina-4, cuya función es facilitar la adhesión célula-célula (es debido a estas uniones célula-célula que se mantiene la integridad de los tejidos). Esta es, sin duda alguna, una de las estrategias adaptativas más interesantes. En algún momento de su historia evolutiva, alguna o algunas mutaciones en la hemaglutinina viral produjeron un cambio que favoreció su uso para ligarse a la nectina-4, utilizándola como un receptor. Al infectar las células del tracto respiratorio mediante el reconocimiento de la nectina-4, poco a poco, pero de forma constante, cuando comienza la destrucción de las células epiteliales del tracto respiratorio, las partículas virales recién formadas se acumulan en el moco nasal y en la garganta. Es en el momento en que el virus del sarampión es liberado en las vías respiratorias cuando comienza su transmisión mediante la tos y los estornudos de las personas infectadas. Este proceso es fundamental para que el virus sea tan contagioso (Lin et al. 2021; Brockhurst et al. 2025).

La hora de buscar ayuda médica

Antes de comenzar, es importante recomendar que, en caso de sospechar la posibilidad de estar infectado con sarampión, se busque asistencia médica calificada. También se recomienda no

automedicarse, ya que es una práctica peligrosa que puede ocultar enfermedades graves, provocar reacciones adversas o generar resistencia a los antibióticos. Tomar medicamentos sin supervisión médica pone en riesgo la salud, quizá más que la propia infección por sarampión.

Unos 12 días después de haber compartido el espacio con alguien infectado con sarampión, comienza la fase prodrómica o fase inicial de la enfermedad, caracterizada por la aparición de síntomas tempranos, inespecíficos y leves que preceden a las manifestaciones clínicas más severas. Durante esta fase los individuos infectados presentan fiebre alta (hasta 40 °C), un malestar corporal intenso y la tríada clásica: tos, escurrimiento nasal y conjuntivitis. También suelen aparecer las manchas de Koplik en la parte interna de la boca. Esta es la etapa de mayor contagio.

Días después, aparecen las erupciones cutáneas típicas de esta enfermedad en la línea del cabello, detrás de las orejas, y en la cara, y gradualmente comienzan a manifestarse en el cuello, el tronco, los brazos, las piernas y los pies (Fig. 4). Generalmente estas erupciones, manchas rojas planas y ligeramente protuberantes, no causan comezón, como ocurre con la varicela, y pueden desaparecer 4-5 días después de manifestarse, pudiendo provocar una descamación leve.

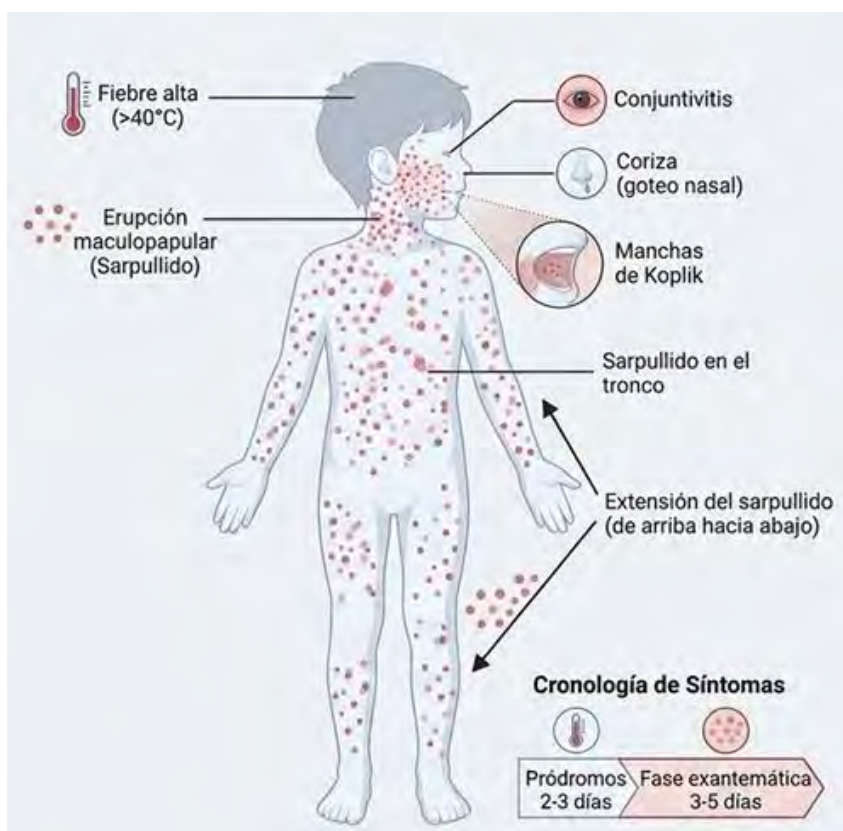


Figura 4. Manifestaciones clínicas y progresión del sarampión. El periodo prodrómico se caracteriza inicialmente por un lapso de 2–3 días, con fiebre alta, secreción nasal, conjuntivitis y manchas de Koplik en la mucosa oral. El período exantemático se caracteriza por la aparición de sarpullidos que comienzan en la cara y se extienden progresivamente hacia el tronco y las extremidades durante los siguientes 3–5 días.



Simplemente, ¡vacúnate!

México sufre actualmente un brote significativo de sarampión que se ha extendido a los 32 estados de la República. La mayor concentración de casos ha ocurrido en Chihuahua y Jalisco. Desde el inicio del brote, se han confirmado cerca de 11,400 casos a nivel nacional (que lamentablemente han provocado 41 defunciones), junto con un número muy elevado de casos probables que continúan bajo investigación. Lo que es claro es que este brote no es resultado de la casualidad, se debe a una desafortunada disminución en las coberturas de vacunación infantil en los últimos años. Cuando las campañas de vacunación se reducen y no cubren niveles significativos de la población, se incrementa la probabilidad de que este y otros virus encuentren condiciones ideales para su propagación. Por supuesto, este brote provocó que actualmente las autoridades sanitarias del país mantengan una alerta epidemiológica e impulsen la vacunación.

Las vacunas son, sin duda, una de las herramientas médicas más esenciales y preventivas para proteger la salud humana y animal que existen actualmente. Sin embargo, pese a sus beneficios claramente demostrados, su uso ha generado, injusta e innecesariamente, abundante controversia pública (que, con argumentos triviales y sin evidencia científica, raya en lo superficial en la mayoría de los casos).

Sin intentar justificar los infundados y pueriles argumentos de aquellos que consideran peligrosas las vacunas (hoy llamados “*antivaxers*”), sus creencias dudosas podrían estar torpemente influenciadas por información surgida hace ya casi tres décadas (y que no se han tomado el tiempo de analizar).

En 1998, el médico británico Andrew Wakefield y 12 autores más publicaron un artículo en la prestigiosa revista médica británica *The Lancet* que sugería que la vacuna provocó alteraciones intestinales (como hiperplasia nodular linfoide o úlceras) que indujeron una deficiencia de vitamina B12, lo que pudo ser un factor importante en el desarrollo de desórdenes del comportamiento, como el autismo (Wakefield et al. 1998). La forma en que está escrito el artículo es muy interesante: los autores describen gradualmente una amplia variedad de “*evidencias*” que sugieren una asociación entre la vacuna y el autismo. Sin embargo, cerca del final, en un párrafo escueto, los autores mencionan claramente que “*no se ha demostrado una asociación entre la vacuna contra el sarampión, las paperas y la rubéola y el síndrome descrito*”.

Como era de esperar, la publicación del estudio de Wakefield generó gran ansiedad entre la población, lo que derivó en una agresiva campaña de rechazo contra la vacuna. Cuando se analiza en retrospectiva el desarrollo de esta historia, no deja de llamar la atención el sesgo que adoptó. Casi un año antes, se publicó un artículo en la misma revista con un mejor diseño experimental, en el que los autores no encontraron una asociación entre la vacuna contra el sarampión y la ocurrencia de eventos neurológicos agudos en niños (Miller *et al.* 1997). Por otro lado, siguiendo el protocolo para la publicación de los manuscritos sometidos, el entonces editor de *The Lancet*, Richard Horton, envió el manuscrito a revisión por pares (es decir, cuando un editor recibe un manuscrito, los editores lo envían a otros investigadores que trabajan temas relacionados al del manuscrito recibido, y ellos hacen sugerencias respecto a la estructura del manuscrito, la solidez metodológica, la reproducibilidad de los datos, el diseño experimental, y la relevancia de las conclusiones, entre otras cosas cosas). Algunos de los revisores expresaron su preocupación por el número de individuos estudiados (11 niños y una niña son una muestra muy pequeña), los métodos empleados y las interpretaciones del estudio, así como por la posibilidad de que el artículo pudiera debilitar la confianza del público en las vacunas. Pese a esta opinión, Horton decidió publicar el artículo, justificándose años después en que el estudio planteaba una hipótesis importante, aunque controvertida, que merecía ser discutida y estudiada a profundidad, y consideró que no haberla publicado habría sido una forma de censura. Y de ahí, la hecatombe.

Finalmente, para brindar una imagen de todo lo burdo que rodeó esta historia, hay que mencionar que años después, el reportero Brian Deer del periódico británico *The Sunday Times* publicó una serie de artículos en los que reveló un grave conflicto de intereses con el artículo de Wakefield. En los meses previos a que se publicara dicho artículo, Wakefield había recibido un primer pago por £50,000 (de un total acordado de £400,000) por una firma legal que preparaba una demanda contra la compañía productora de la vacuna. El estudio publicado podría utilizarse como evidencia en la corte, lo que haría que la compañía se viera obligada a pagar una fortuna en compensaciones. Además, Deer descubrió que Wakefield poseía una patente de una vacuna simple contra el sarampión, por lo que desacreditar la vacuna triple le habría resultado muy lucrativo. Por último, se demostró que los 12 niños que participaron en el estudio fueron reclutados específicamente a través de contactos legales para construir un caso contra la vacuna. Esto motivó a que *The Lancet* retirara el artículo en 2010 y al Consejo Médico General, un órgano independiente británico regulador de los médicos, a retirar la licencia para continuar ejerciendo la carrera de medicina en Wakefield. Pero el daño estaba hecho. Los efectos negativos de esta publicación repercuten hasta hoy. A pesar del consenso científico de que no existe relación entre el uso de la vacuna triple y la aparición de



trastornos del espectro autista, un estudio realizado en 2010 reveló que 1 de cada 4 padres en los Estados Unidos aún cree que las vacunas causan autismo (Freed et al. 2010).

Hoy, tras acumular una extraordinaria masa de evidencia, la comunidad científica mundial ha dejado claro que no existe ninguna relación entre la vacuna triple y el autismo. Los rumores, noticias falsas o comentarios de los llamados *influencers* sin preparación médica que abundan en las redes sociales, vinculando la vacuna triple al autismo, carecen de certeza científica. Es importante recalcar que la vacuna es la herramienta más efectiva para evitar las complicaciones graves, como la neumonía o la encefalitis, que puede causar el sarampión.

Referencias

- Beckford, A.P., R.O.C. Kaschula y C. Stephen. 1985. *Factors associated with fatal cases of measles: A retrospective autopsy study*. South African Medical Journal 68: 858–863.
- Berche, P. 2022. *History of measles*. Presse Medicale 51(3): 104149.
- Brockhurst, J.K., B.E. Salicciolia y D.E. Griffin. 2025. *Sphingosine-1-phosphate signaling mediates shedding of measles virus-infected respiratory epithelial cells*. Journal of Virology 99(4): e0188024.
- Diamond, J. 1997. *Guns, germs, and steel: The fates of human societies*. New York: W. W. Norton & Co. pp. 480.
- Düx, A., S. Lequime, L.V. Patrono, B. Vrancken, S. Boral, J.F. Gogarten, A. Hilbig, D. Horst, K. Merkel, B. Prepoint, S. Santibanez, J. Schlotterbeck, M.A. Suchard, M. Ulrich, N. Widulin, A. Mankertz, F.H. Leendertz, K. Harper, T. Schnalke, P. Lemey y S. Calvignac-Spencer. 2020. *Measles virus and rinderpest virus divergence dated to the sixth century BCE*. Science 368(6497): 1367–1370.
- Fisher, D.L., S. Defres y T. Solomon. 2015. *Measles-induced encephalitis*. QJM 108(3): 177–82.
- Freed, G.L., S.J. Clark, A.T. Butchart, D.C. Singer y M.M. Davis. 2010. *Parental vaccine safety concerns in 2009*. Pediatrics 125(4):654–659. doi: 10.1542/peds.2009-1962.
- Lin, W.W., A.J. Tsay, E.N. Lalime, A. Pekosz y D.E. Griffin. 2021. *Primary differentiated respiratory epithelial cells respond to apical measles virus infection by shedding multinucleated giant cells*. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America 118(11): e2013264118.
- Miller, D., J. Wadsworth, J. Diamond y E. Ross. 1997. *Measles vaccination and neurological events*. Lancet 349(9053): 730–731.

- Moss, W.J., y D.E. Griffin. 2006. *Global measles elimination*. Nature Reviews Microbiology 4: 900–908.
- Wakefield, A.J., S.S. Murch, A. Anthony, J. Linnell, D.M. Casson, M. Malik, M. Berelowitz, A.P. Dhillon, M.A. Thomson, P. Harvey, A. Valentine, S.E. Davies y J.A. Walker-Smith. 1998. *Ileal-lymphoid-nodular hyperplasia, non-specific colitis, and pervasive developmental disorder in children*. Lancet 351(9103):637–641.
- Wellham, H.F., S. Gillani, F.N. Ameaka, E.A. Campbell, E.S. Toner, S. Ravi, S. Soneja y C.M. Rivers. 2026. *A systematic review to guide measles exposure periods for contact tracing*. EBioMedicine 124: 106138.

Cita

Sánchez-Paz, A., T. Enriquez-Espinoza, F. Mendoza-Cano y T. Encinas-García. Sarampión: Un riesgo olvidado. Recursos Naturales y Sociedad, 2026. Vol. 12(1): 173-183.
<https://doi.org/10.18846/renaysoc.2026.12.12.01.0011>

Sometido: 13 de marzo de 2026

Aceptado: 2 de junio de 2026

Editora asociada: Dra. Crisalejandra Rivera-Pérez

Editora ejecutiva: Dra. Crisalejandra Rivera-Pérez

Diseño gráfico editorial: Ing. Fca. Elizabeth Villegas Carrasco

From waste to value:
the hidden antioxidant power of marine by-products

Del desperdicio al valor: el poder antioxidante oculto en los subproductos marinos

Isaias de Jesús Llamas-López¹, Cynthia Esmeralda Lizárraga Velázquez²,
Amada Yerén Escobedo-Lozano², Asahel Benitez-Hernández^{1*}

Resumen

En la industria pesquera, una proporción significativa de especies como el atún y el camarón no se destina al consumo directo, sino que se descarta en forma de subproductos marinos como cabezas, carne oscura, pieles y vísceras. Sin embargo, estos residuos aún conservan una elevada concentración de proteínas y compuestos bioactivos como los péptidos con potencial antioxidante. El aprovechamiento de estos subproductos representa una estrategia clave para reducir el desperdicio y avanzar hacia modelos productivos más sostenibles. En este contexto el presente trabajo describe de forma general cómo se obtienen estos péptidos, cómo actúan como antioxidantes y cuál es su potencial en la conservación de alimentos, donde pueden contribuir a prolongar la vida útil como una alternativa natural frente a los antioxidantes sintéticos.

Palabras clave: residuos pesqueros, hidrólisis enzimática, compuestos bioactivos, capacidad antioxidante, oxidación.

¹Facultad de Ciencias del Mar, Universidad Autónoma de Sinaloa, Av. Paseo Claussen S/N. Col. Los Pinos, C.P. 82000, Mazatlán Sinaloa, México.

²Tecnológico Nacional de México. Instituto Tecnológico de Mazatlán. Av. Corsario 1, #203 Col. Urías, C.P. 82070, Mazatlán Sinaloa, México.

* Autor de correspondencia: asahelbenitez_facimar@uas.edu.mx



Abstract

In the fishing industry, a significant proportion of species such as tuna and shrimp is not used for direct human consumption but is instead discarded as marine by-products, including heads, dark meat, skin, and viscera. However, these materials still contain high levels of proteins and bioactive compounds, such as peptides with antioxidant potential. The utilization of these by-products represents a key strategy to reduce waste and advance toward more sustainable production models. In this context, this work aims to provide a general overview of the main methods for obtaining bioactive peptides, their antioxidant mechanisms of action, and their potential applications in food preservation. These compounds can contribute to extending shelf life, offering a natural alternative to synthetic antioxidants.

Keywords: fishery waste, enzymatic hydrolysis, bioactive compounds, antioxidant capacity, oxidation.

Antecedentes

¿De dónde vienen los subproductos marinos?

Para entender su potencial, primero es necesario conocer cómo es que se originan. Durante el procesamiento de especies como el atún y el camarón, no todas las partes del organismo se destinan para consumo directo. En la mayoría de los casos, la industria se enfoca en el músculo comestible o en las partes más “atractivas” del organismo. Como resultado, estructuras como cabezas, piel, vísceras, carne oscura y espinas son separadas y descartadas durante el procesamiento. Se estima que estos subproductos representan entre el 40 y el 60 % del peso total de los organismos procesados, generando cientos de miles de toneladas anualmente. Esta situación cobra mayor relevancia cuando se considera el volumen de producción pesquera en México. Según datos oficiales, el camarón representa una de las principales especies de la acuicultura nacional, teniendo una producción superior a las 273 mil toneladas por año, mientras que el atún supera las 150 mil toneladas por año en pesca de captura (CONAPESCA, 2024). Estas

cifras nos permiten dimensionar la cantidad de materia prima que se procesa y sugieren que, en conjunto ambas especies podrían generar alrededor de 200 mil toneladas de subproductos al año.

En el caso del atún, por ejemplo, la industria suele centrarse en la obtención de lomos, esto nos deja una gran cantidad de residuos como carnes negras, cabezas, esqueletos y otros tejidos. Normalmente, estos subproductos no se destinan a consumo humano directo, sino que son procesados para usos de gran valor en cadenas productivas; por ejemplo, los subproductos de atún son convertidos en harina, ensilados, hidrolizados y aceite de pescado, que principalmente se utilizan para alimentación animal en acuicultura y ganadería debido a su alto contenido proteico, perfil de aminoácidos y lípidos. Estos productos representan una de las principales formas de valorización industrial de los residuos pesqueros (Fernández, 2021; García *et al.* 2020). De manera similar, en el camarón, el descabezado y pelado generan subproductos como cabezas, caparazones y vísceras, que representan una fracción importante del peso total del organismo. En términos generales, se estima que entre el 30 % y el 60 % del peso total de los organismos pesqueros pueden convertirse en subproductos (FAO, 2022) que finalmente son considerados como residuos. La acumulación de estos materiales representa un desafío importante para la industria pesquera y acuícola, ya que su alto contenido de materia orgánica favorece una rápida descomposición, generando malos olores, proliferación de microorganismos y contaminación del agua y del suelo cuando no se manejan adecuadamente.

El manejo inadecuado de estos subproductos puede generar impactos ambientales negativos; sin embargo, cuando se abordan desde una perspectiva de aprovechamiento, dejan de considerarse desechos. En este sentido, comprender cómo se generan es un paso fundamental para replantear su uso dentro de sistemas productivos más eficientes y sostenibles.

Frente a este panorama, surge una pregunta clave: ¿se pueden aprovechar mejor estos residuos? Una de las alternativas más prometedoras es la obtención de compuestos bioactivos, los cuales exhiben múltiples beneficios en la salud de los consumidores. Los compuestos bioactivos pueden añadirse a alimentos funcionales o usarse como nutraceuticos, que son productos naturales que, además de nutrir, pueden ayudar a mejorar la salud. Así, se pueden aprovechar mejor los residuos pesqueros en lugar de darles solo usos tradicionales en la producción de harina, aceite de pescado o alimento para animales. (Sila y Bougatef, 2016) (Fig. 1).



Figura 1. Desperdicios de subproductos de atún y camarón en la industria pesquera.

Compuestos bioactivos: ¿qué son y por qué importan?

Los compuestos bioactivos son moléculas presentes en los alimentos que, además de nutrir, pueden generar efectos positivos en la salud. Por ejemplo, pueden tener propiedades antiinflamatoria, antidiabética, antihipertensiva, antimicrobiana y antioxidante (Xavier *et al.* 2024) por lo que podrían beneficiar la salud de los consumidores. En los subproductos del atún y el camarón, los compuestos bioactivos están ligados a componentes naturales como proteínas, lípidos y pigmentos, lo que los convierte en una fuente valiosa de aprovechamiento más allá de su condición de residuo. En particular, las proteínas pueden transformarse mediante la ruptura de la molécula por la acción del agua, en péptidos con actividades biológicas, entre ellas la antioxidante, lo que amplía su interés en aplicaciones alimentarias. A su vez, los lípidos, especialmente los ácidos grasos omega-3 como el ácido eicosapentaenoico (EPA) y el ácido docosahexaenoico (DHA), destacan por sus efectos benéficos en la salud cardiovascular, mientras que pigmentos como los carotenoides, incluyendo la astaxantina, han sido asociados con una alta capacidad antioxidante y protección frente al daño oxidativo. (Honrado *et al.* 2022) (Fig. 2).



Figura 2. Compuestos bioactivos derivados de subproductos de atún y camarón.

Por otra parte, cabe destacar que la propiedad antioxidante ha sido bastante estudiada debido a su relación con la estabilidad de los alimentos y la prevención de su deterioro. De manera general, los antioxidantes son compuestos capaces de inhibir o retrasar procesos de oxidación al interactuar con radicales libres (moléculas inestables que dañan células), evitando así reacciones en cadena que afectan la calidad de los alimentos. La oxidación es un proceso químico indeseable que ocurre en la vida cotidiana. Se presenta cuando el oxígeno reacciona con componentes de alimentos, especialmente grasas, generando cambios que deterioran las características sensoriales y nutricionales de los alimentos. Un caso común que permite observar este fenómeno es el oscurecimiento de una fruta después de cortarla o la aparición de olores rancios en aceites almacenados por largos periodos (Kurek *et al.* 2022).

Actualmente, en la industria alimentaria se utilizan antioxidantes sintéticos como el BHA (butilhidroxianisol) y el BHT (butilhidroxitolueno), los cuales pueden encontrarse en productos de consumo cotidiano como aceites, papas fritas, mayonesa, cereales y alimentos procesados con alto contenido de grasa. Estos compuestos han sido evaluados por organismos internacionales de seguridad alimentaria, como la EFSA (Autoridad Europea de Seguridad Alimentaria), la cual ha establecido una ingesta diaria aceptable de 0.5 mg por kg de peso corporal al día para el BHA y 0.25 mg por kg de peso corporal al día para el BHT, lo que representa la cantidad máxima que puede consumirse diariamente sin riesgo para la salud (EFSA, 2012).



Por ello, su uso está regulado y se establecen límites de consumo diario que no deben superarse. En este contexto, ha surgido un mayor interés por buscar alternativas naturales de antioxidantes que puedan complementar o sustituir a los sintéticos en la industria alimentaria.

Péptidos antioxidantes: ¿Qué son y cómo se obtienen?

Estos compuestos bioactivos pueden obtenerse de los subproductos marinos del atún y el camarón. Pero ¿qué son exactamente? Son fragmentos pequeños de proteínas, formados generalmente por cadenas de 2 a 20 aminoácidos. Para obtenerlos, es necesario “romper” proteínas más grandes mediante un proceso llamado hidrólisis (Montero-Barrantes, 2021). La hidrólisis enzimática es el método principalmente usado para la obtención de péptidos. En este proceso se utilizan enzimas proteolíticas como la alcalasa, pepsina, tripsina o papaína, las cuales actúan como “tijeras biológicas” que cortan en sitios específicos de las proteínas dependiendo de su afinidad, permitiendo así la obtención de péptidos de distinto tamaño y composición, así como aminoácidos libres (Fig. 3).

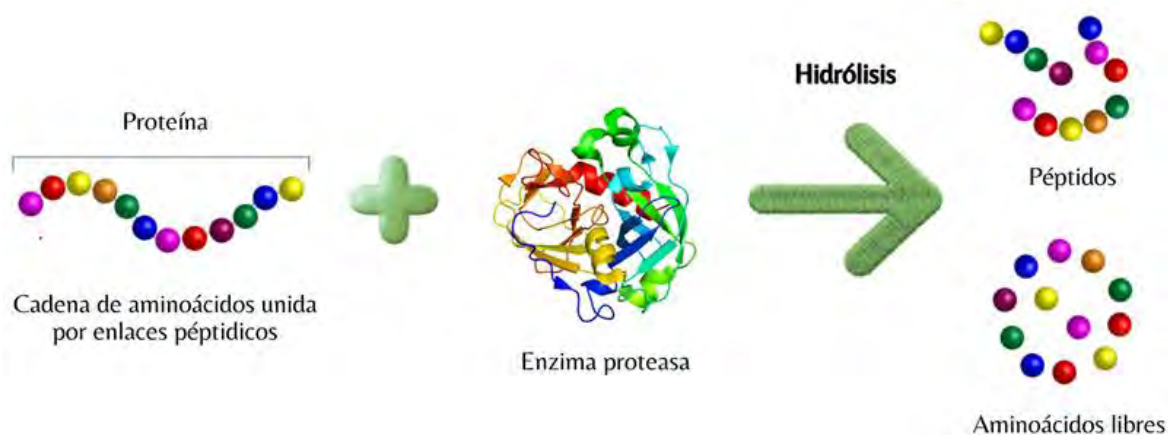


Figura 3. Obtención de péptidos y aminoácidos a partir de una hidrólisis enzimática. Durante este proceso, las enzimas proteasas fragmentan las proteínas en moléculas más pequeñas, generando péptidos y aminoácidos libres.

Una vez liberados, estos pueden presentar actividad antioxidante, lo que significa que son capaces de participar en la estabilización de radicales libres y contribuir a la protección frente al daño celular.

En especies marinas como el atún y el camarón, es posible obtener este tipo de compuestos bioactivos. Por ejemplo, los subproductos del camarón pueden contener entre el 20 y 40 % de proteína, y de ellos se han obtenido péptidos ricos en aminoácidos como histidina, glicina y tirosina, relacionados con una mayor actividad antioxidante (Liu *et al.* 2024). Además, no solo aportan proteínas, sino también otros compuestos de interés como la quitina, ácidos grasos como los

omega-3 y carotenoides como la astaxantina, conocida por su potente efecto antioxidante, incluso superior al de la vitamina E (Cabanillas-Bojórquez *et al.* 2024). Todo esto nos lleva a replantear la forma en que vemos estos materiales, ya que los subproductos de atún y camarón no deben considerarse únicamente residuos, sino materias primas con un alto potencial biotecnológico.

¿Cómo actúan los péptidos antioxidantes?

Antes de evaluar su actividad, es importante entender cómo actúan los péptidos antioxidantes. De manera sencilla, estas moléculas funcionan como una especie de “defensa”, ya que pueden donar electrones o átomos de hidrógeno a los radicales libres, estabilizándolos antes de que reaccionen con otras moléculas del organismo. De esta forma, ayudan a interrumpir las reacciones de oxidación que pueden causar daño celular (Fig. 4).

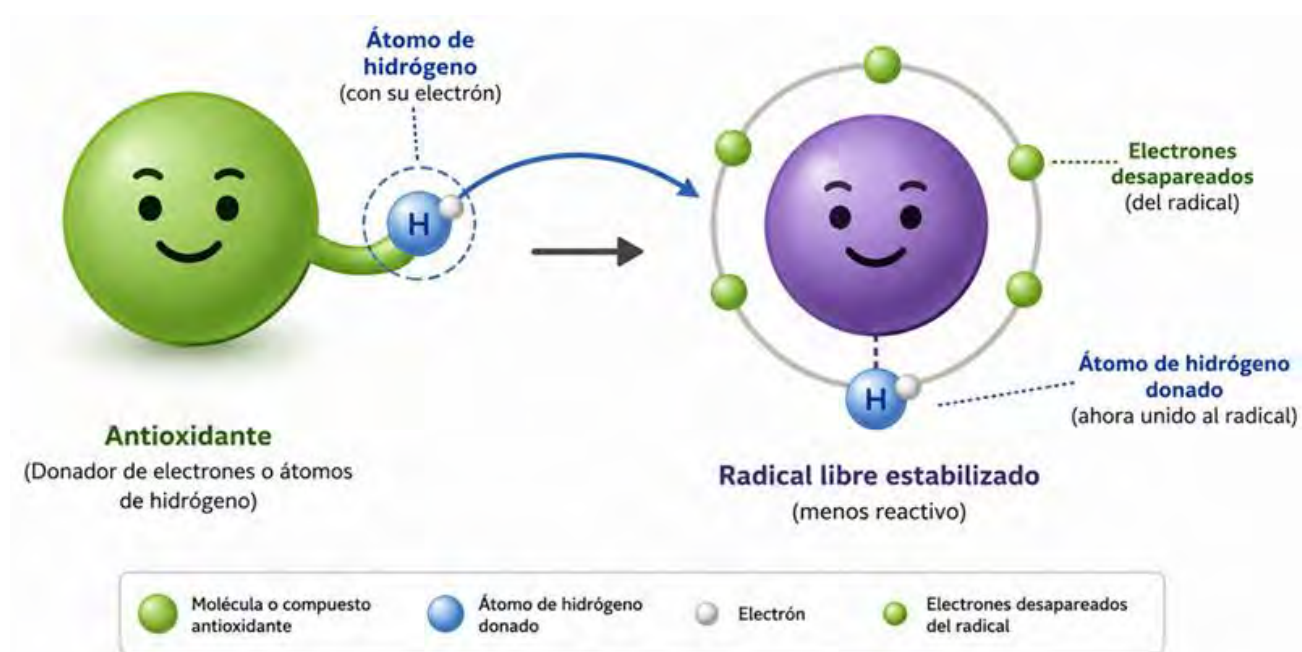


Figura 4. Donación de electrones por un antioxidante y estabilización de un radical libre.

La capacidad antioxidante de estos compuestos depende de los aminoácidos que los componen. Algunos de ellos facilitan la donación de electrones, lo que permite estabilizar los radicales libres y evitar que sigan generando daño oxidativo en otras moléculas. Además, estas moléculas bioactivas pueden unirse a metales prooxidantes (metales que favorecen o aceleran las reacciones de este tipo) disminuyendo su participación en la formación de radicales libres. De acuerdo con Pan *et al.* (2022), su acción antioxidante ocurre principalmente en tres niveles. Primero, pueden “atrapar” radicales libres, evitando que sigan dañando otras moléculas. Segundo, pueden unirse a metales

como el hierro o el cobre, que normalmente aceleran la oxidación, reduciendo así su efecto prooxidante (es decir, su capacidad de favorecer el deterioro de los alimentos). Y tercero, ayudan a frenar la formación y descomposición de los hidroperóxidos (compuestos que contienen oxígeno e hidrógeno y que se forman cuando las grasas comienzan a oxidarse), los cuales intensifican el deterioro de los alimentos y pueden generar sustancias dañinas para la salud como el malondialdehído (sustancia que se forma cuando las grasas se deterioran) y el hexanal (compuesto relacionado con el olor rancio en alimentos grasos).

En conjunto, estos mecanismos muestran que los péptidos no actúan de una sola forma, sino como un sistema de protección múltiple que interrumpe diferentes etapas del proceso oxidativo.

¿Cómo se mide la capacidad antioxidante?

Una vez obtenidos los péptidos, es necesario determinar su capacidad antioxidante mediante distintos métodos experimentales. Entre los métodos más utilizados se encuentran los ensayos ABTS (ácido 2,2'-azino-bis-3-etilbenzotiazolina-6-sulfónico) y DPPH (2,2-difenil-1-picrilhidrazil), que permiten evaluar la capacidad antioxidante de distintos compuestos. Ambos se basan en el uso de radicales libres generados de manera controlada en el laboratorio, los cuales presentan un color característico. Cuando un antioxidante está presente, estos radicales son estabilizados, lo que provoca un cambio de color que puede medirse mediante espectrofotometría, una técnica que permite medir la cantidad de luz absorbida por una sustancia (Molyneux, 2004; Prior *et al.* 2005) (Fig. 5).



Figura 5. Cambio de color en los ensayos ABTS y DPPH. En presencia de compuestos antioxidantes, los radicales libres (de color azul-verde o morado intenso) se estabilizan, provocando la decoloración de la solución, la cual puede medirse mediante espectrofotometría.

En términos sencillos, cuanto mayor es la capacidad del compuesto para disminuir la intensidad del color, mayor es su actividad antioxidante. Aunque estos métodos se realizan en condiciones controladas, ofrecen una aproximación útil sobre el potencial antioxidante de los péptidos para las aplicaciones reales, como la conservación de alimentos

Aplicaciones en los alimentos

El uso de antioxidantes en la industria alimentaria es fundamental para preservar la calidad de los productos, especialmente aquellos que son ricos en grasas, como carnes y pescados, los cuales son más susceptibles a procesos de oxidación. Tradicionalmente, se han utilizado antioxidantes sintéticos como el BHA (butilhidroxianisol) y el BHT (butilhidroxitolueno) para evitar el deterioro de los alimentos; sin embargo, su uso ha sido cuestionado debido a posibles efectos adversos en la salud, lo que ha impulsado a la búsqueda de alternativas más seguras y naturales (Lourenço *et al.* 2021).

En este contexto, los péptidos de origen natural representan una alternativa atractiva para reemplazar antioxidantes sintéticos. Un ejemplo claro del uso de estos compuestos se reporta en el estudio de Honrado *et al.* (2022), donde se trabajó con carne de pescado obtenida a partir de subproductos de lubina. En este caso, los investigadores se enfocaron en algo muy importante para la calidad de los alimentos: qué tan rápido se deterioran sus grasas, es decir, qué tan rápido se oxidan. Para medirlo, utilizaron una técnica llamada TBARS (siglas en inglés de “sustancias reactivas al ácido tiobarbitúrico”, una prueba que indica qué tanto se han oxidado o deteriorado las grasas del alimento). Los resultados fueron muy claros. Cuando el producto no contenía antioxidantes, el proceso oxidativo avanzaba rápidamente, afectando su calidad. Sin embargo, al añadir un hidrolizado rico en péptidos con actividad antioxidante —obtenido también a partir de subproductos de pescado—, este proceso se desaceleró de manera significativa. En otras palabras, estos compuestos bioactivos ayudaron a “proteger” al alimento, permitiendo que se conservara en buen estado por más tiempo.

Pero su efecto no se limita solo a retrasar el deterioro. Estas moléculas también demostraron ser capaces de proteger nutrientes esenciales, como los ácidos grasos omega-3 (EPA y DHA), que son especialmente sensibles al daño oxidativo. De hecho, en las muestras tratadas, la pérdida de estos compuestos se redujo hasta en un 75 % en comparación con aquellas que no recibieron ningún antioxidante.



Este tipo de resultados no es un caso aislado. Por ejemplo, en otro estudio, Wang *et al.*, (2022) obtuvieron péptidos antioxidantes a partir de huevos de atún (un subproducto pesquero) e identificaron varios con alta capacidad para neutralizar radicales libres e inhibir la degradación oxidativa de lípidos. Algunos de estos péptidos de bajo peso molecular (oligopéptidos (tri- y pentapéptidos)) mostraron una gran eficacia para frenar procesos asociados al deterioro oxidativo.

En conjunto, estos estudios ayudan a entender algo clave: los péptidos obtenidos de subproductos marinos no solo sirven para reducir desperdicios, sino que también pueden convertirse en herramientas muy útiles para la industria alimentaria. Gracias a su capacidad antioxidante, permiten prevenir la oxidación, alargar la vida útil de los alimentos y conservar mejor su valor nutricional, transformando lo que antes se consideraba un residuo en un ingrediente funcional de alto valor.

Consideraciones finales y perspectivas

Los subproductos marinos, tradicionalmente considerados como desechos, representan una fuente valiosa para la obtención de péptidos antioxidantes mediante hidrólisis enzimática. A lo largo de este artículo se mostró que estos compuestos tienen la capacidad de neutralizar radicales libres y que su actividad puede evaluarse mediante métodos como DPPH y ABTS. En la industria alimentaria, su aplicación permite retrasar procesos de oxidación, contribuyendo a prolongar la vida útil y mantener la calidad de los alimentos, especialmente en productos ricos en lípidos. Además, su aprovechamiento favorece la reducción de residuos y promueve un enfoque más sostenible en la producción.

A pesar de su potencial, el aprovechamiento de péptidos antioxidantes derivados de subproductos marinos todavía enfrenta algunos desafíos importantes. Entre ellos se encuentran el escalamiento de los procesos de producción a nivel industrial, la necesidad de mantener una calidad constante en los hidrolizados y la evaluación de su inocuidad para garantizar un consumo seguro. También es necesario considerar la aceptación por parte de los consumidores, ya que el origen de estos compuestos proviene de materiales que tradicionalmente han sido considerados residuos. De igual forma, será fundamental avanzar en aspectos regulatorios que permitan establecer lineamientos claros para su incorporación en alimentos comerciales. Superar estos retos permitirá fortalecer el aprovechamiento sostenible de los subproductos marinos y ampliar su aplicación en distintos productos alimentarios.

Como perspectiva, es necesario profundizar en la optimización de los procesos de obtención y en su aplicación en diferentes matrices alimentarias, con el fin de facilitar su uso a nivel industrial. En conjunto, los péptidos antioxidantes derivados de estos subproductos se posicionan como una alternativa prometedora para el desarrollo de alimentos más estables y sostenibles, alineados con las necesidades actuales de la industria alimentaria.

Literatura citada

- Cabanillas-Bojórquez, L.A., E. P. Gutiérrez-Grijalva y J.B. Heredia. 2024. *Revolución marina: transformando desechos de camarón con tecnologías verdes*. Centro de Investigación en Alimentación y Desarrollo (CIAD).
- Comisión Nacional de Acuacultura y Pesca (CONAPESCA). 2024. Anuario estadístico de acuacultura y pesca 2024. En: <https://www.gob.mx/conapesca> (consultado el 15/04/2026).
- EFSA Panel on Food Additives and Nutrient Sources added to Food (ANS). (2012). *Scientific opinion on the re-evaluation of butylated hydroxytoluene (BHT, E 321) as a food additive*. EFSA Journal, 10(3), 2588.
- Fernández Herrero, A. 2021. *Ensilados químicos y biológicos. Una alternativa de aprovechamiento integral y sustentable de los residuos pesqueros en la Argentina*. Marine and Fishery Sciences 34(2): 235–262.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). 2022. The State of World Fisheries and Aquaculture 2022: Towards Blue Transformation. FAO.
- García-Sifuentes, C.O., S.M. Scheuren-Acevedo y J.C. Zamorano-Apodaca. 2020. *Explorando diferentes subproductos considerados como residuos por la industria pesquera en México*. Biotecnia 22(2): 61–69.
- Honrado, A., S. Rubio, J.A. Beltrán y J. Calanche. 2022. *Fish by-product valorization as source of bioactive compounds for food enrichment: characterization, suitability and shelf life*. Foods 11(22): 3656.
- Kurek, M., N. Benaïda-Debbache, I. Elez Garofulić, K. Galić, S. Avallone, A. Voilley y Y. Waché. 2022. *Antioxidants and bioactive compounds in food: Critical review of issues and prospects*. Antioxidants 12(3): 634.
- Liu, X., Q. Hu, Y. Shen, Y. Wu, L. Gao, X. Xu y G. Hao. 2024. *Research progress on antioxidant peptides from fish by-products: Purification, identification, and structure–activity relationship*. Foods 13(19): 3140.



- Lourenço, S.C., M. Moldão-Martins y V.D. Alves. 2021. *Antioxidants of natural plant origins: From sources to food industry applications*. *Molecules* 26(20): 6282.
- Molyneux, P. 2004. *The use of the stable free radical diphenylpicrylhydrazyl (DPPH) for estimating antioxidant activity*. *Songklanakarin Journal of Science and Technology* 26(2): 211-219.
- Montero-Barrantes, M. 2021. *Hidrolizados proteicos a partir de subproductos de la industria pesquera: obtención y funcionalidad*. *Agronomía Mesoamericana* 32(2): 681-699.
- Pan, F.G., E.Q. Yang, J.Y. Xu, Y.F. Lu, C.X. Yang, Y.D. Zhang, S. Li y B.Q. Liu. 2022. *Review on preparation methods, mechanisms and applications for antioxidant peptides in oil*. *Grasas y Aceites* 73(4): e478.
- Prior, R.L., X. Wu y K. Schaich. 2005. *Standardized methods for the determination of antioxidant capacity and phenolics in foods and dietary supplements*. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 53(10): 4290-4302.
- Sila, A. y A. Bougatef. 2016. *Antioxidant peptides from marine by-products: Isolation, identification and application in food systems. A review*. *Journal of Functional Foods* 21: 10-26.
- Wang, J., Y.M. Wang, L.Y. Li, C.F. Chi y B. Wang. 2022. *Twelve antioxidant peptides from protein hydrolysate of skipjack tuna (*Katsuwonus pelamis*) roe prepared by Flavourzyme: Purification, sequence identification, and activity evaluation*. *Frontiers in Nutrition* 8: 813780.
- Xavier, J.R., B.S. Sanjay, D. Gupta, S. Mehta, y O.P. Chauhan. 2024. *Bioactive compounds of foods: Phytochemicals and peptides*. *Food and Humanity* 3: 100354.

Reseña curricular de los autores

- El **Dr. Asahel Benitez Hernández** es Ingeniero Bioquímico por el ITMAZ, Doctor en Ciencias en Uso, Manejo y Preservación de los Recursos Naturales (Acuicultura) por el CIBNOR. Es Investigador de Tiempo Completo en la FACIMAR-UAS. Su interés de investigación se centra en la búsqueda de fuentes nutricionales e ingredientes para la salud de organismos, nutrición acuícola e innovación y mejoramiento de alimentos nutricionalmente balanceados y funcionales para la acuicultura. Miembro del SNII nivel 1, con reconocimiento PRODEP e Investigador Honorífico del Sistema Sinaloense de Investigadores y Tecnólogos.
- La **Dra. Cynthia Esmeralda Lizárraga Velázquez** obtuvo su doctorado en ciencias en 2018 por el Centro de Investigación en Alimentación y Desarrollo. La Dra. Esmeralda es miembro del sistema nacional de investigadores nivel 1 e investigador honorífico del sistema sinaloense de investigadores y tecnólogos. Ella tiene experiencia en la extracción de

compuestos bioactivos de residuos vegetales y caracterización de su capacidad antioxidante *in vitro* e *in vivo*. Además, recientemente se ha enfocado a la obtención de quitosano y péptidos bioactivos de residuos pesqueros.

- La **Dra. Amada Yerén Escobedo Lozano** culminó sus estudios de doctorado en el 2008 en el centro de investigación en alimentación y desarrollo en la unidad de Hermosillo. Es miembro del sistema de investigadores sinaloenses. Ella tiene experiencia en el desarrollo de diversos métodos para la extracción de compuestos bioactivos de la cáscara y cabeza de camarón, así como las aplicaciones de ellos en la elaboración de geles, cápsulas y su uso como aditivo en peces y en el desarrollo de alimentos funcionales.
- El **Ing. Bioquímico Isaías de Jesús Llamas López** cursa actualmente la Maestría en Ciencias en Recursos Acuáticos en la Facultad de Ciencias del Mar de la Universidad Autónoma de Sinaloa. Cuenta con experiencia en el aprovechamiento de subproductos pesqueros mediante la obtención de hidrolizados proteicos, la caracterización de su capacidad antioxidante *in vitro* y la extracción de compuestos bioactivos para su aplicación en la acuicultura.

Cita

Llamas-López, I.J., C.E. Lizarraga Velázquez, A.Y. Escobedo-Lozano y A. Benitez-Hernández. Del desperdicio al valor: el poder antioxidante oculto en los subproductos marinos. Recursos Naturales y Sociedad, 2026. Vol. 12(1): 185-197. <https://doi.org/10.18846/renaysoc.2026.12.12.01.0012>.

Sometido: 15 de abril de 2026.

Aceptado: 2 de junio de 2026.

Editor asociado: Dr. Arturo Sánchez-Paz.

Editor ejecutivo: Dr. Arturo Sánchez-Paz.

Diseño gráfico editorial: Ing. Fca. Elizabeth Villegas Carrazco

**Taurine and its use in aquaculture:
beyond the energy myth**

Taurina y su uso en la acuicultura: más allá del mito energético

**Marco A. Hernández-de Dios¹, Eunice D. Rodríguez-Rafael², Minerva C. Maldonado-García^{1*},
Deneb Maldonado García³, Roxana Inohuye-Rivera¹, Francisco Encarnación-Ramírez¹**

Resumen

La taurina, ese compuesto que muchos asocian con bebidas energéticas es en realidad mucho más que un supuesto estimulante: es un aminoácido esencial para la vida animal que desempeña funciones cruciales en el equilibrio fisiológico. En la acuicultura, su relevancia cobra una dimensión práctica y económica decisiva. La tendencia actual de sustituir la harina de pescado, rica en taurina, por ingredientes vegetales ha planteado un desafío nutricional, pues las dietas vegetales carecen prácticamente de este compuesto. Para los peces marinos carnívoros, esta escasez puede traducirse en menor crecimiento, problemas metabólicos e incluso en mortalidad. Especies como el rodaballo, la corvina y el jurel de California han mostrado respuestas notables cuando se les suplementa con taurina, especialmente entre 0.5 y 1.5 % de su dieta. No obstante, el efecto varía. Los peces de agua dulce, como la tilapia o la carpa, sintetizan taurina con mayor facilidad, por lo que dependen menos de su aporte externo. Su inclusión estratégica en los alimentos permite desarrollar acuiculturas más sostenibles, sin depender exclusivamente de los recursos marinos tradicionales. Comprender que no existe una dosis única universal, sino que cada especie, etapa de desarrollo y tipo de dieta demandan ajustes precisos constituye el reto actual para nutricionistas e investigadores del sector.

Palabras clave: taurina, acuicultura, nutrición, ingredientes vegetales.

¹ Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste (CIBNOR), La Paz 23096, México.

² Instituto Politécnico Nacional, Centro Interdisciplinario de Ciencias Marinas (CICIMAR-IPN), La Paz, México.

³ Secihti-Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste (CIBNOR), La Paz 23096, México.

* Autor de correspondencia: minervam04@cibnor.mx



Abstract

Taurine, a compound many people associate with energy drinks, is in fact much more than a supposed stimulant: it is an amino acid essential to animal life that plays crucial roles in physiological balance. In aquaculture, its relevance takes on a decisive practical and economic dimension. The current trend toward replacing fishmeal, which is rich in taurine, with plant-based ingredients has created a nutritional challenge, as plant-based diets contain virtually no taurine. For carnivorous marine fish, this deficiency can lead to reduced growth, metabolic disorders, and even mortality. Species such as turbot, meagre, and California yellowtail have shown remarkable responses to taurine supplementation, especially at levels between 0.5 and 1.5% of the diet. However, the effect varies. Freshwater fish, such as tilapia and carp, synthesize taurine more efficiently and therefore depend less on its dietary supply. Its strategic inclusion in aquafeeds enables the development of more sustainable aquaculture systems without relying exclusively on traditional marine resources. Understanding that there is no single universal dose, but rather that each species, developmental stage, and diet type requires precise adjustment, is the current challenge for nutritionists and researchers in the sector.

Keywords: taurine, aquaculture, nutrition, plant-based ingredients.

La verdadera naturaleza de la taurina

La taurina arrastra desde hace años una fama engañosa. Su presencia en bebidas energéticas ha hecho que muchas personas la identifiquen como un simple estimulante, asociado a una sensación de energía inmediata. Sin embargo, esa percepción dista mucho de su verdadero papel biológico; la taurina no debe entenderse como una sustancia que aporta energía inmediata, sino como una molécula natural del organismo animal, con funciones esenciales para mantener el equilibrio fisiológico y el buen funcionamiento de distintos tejidos (Sampath *et al.* 2020).

Desde el punto de vista químico, la taurina, también conocida como ácido 2-aminoetanosulfónico, es un aminoácido β que contiene azufre y está ampliamente distribuida en las células del reino animal, aunque solo se encuentra en pequeñas cantidades en plantas y bacterias (Huxtable, 1992). Su presencia es especialmente abundante en tejidos excitables como el cerebro, el corazón y los músculos, donde estos últimos almacenan aproximadamente el 70% de la taurina corporal

(Huxtable, 1992). Esta distribución demuestra que la taurina no es una molécula “de adorno” ni un componente sin relevancia, sino una molécula asociada al funcionamiento de órganos y tejidos en los que se llevan a cabo procesos necesarios para mantener el equilibrio del cuerpo (Salze y Davis, 2015).

Su importancia fisiológica también se refleja en la diversidad de funciones que desempeña, ya que la taurina participa en el mantenimiento de la contracción del muscular, en la regulación osmótica¹, en la actividad antioxidante² y en la regulación del calcio³ (Schuller-Levis y Park, 2003, 2004; Sampath *et al.* 2020). Además, se le atribuyen otras acciones biológicas, como la modulación de la liberación de hormonas, la síntesis de sales biliares⁴, la estimulación de la glucólisis⁵ y las propiedades anticonvulsivas (Huxtable, 1992). Estas funciones muestran que la taurina no debe entenderse como un ingrediente asociado únicamente a productos comerciales, sino como un componente con una base fisiológica sólida y múltiples beneficios para el organismo animal (Fig. 1).

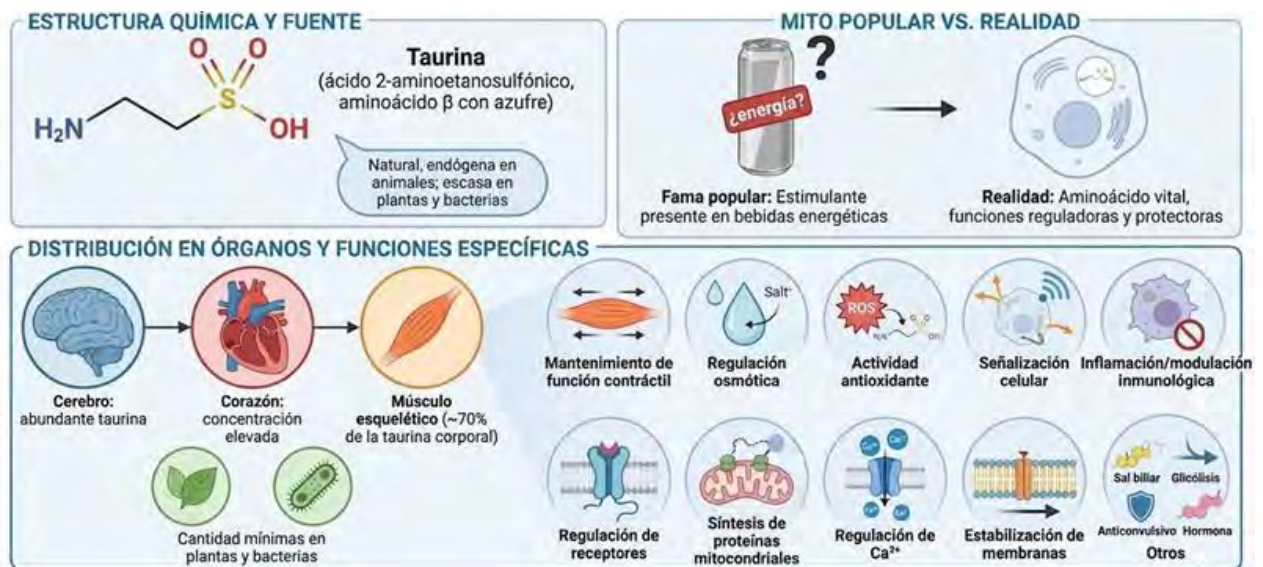


Figura 1. El rol biológico de la taurina. Distribución y función en los tejidos animales. Imagen generada con Gemini.

Esta perspectiva cobra especial importancia en la acuicultura. En los peces, la taurina participa en funciones metabólicas y fisiológicas relacionadas con el crecimiento, el aprovechamiento de

¹ control del equilibrio de agua y sales dentro del organismo

² defensa contra el daño celular causado por moléculas oxidantes

³ control del calcio necesario para funciones como la contracción muscular

⁴ producción de sustancias que ayudan a digerir las grasas

⁵ uso de azúcares para obtener energía



nutrientes, la digestión de lípidos y la adaptación a la dieta (Salze y Davis, 2015). Sin embargo, como su relevancia no es la misma en todas las especies, la taurina no se considera un nutriente esencial para todos los peces, sino un aminoácido condicionalmente esencial. Esto significa que algunas especies pueden producirla en cierta cantidad, mientras que otras dependen en mayor medida de la taurina presente en el alimento (El-Sayed, 2013). Esta condición se vuelve especialmente evidente en especies carnívoras mantenidas en cautiverio. A diferencia de lo que ocurre en el medio natural, donde la dieta suele ser diversa y rica en compuestos de origen animal, en cultivo la alimentación depende de formulaciones más controladas y, en muchos casos, del uso de ingredientes alternativos o de subproductos. En ese contexto, el aporte natural de taurina puede disminuir hasta resultar insuficiente para cubrir los requerimientos fisiológicos de ciertas especies. Por ello, los peces carnívoros cultivados son los que con mayor frecuencia presentan una mayor dependencia de la taurina en la dieta (Sampath *et al.* 2020).

Así, mientras que fuera del ámbito científico la taurina suele asociarse únicamente con un “ingrediente energético”, en acuicultura se reconoce cada vez más como un nutriente funcional⁶ (Sampath *et al.* 2020). Su importancia varía según la especie, el sistema de cultivo y la composición de la dieta. Comprender este papel ayuda a explicar por qué la taurina ha adquirido un lugar estratégico en la nutrición acuícola moderna y por qué su inclusión puede influir directamente en la salud de los peces, su desempeño productivo y la sostenibilidad de la producción (Li *et al.* 2022).

Producción natural de taurina

Aunque la taurina puede formarse en el organismo por distintas rutas, las más importantes son tres: la del ácido cisteínsulfínico, la del ácido cisteico y la de la cisteamina. En términos sencillos, estas rutas son caminos bioquímicos por los que el organismo transforma compuestos que contienen azufre hasta producir taurina (Huxtable, 2002). En mamíferos, la principal es la ruta del ácido cisteínsulfínico, que ocurre de manera importante en el hígado, mientras que en los peces no existe una sola ruta dominante para todas las especies; algunas pueden usar esta ruta, mientras que otras parecen recurrir a rutas alternativas, como la del ácido cisteico (Salze y Davis, 2015) (Fig. 2). Esto ocurre porque las enzimas⁷ que convierten estos compuestos en taurina no funcionan con la misma eficiencia en todos los organismos; por ello, muchos peces marinos carnívoros producen poca taurina por sí mismos y dependen más de la que obtienen a través del alimento (Sampath *et al.* 2020).

⁶ nutriente que, además de alimentar, ayuda a mejorar funciones del organismo

⁷ proteínas que permiten que ocurran reacciones dentro del organismo

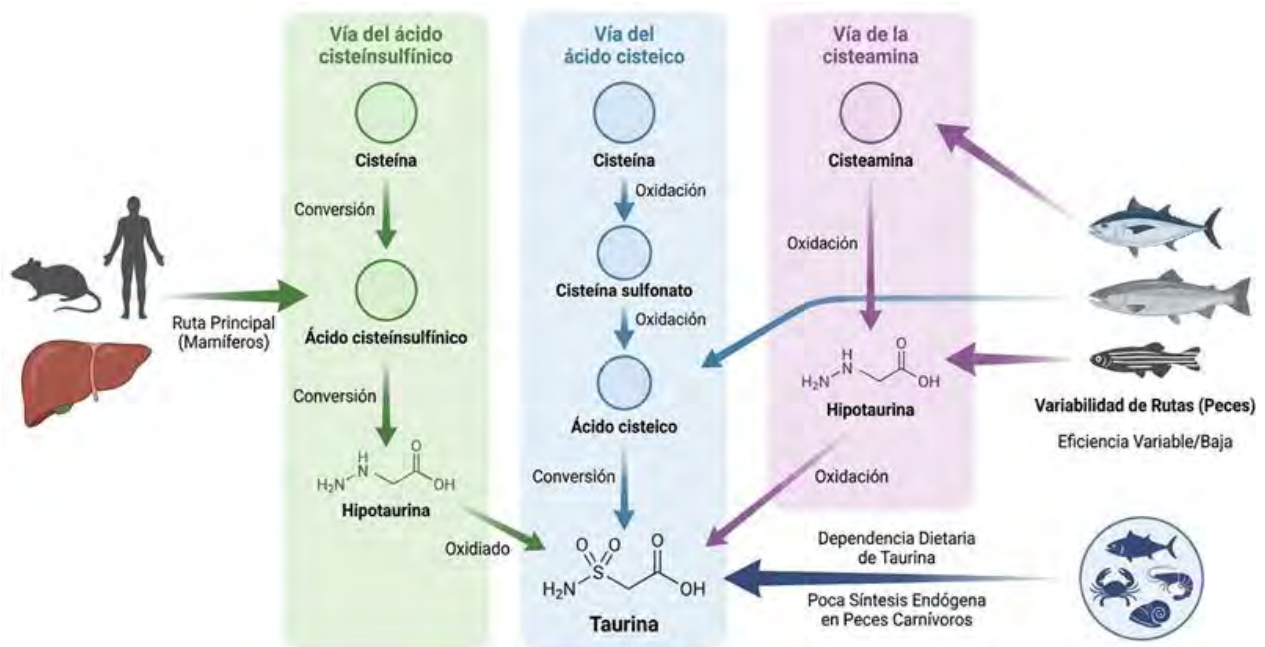


Figura 2. Comparación de las principales vías metabólicas implicadas en la producción de taurina en mamíferos y peces. Imagen generada con Gemini.

La necesidad de taurina en proteínas

En los alimentos formulados para la acuicultura, el contenido de taurina se convierte en una diferencia relevante, sobre todo por el hecho de que las proteínas de origen animal aportan este compuesto de manera natural, mientras que las proteínas vegetales carecen de este compuesto o lo contienen en cantidades tan pequeñas que resultan insignificantes (Salze y Davis, 2015). Esta diferencia adquiere especial importancia en peces cultivados, sobre todo en especies carnívoras, cuya alimentación en cautiverio depende por completo de formulaciones balanceadas y no de la diversidad de presas que tendrían en el medio natural (Fig. 3).

Cuando las dietas incluyen harina de pescado u otros ingredientes de origen animal, la taurina presente de forma natural contribuye a cubrir una buena parte de los requerimientos nutricionales del pez, lo que reduce la necesidad de suplementación; sin embargo, esto no significa que su papel deje de ser relevante, ya que en condiciones de cultivo la alimentación difiere de la que los peces tendrían en vida libre. Aun con dietas basadas en ingredientes de origen animal, la taurina sigue formando parte del soporte nutricional necesario para mantener un crecimiento adecuado y un buen desempeño productivo (Sampath *et al.* 2020). Esto se ha observado en especies como la corvina, *Argyrosomus regius* (de Moura *et al.* 2018) y el pez loro japonés, *Oplegnathus fasciatus* (Ferreira *et*



al. 2014), en las que las dietas con ingredientes de origen animal permitieron mantener un crecimiento y un rendimiento favorables.

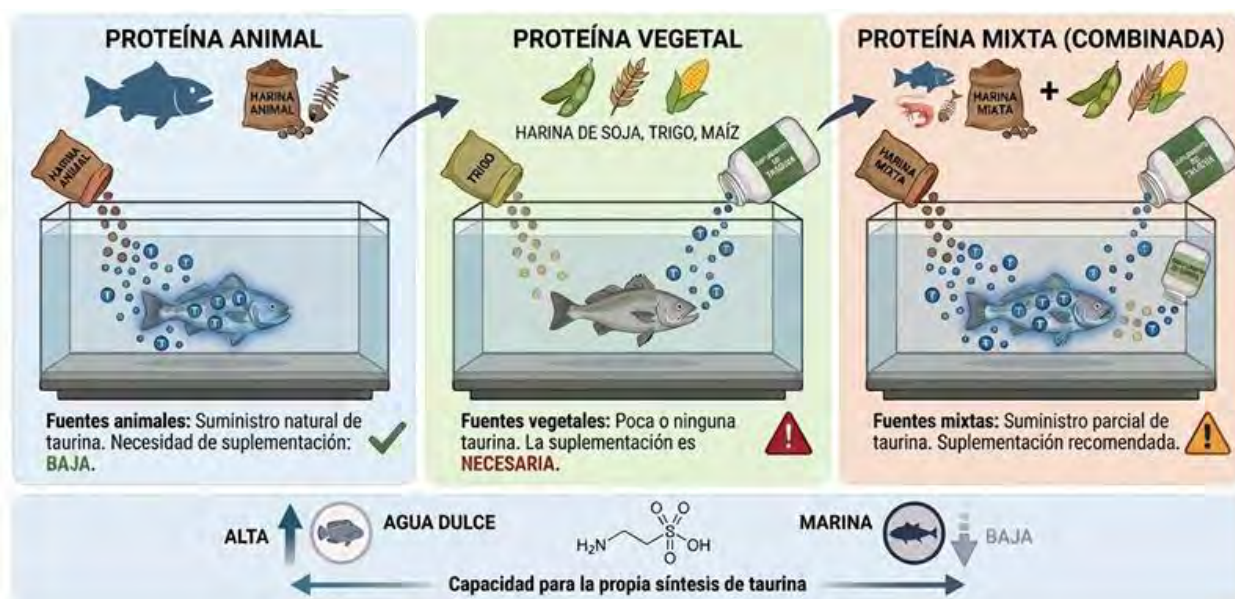


Figura 3. Comparación del suministro de taurina según el tipo de proteína dietaria y capacidad de síntesis endógena en peces de agua dulce versus marinos. Imagen generada con Gemini.

El escenario cambia cuando la harina de pescado se reemplaza parcialmente o totalmente por ingredientes vegetales, como la harina de soja o de trigo. En estas formulaciones, el aporte natural de taurina disminuye de manera significativa, lo que incrementa el riesgo de deficiencia, especialmente en peces marinos carnívoros con capacidad limitada para producirla por sí mismos. Esta situación se ha documentado en especies como el rodaballo, *Scophthalmus maximus* (Liu et al. 2018; Wei et al. 2018), el huachinango del Pacífico, *Lutjanus colorado* (Hernández et al. 2018) y el pámpano de Florida, *Trachinotus carolinus* (Salze et al. 2018a), donde la adición de taurina a dietas vegetales ayuda a recuperar o mejorar el crecimiento y la eficiencia en el uso del alimento.

La misma tendencia se ha observado en el jurel de California, *Seriola lalandi* (Salze et al. 2018b) y en la cobia, *Rachycentron canadum* (Watson et al. 2013; Watson et al. 2014). En estas especies, la suplementación con taurina en dietas sin harina de pescado favorece el consumo de alimento, el aprovechamiento de los nutrientes y el rendimiento productivo. Indicando que, cuando la dieta se aleja de la composición que el pez encontraría de forma natural, la taurina deja de ser un componente secundario y pasa a desempeñar un papel nutricional decisivo.

En peces de agua dulce, la respuesta suele ser menos marcada; por ejemplo, especies como la tilapia del Nilo, *Oreochromis niloticus* (Michelato et al. 2018; Shen et al. 2018), la carpa común,

Cyprinus carpio (Abdel-Tawwab y Monier, 2017) y el bagre de canal, *Ictalurus punctatus* (Peterson y Li, 2018) también pueden beneficiarse de la taurina, especialmente cuando consumen dietas vegetales. No obstante, muchas de estas especies suelen tener una mayor capacidad para sintetizarla a partir de otros compuestos presentes en la dieta, por lo que toleran mejor su baja disponibilidad que las especies marinas (El-Sayed, 2013).

En algunas especies, como el barramundi, *Lates calcarifer* (Poppi *et al.* 2018), los efectos positivos del uso de taurina añadida resultan nulos. En otras especies, como el esturión persa *Acipenser persicus* (Hoseini *et al.* 2017), la magnitud de la respuesta depende tanto del nivel de inclusión como de las condiciones de cultivo, lo que deja claro que el valor nutricional de la taurina no puede interpretarse de forma aislada, sino en función de la especie, la formulación del alimento y el sistema de producción.

Además de su relación con el crecimiento, la taurina interviene en procesos metabólicos clave. Cuando las dietas carecen de suficientes ingredientes de origen animal y no se suplementan adecuadamente, pueden presentarse alteraciones del metabolismo lipídico⁸ y de la salud del hígado. En cambio, cuando se encuentra en niveles apropiados, contribuye a la formación de sales biliares, indispensables para la digestión y absorción eficientes de los lípidos (Salze y Davis, 2015).

La suplementación de taurina y su intervalo de eficacia

La cantidad de taurina que se añade a la dieta de los peces no se establece al azar, sino a partir de experimentos orientados a identificar los niveles de inclusión más adecuados para cada especie y tipo de alimento. Diversas investigaciones muestran que, aunque las concentraciones evaluadas varían, la mayoría se sitúa en un intervalo relativamente bien delimitado, lo que permite reconocer una franja recurrente de uso eficaz (Fig. 4).

De manera general, los niveles de taurina utilizados en distintos estudios se ubican principalmente entre 0.5 y 1.5 % de la dieta (Sampath *et al.* 2020). Este intervalo se observa de manera reiterada en diversas especies y condiciones experimentales, por lo que se reconoce como una franja funcional de suplementación. Dentro de este rango se sitúan, por ejemplo, los niveles evaluados en rodaballo, con inclusiones de 0.8 a 1.2 % (Liu *et al.* 2018; Wei *et al.* 2018; Zhang *et al.* 2019); en la corvina, con

⁸ Procesamiento de las grasas en el organismo



niveles cercanos a 1% (de Moura *et al.* 2018), y en pez loro japonés, con concentraciones aproximadas de 0.5 a 1 % (Ferreira *et al.* 2014).

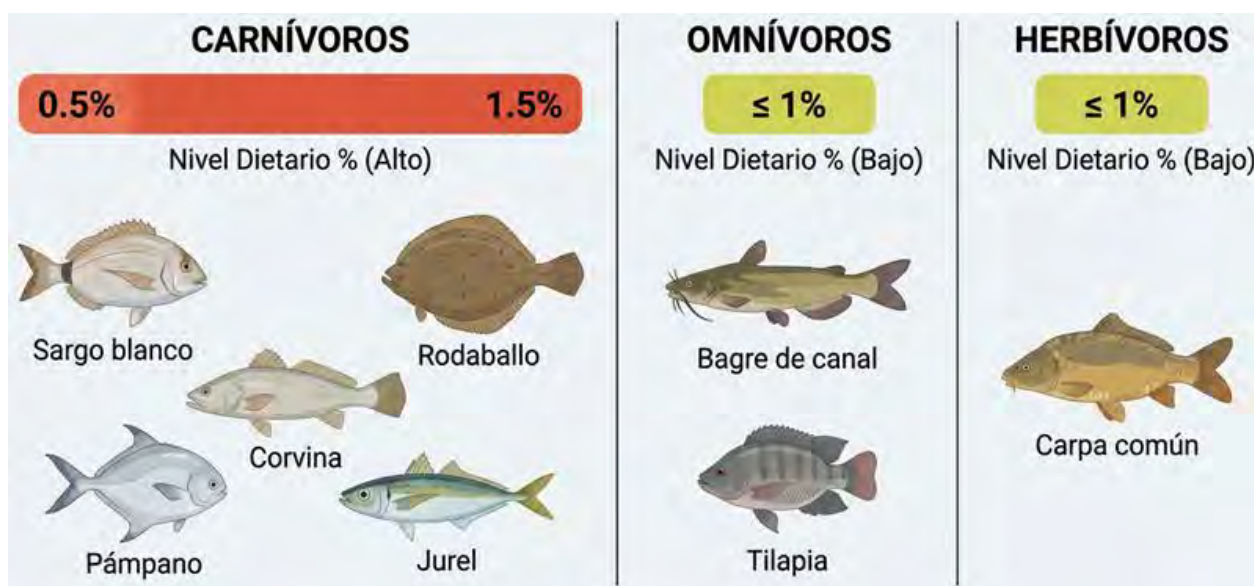


Figura 4. Rangos de suplementación dietaria de taurina recomendados según el hábito alimenticio de las especies acuícolas: carnívoras, omnívoras y herbívoras. Imagen generada con Gemini.

Sin embargo, este intervalo no constituye un valor universal, ya que el nivel más adecuado varía según la especie y el contexto nutricional. En algunos casos, las concentraciones de mayor interés se sitúan ligeramente por encima del rango más frecuente. Esto se observa en el huachinango del Pacífico, donde se evalúan niveles cercanos a 1.6 % (Hernández *et al.* 2018), y en el lenguado japonés, *Paralichthys olivaceus*, en el que se utilizan inclusiones de 1 a 2 % en la dieta (Han *et al.* 2014; Kim *et al.* 2017). Estos antecedentes indican que la eficacia de la suplementación no depende de una dosis fija, sino de la interacción entre el requerimiento fisiológico y la formulación del alimento.

Las concentraciones más altas suelen registrarse en dietas con una proporción importante de ingredientes vegetales o con una reducción marcada de fuentes animales, en las que el aporte natural de taurina disminuye y debe compensarse mediante suplementación. Un caso representativo es el de la corvina amarilla grande, *Larimichthys crocea*, en la que se han evaluado niveles de hasta 3.5 % (Hu *et al.* 2018). De forma semejante, en cobia, se emplean niveles cercanos al 1.5 % en dietas sin harina de pescado (Watson *et al.* 2013). En estos casos, la concentración utilizada no solo se relaciona con la especie, sino también con la composición basal del alimento.

En el extremo opuesto, también se documentan estudios en los que concentraciones más bajas, generalmente entre 0.1 y 0.5 %, forman parte de los niveles evaluados. Este patrón se registra en carpa negra, *Mylopharyngodon piceus* (Zhang *et al.* 2018), en bagre de canal, *Ictalurus punctatus* (Peterson y Li, 2018), y en esturión persa (Hoseini *et al.* 2017). Estos antecedentes muestran que el rango de suplementación puede ser amplio y que su ajuste depende de las características particulares de cada modelo de cultivo.

Una vez delimitado el rango de inclusión más frecuente, resulta pertinente considerar que el interés de la taurina en acuicultura no radica únicamente en la cantidad utilizada, sino también en la diversidad de funciones biológicas que puede modular en los peces cultivados

La taurina como modulador del crecimiento y la fisiología en acuicultura

La suplementación dietética con taurina se reconoce como una estrategia nutricional capaz de modular diversos procesos biológicos en peces cultivados, en particular aquellos relacionados con el crecimiento, la utilización del alimento y el mantenimiento del equilibrio interno del organismo. Su importancia resulta especialmente evidente en especies marinas, en las que la capacidad de síntesis endógena⁹ suele ser limitada y, por tanto, la dependencia de la taurina dietaria es mayor que en muchas especies de agua dulce (El-Sayed, 2013) (Fig. 5).

En peces marinos, los efectos de la taurina se han documentado de manera consistente en variables asociadas al crecimiento y a la eficiencia productiva. En especies como el sargo blanco, *Diplodus sargus* (Magalhães *et al.* 2019), el rodaballo (Liu *et al.* 2018; Wei *et al.* 2018; Zhang *et al.* 2019), el pez loro japonés (Ferreira *et al.* 2014), la corvina (de Moura *et al.* 2018), el pámpano de Florida (Salze *et al.* 2018a), y el huachinango del Pacífico (Hernández *et al.* 2018), se registran mejoras en el desempeño productivo, reflejadas en un mejor crecimiento, una mayor eficiencia alimenticia y, en algunos casos, cambios favorables en la composición corporal. De manera semejante, en el jurel de California (Salze *et al.* 2018b), y en la cobia (Watson *et al.* 2014), la suplementación también se asocia con una mejor utilización del alimento y un crecimiento más favorable.

⁹ producción dentro del propio organismo



Figura 5. Efectos diferenciales de la taurina en peces marinos versus peces de agua dulce: de nutriente crítico a complemento dependiente de la capacidad de síntesis endógena. Imagen generada con Gemini.

Asimismo, esta respuesta positiva se ha observado en otras especies marinas de interés acuícola. En el pargo rojo japonés (*Pagrus major*), la suplementación con taurina se asoció con un mejor crecimiento, una mayor utilización del alimento y una respuesta inmune más favorable (Gunathilaka et al. 2019). En la corvina amarilla (*Nibea albiflora*) se reportaron efectos positivos sobre el crecimiento y la supervivencia en etapas tempranas de desarrollo (Xie et al. 2014). De forma similar, en el mero blanco (*Epinephelus aeneus*), la taurina se asoció con un mejor desempeño en el crecimiento y con cambios favorables en el metabolismo lipídico (Koven et al. 2016). En la totoaba (*Totoaba macdonaldi*) la inclusión de taurina favoreció el crecimiento y la digestibilidad del alimento (Satriyo et al. 2017). En el jurel japonés (*Seriola quinqueradiata*) la suplementación también se asoció con mejoras en el crecimiento y en el metabolismo lipídico (Nguyen et al. 2015), así como con un mejor aprovechamiento del alimento, cambios en la composición de los tejidos y respuestas hematológicas más favorables (Khaoian et al. 2014).

La taurina también modula diversos procesos fisiológicos relevantes para el desempeño de los peces marinos en cultivo. En el lenguado japonés, por ejemplo, se describen mejoras en los parámetros sanguíneos, en la capacidad antioxidante y en la respuesta inmune (Han et al. 2014; Kim et al. 2017). Por su parte, López et al. 2001 documentaron en la totoaba que la taurina favorece la salud del hígado y mejora indicadores relacionados con la sangre y el funcionamiento general del

organismo. En el pez roca coreano, *Sebastes schlegeli*, la suplementación se asocia con una mayor supervivencia y una mejor eficiencia alimenticia (Kim *et al.* 2015), mientras que, en la corvina amarilla grande, se vincula con cambios favorables en la eficiencia alimenticia y en respuestas relacionadas con la alimentación (Hu *et al.* 2018). Asimismo, en el lenguado senegalés (*Solea senegalensis*) se han registrado efectos sobre la digestión de los lípidos y la retención de aminoácidos (Richard *et al.* 2017).

En peces de agua dulce, aunque también se documenta una respuesta positiva, esta suele presentarse con menor intensidad o de forma menos consistente que en especies marinas. En la carpa común (Abdel-Tawwab y Monier, 2017), la carpa negra (Zhang *et al.* 2018), el bagre amarillo (*Pelteobagrus fulvidraco*) (Li *et al.* 2016) y el bagre de canal (Peterson y Li, 2018) mostraron mejoras en el crecimiento, la actividad enzimática y el estado antioxidante. Por su parte, Hu *et al.* (2018) observaron que en la anguila de arrozal (*Monopterus albus*) hubo un mejor crecimiento, un incremento en la actividad digestiva y en la capacidad antioxidante. Asimismo, en la tilapia del Nilo, la taurina se asocia con efectos positivos sobre el crecimiento y el metabolismo (Michelato *et al.* 2018; Shen *et al.* 2018). No obstante, en este grupo de peces, la respuesta suele interpretarse a la luz de una mayor capacidad de síntesis endógena, lo que reduce en cierta medida su dependencia directa de la taurina aportada por la dieta (El-Sayed, 2013) (Fi. 5).

En conjunto, estas investigaciones muestran que la taurina no actúa únicamente como un suplemento orientado a mejorar la ganancia de peso, sino también como modulador de funciones metabólicas, digestivas, antioxidantes e inmunológicas que inciden en el desempeño integral de los peces cultivados. Desde esta perspectiva, su valor en acuicultura radica en que contribuye a sostener procesos fisiológicos clave, especialmente en especies marinas y en sistemas de alimentación en los que la dieta puede no aportar cantidades suficientes de este compuesto.



Consideraciones finales y perspectivas

La taurina es uno de esos compuestos que adquieren una reputación pública que termina por simplificar su verdadero papel biológico; su nombre suele despertar ideas asociadas al consumo humano de productos comerciales como bebidas energéticas; sin embargo, su uso dentro de la actividad acuícola va mucho más allá de esa imagen popular. En la acuicultura, la taurina permite abordar la nutrición acuícola desde una perspectiva más amplia que la mera formulación de alimentos; su importancia no radica únicamente en su capacidad de mejorar el crecimiento de algunas especies, sino también en que participa en procesos fisiológicos clave, como el aprovechamiento de nutrientes, la digestión de lípidos, el equilibrio metabólico y la respuesta antioxidante. Por ello, en peces cultivados, especialmente en especies marinas carnívoras, su presencia en la dieta puede marcar una diferencia importante entre una alimentación suficiente y otra realmente ajustada a las necesidades del organismo.

No obstante, la taurina no debe entenderse como una solución general para todas las especies ni como un aditivo que deba incorporarse de manera indiscriminada; ya que la evidencia revisada muestra que su efecto depende del tipo de pez, de su capacidad para producirla, de la etapa de desarrollo, de la composición del alimento y del grado de sustitución de la harina de pescado por ingredientes vegetales. En este sentido, su uso debe formar parte de una nutrición más precisa, basada en el conocimiento de los requerimientos particulares de cada especie y no en recomendaciones generales.

A futuro, uno de los principales retos será definir con mayor claridad cuándo, cuánto y en qué condiciones debe suplementarse con taurina. Esto será especialmente relevante en dietas con un alto aporte de ingredientes vegetales, en las que el aporte natural de este compuesto puede resultar insuficiente. También será necesario profundizar en su relación con la salud hepática e intestinal, la eficiencia alimenticia, la respuesta inmune y la calidad fisiológica de los peces cultivados.

Desde una perspectiva productiva y ambiental, el estudio de la taurina también abre oportunidades para avanzar hacia alimentos acuícolas más sostenibles. Su inclusión estratégica podría ayudar a reducir la dependencia de ingredientes marinos tradicionales, sin comprometer el bienestar, el crecimiento ni el desempeño productivo de los peces. Por ello, más que considerarla un ingrediente aislado, la taurina debe considerarse una herramienta nutricional que, bien utilizada, puede contribuir al desarrollo de una acuicultura más eficiente, responsable y adaptada a los retos actuales.

Agradecimientos

Los autores expresan su agradecimiento al proyecto de Recursos Propios de la empresa Kampachi Farms México (proyecto: 20558). Agradecen al investigador Juan Carlos Pérez Urbiola, así como al personal técnico Pedro Uriarte Ureta y Carlos Ernesto Ceseña. También reconocen el apoyo del Departamento de Mantenimiento Electromecánico del CIBNOR, en particular de los ingenieros Ramón Altamirano Cobos, René Gaxiola Márquez, Francisco Aguillón León, Julio Reyes García y Víctor Ormart; y del Departamento de Mantenimiento y Servicios Generales, especialmente de los ingenieros Juan Mandujano García y Jessica Calvillo González. Finalmente, agradecen al personal administrativo del CIBNOR. El apoyo de todo el equipo ha sido fundamental para el desarrollo de la investigación con peces marinos, y su colaboración resulta indispensable para la realización de futuros proyectos.

Literatura citada

- Abdel-Tawwab, M. y M.N. Monier. 2017. *Stimulatory effect of dietary taurine on growth performance, digestive enzymes activity, antioxidant capacity, and tolerance of common carp, Cyprinus carpio L., fry to salinity stress*. Fish Physiology and Biochemistry 44 (2): 639-649.
- de Moura, L.B.D., A.F. Diógenes, A.V. Daniel, F.L.A.D. Almeida, P.M. Pousão-Ferreira, W.M. Furuya, A. Oliva-Teles y H. Peres. 2018. *Taurine and methionine supplementation as a nutritional strategy for growth promotion of meagre (Argyrosomus regius) fed high plant protein diets*. Aquaculture 497: 389-395.
- El-Sayed, A.F.M. 2013. *Is dietary taurine supplementation beneficial for farmed fish and shrimp? A comprehensive review*. Reviews in Aquaculture 5: 1-15.
- Ferreira, F.M., H. Yun, Y. Park, G. Park, S. Choi y S.C. Bai. 2014. *Effects of taurine supplementation on the growth performance of juvenile rock bream Oplegnathus fasciatus*. Fisheries and Aquatic Sciences 17: 255-261.
- Gunathilaka, G.L.B.E., M.G. Kim, C. Lee, J. Shin, B.J. Lee y K.J. Lee. 2019. *Effects of taurine supplementation in low fish meal diets for red seabream (Pagrus major) in low water temperature season*. Fish and Aquatic Sciences 22: 23.
- Han, Y., S. Koshio, Z. Jiang, T. Ren, M. Ishikawa, S. Yokoyama y J. Gao. 2014. *Interactive effects of dietary taurine and glutamine on growth performance, blood parameters and oxidative status of Japanese flounder Paralichthys olivaceus*. Aquaculture 434: 348-354.



- Hernandez, C., E.Y. Sanchez-Gutierrez, L. Ibarra-Castro, E. Pena, G. Gaxiola y A.M.C.D.L. Barca. 2018. *Effect of dietary taurine supplementation on growth performance and body composition of snapper, Lutjanus colorado juvenile*. Turkish Journal of Fisheries and Aquatic Sciences 18: 1227-1233.
- Hoseini, S.M., S.A. Hosseini, S. Eskandari, M. Amirahmadi y M. Soudagar. 2017. *The effect of dietary taurine on growth performance and liver histopathology in Persian sturgeon, Acipenser persicus (Borodin, 1897) fed plant-based diet*. Aquaculture Research 48: 4184-4196.
- Hu, Y., G. Yang, Z. Li, Y. Hu, L. Zhong, Q. Zhou, J. Huang y J. Wen. 2018. *Effect of dietary taurine supplementation on growth, digestive enzyme, immunity and resistant to dry stress of rice field eel (Monopterus albus) fed low fish meal diets*. Aquaculture Research 49: 2108-2118.
- Hu, J., Y. Wang, Q. Le, N. Yu, X. Cao, H. Zheng, S. Kuang, M. Zhang, J. Zheng, X. Wu, J. Wang, S. Tao y X. Yan. 2018. *Transcriptomic analysis reveals olfactory-related genes expression in large yellow croaker (Larimichthys crocea) regulated by taurine: may be a good phagostimulant for all-plant protein diets*. Aquaculture Research 49: 1095-1104.
- Huxtable, R.J. 2002. *Expanding the circle 1975-1999: sulfur biochemistry and insights on the biological functions of taurins*. pp. 1-25. En: Della Corte, L., R.J. Huxtable, G. Sgaragli y K.F. Tipton (Eds.). *Taurine 4: Taurine and Excitable Tissues*. Springer. Nueva York, Estados Unidos. XXIV + 652 pp.
- Huxtable, R.J. 1992. *Physiological actions of taurine*. Physiological Reviews 72 (1): 101-163.
- Khaoian, P., H.P. Nguyen, Y. Ogita, H. Fukada y T. Masumoto. 2014. *Taurine supplementation and palm oil substitution in low-fish meal diets for young yellowtail Seriola quinqueradiata*. Aquaculture 420-421: 219-224.
- Kim, J.M., G.H.T. Malintha, G.L.B.E. Gunathilaka, C. Lee, M.G. Kim, B.J. Lee, J.D. Kim y K.J. Lee. 2017. *Taurine supplementation in diet for olive flounder at low water temperature*. Fisheries and Aquatic Sciences 20: 20.
- Kim, S.K., K.G. Kim, K.D. Kim, K.W. Kim, M.H. Son, M. Rust y R. Johnson. 2015. *Effect of dietary taurine levels on the conjugated bile acid composition and growth of juvenile Korean rockfish Sebastes schlegeli (Hilgendorf)*. Aquaculture Research 46: 2768-2775.
- Koven, W., A. Peduel, M. Gada, O. Nixon y M. Ucko. 2016. *Taurine improves the performance of white grouper juveniles (Epinephelus aeneus) fed a reduced fish meal diet*. Aquaculture 460: 8-14.
- Li, L., H.Y. Liu, S.Q. Xie, P.Y. Zhang y Z.C. Yang. 2022. *Effects of taurine supplementation on growth performance and feed utilization in aquatic animals: A meta-analysis*. Aquaculture 551: 737896.

- Li, M., H. Lai, Q. Li, S. Gong y R. Wang. 2016. *Effects of dietary taurine on growth, immunity and hyperammonemia in juvenile yellow catfish Pelteobagrus fulvidraco fed all-plant protein diets*. Aquaculture 450: 349-355.
- Liu, Y., P. Yang, H. Hu, Y. Li, J. Dai, Y. Zhang, Q. Ai, W. Wu, W. Zhang y K. Mai. 2018. *The tolerance and safety assessment of taurine as additive in a marine carnivorous fish, Scophthalmus maximus L.* Aquaculture Nutrition 24: 461-471.
- López, L.M., M. Flores-Ibarra, I. Bañuelos-Vargas, M.A. Galaviz y C.D. True. 2015. *Effect of fishmeal replacement by soy protein concentrate with taurine supplementation on growth performance, hematological and biochemical status, and liver histology of totoaba juveniles (Totoaba macdonaldi)*. Fish Physiology and Biochemistry 41: 921-936.
- Magalhães, R., N. Martins, S. Martins, T. Lopes, P. Díaz-Rosales, P. Pousão-Ferreira, A. Oliva-Teles y H. Peres. 2019. *Is dietary taurine required for white seabream (Diplodus sargus) juveniles?* Aquaculture 502: 296-302.
- Michelato, M., W.M. Furuya y D.M. Gatlin. 2018. *Metabolic responses of Nile tilapia Oreochromis niloticus to methionine and taurine supplementation*. Aquaculture 485: 66-72.
- Nguyen, H.P., P. Khaoian, H. Fukada, N. Suzuki y T. Masumoto. 2015. *Feeding fermented soybean meal diet supplemented with taurine to yellowtail Seriola quinqueradiata affects growth performance and lipid digestion*. Aquaculture Research 46: 1101-1110.
- Peterson, B.C. y M.H. Li. 2018. *Effect of supplemental taurine on juvenile channel catfish Ictalurus punctatus growth performance*. Aquaculture Nutrition 24: 310-314.
- Poppi, D.A., S.S. Moore y B.D. Glencross. 2018. *The effect of taurine supplementation to a plant-based diet for barramundi (Lates calcarifer) with varying methionine content*. Aquaculture Nutrition 24: 1340-1350.
- Richard, N., R. Colen y C.R. Aragão. 2017. *Supplementing taurine to plant-based diets improves lipid digestive capacity and amino acid retention of Senegalese sole (Solea senegalensis) juveniles*. Aquaculture 468: 94-101.
- Salze, G.P. y D.A. Davis. 2015. *Taurine: a critical nutrient for future fish feeds*. Aquaculture 437: 215-229.
- Salze, G.P., M. Rhodes y D.A. Davis. 2018a. *Quantitative taurine requirement for juvenile Florida pompano (Trachinotus carolinus) fed soy-based practical diets*. Aquaculture Nutrition 25: 1-8.
- Salze, G.P., K.R. Stuart, D.O. Jirsa, D.A. Davis y M.A. Drawbridge. 2018b. *Quantitative dietary taurine requirement for California yellowtail, Seriola lalandi*. Journal of the World Aquaculture Society 49: 113-126.



- Sampath, W.W.H.A., R.M.D.S. Rathnayake, M. Yang y cols. 2020. *Roles of dietary taurine in fish nutrition*. Marine Life Science and Technology 2: 360-375.
- Satriyo, T.B., M.A. Galaviz, G. Salze y L.M. Lopez. 2017. *Assessment of dietary taurine essentiality on the physiological state of juvenile Totoaba macdonaldi*. Aquaculture Research 48: 5677-5689.
- Schuller-Levis, G.B. y E. Park. 2003. *Taurine: new implications for an old amino acid*. FEMS Microbiology Letters 226: 195-202.
- Schuller-Levis, G.B. y E. Park. 2004. *Taurine and its chloramine: modulators of immunity*. Neurochemical Research 29 (1): 117-126.
- Shen, G., Y. Huang, J. Dong, X. Wang, K. Cheng, J. Feng, J. Xu y J. Ye. 2018. *Metabolic effect of dietary taurine supplementation on Nile tilapia (Oreochromis niloticus) evaluated by NMR-based metabolomics*. Journal of Agricultural and Food Chemistry 66: 368-377.
- Watson, A.M., F.T. Barrows y A.R. Place. 2013. *Taurine supplementation of plant derived protein and n-3 fatty acids are critical for optimal growth and development of cobia, Rachycentron canadum*. Lipids 48: 899-913.
- Watson, A.M., F.T. Barrows y A.R. Place. 2014. *Effects of graded taurine levels on juvenile cobia*. North American Journal of Aquaculture 76: 190-200.
- Wei, Y., M. Liang, H. Xu y K. Zheng. 2018. *Taurine alone or in combination with fish protein hydrolysate affects growth performance, taurine transport and metabolism in juvenile turbot (Scophthalmus maximus L.)*. Aquaculture Nutrition 25: 1-10.
- Xie, Z., F. Wang, H. Liu, S. Guo, H. Shi, W. Zhan y B. Lou. 2014. *Effect of dietary taurine levels on growth performance and taurine content of Nibea albiflora larvae*. Aquaculture International 22: 1851-1862.
- Zhang, J., Y. Hu, Q. Ai, P. Mao, Q. Tian, L. Zhong, T. Xiao y W. Chu. 2018. *Effect of dietary taurine supplementation on growth performance, digestive enzyme activities and antioxidant status of juvenile black carp (Mylopharyngodon piceus) fed with low fish meal diet*. Aquaculture Research 49: 3187-3195.
- Zhang, Y., Z. Wei, G. Liu, K. Deng, M. Yang, M. Pan, Z. Gu, D. Liu, W. Zhang y K. Mai. 2019. *Synergistic effects of dietary carbohydrate and taurine on growth performance, digestive enzyme activities and glucose metabolism in juvenile turbot Scophthalmus maximus L.* Aquaculture 499: 32-41.

Reseña curricular de los autores

- **Dr. Marco Antonio Hernández de Dios** (mahernandez@cibnor.mx) es Técnico Titular C en el CIBNOR y se especializa en nutrición y reproducción de peces marinos.
- **Dra. Minerva Concepción Maldonado García** (minervam04@cibnor.mx) es Investigadora Titular B en el CIBNOR y miembro del SNII, Nivel I; su especialidad es la acuicultura y la biología reproductiva de peces marinos.
- **Dra. Eunice D. Rodríguez Rafael** (eunice_rr@outlook.com) es egresada del CICIMAR, con especialidad en ecología trófica.
- **Dr. Deneb Maldonado García** (denebm@cibnor.mx), adscrito a Secihti-CIBNOR y miembro del SNII, Nivel I, se especializa en biología celular del espermatozoide, biotecnología y desarrollo embrionario de peces marinos.
- **Lic. Encarnación Ramírez Francisco** (carnechon04@cibnor.mx) está adscrito al CIBNOR y se desempeña como Técnico del Laboratorio de Recepción y Mantenimiento de Peces Marinos.
- **M. en C. Roxana Bertha Inohuye Rivera** (rinohuye@cibnor.mx) es Técnica Titular C, con especialidad en parasitología.

Cita

Hernández-de Dios, M.A., E.D. Rodríguez-Rafael, M.C. Maldonado-García, D. Maldonado García, R. Inohuye-Rivera y F. Encarnación-Ramírez. Taurina y su uso en la acuicultura: más allá del mito energético. Recursos Naturales y Sociedad, 2026. Vol. 12(1): XX-XX.

<https://doi.org/10.18846/renaysoc.2026.12.12.01.0013>.

Sometido: 15 de abril de 2026.

Aceptado: 2 de junio de 2026.

Editor asociado: Dr. Arturo Sánchez-Paz.

Editor ejecutivo: Dr. Arturo Sánchez-Paz.

Diseño gráfico editorial: Ing. Fca. Elizabeth Villegas Carrazco

**Extremophilic bacteria:
Habitat, background, metabolites, and applications**

**Las bacterias extremófilas:
Hábitat, antecedentes, metabolitos y aplicaciones**

**Ana Karen Armendáriz Marrón¹, María de Jesús Briseño López¹,
Crystal Guluarte¹ y Luis Guillermo Hernández Montiel^{1*}**

Resumen

El estudio de bacterias extremófilas representa una frontera crucial en la investigación moderna, revelando cómo estos microorganismos logran prosperar en hábitats hostiles marcados por altas concentraciones de sal, temperaturas extremas y presiones elevadas. Para sobrevivir, desarrollan maquinarias metabólicas únicas que les permiten sintetizar metabolitos y extremoenzimas altamente especializados, los cuales son objeto de estudio por parte de investigadores e instituciones a nivel global. El potencial de estas moléculas está siendo aplicado en la industria, la medicina y, de manera muy destacada, en la biotecnología agrícola, donde ofrecen soluciones innovadoras para el biocontrol de patógenos y la adaptación de cultivos en zonas áridas o bajo estrés ambiental. Sin embargo, a pesar de su notable capacidad de adaptación, los frágiles nichos ecológicos de estos extremófilos se encuentran seriamente amenazados por los efectos del cambio climático, lo que pone en riesgo tanto su invaluable biodiversidad como el descubrimiento de futuras herramientas biotecnológicas.

Palabras Clave: Extremoenzimas, biocontrol de patógenos, cambio climático, herramientas biotecnológicas.

¹ Grupo de Nanotecnología & Biocontrol Microbiano, Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste, S.C. (CIBNOR), Av. Instituto Politécnico Nacional 195, Col. Playa Palo de Santa Rita Sur, C.P. 23096, La Paz, Baja California Sur, México.

* Autor de correspondencia: lhernandez@cibnor.mx



Abstract

The study of extremophile bacteria represents a crucial frontier in modern research, as it reveals how these microorganisms manage to thrive in hostile habitats characterized by high salt concentrations, extreme temperatures, and high pressures. To survive, they develop unique metabolic mechanisms that allow them to synthesize highly specialized metabolites and extremozymes, which are the subject of study by researchers and institutions around the world. The potential of these molecules is being harnessed in industry, medicine, and in agricultural biotechnology, where they offer innovative solutions for the biological control of pathogens and the adaptation of crops in arid areas or those subjected to environmental stress. However, despite their remarkable adaptability, the fragile ecological niches of these extremophiles are severely threatened by the effects of climate change, which jeopardizes both their invaluable biodiversity and the discovery of future biotechnological tools.

Keywords: Extremozymes, biocontrol of pathogens, climate change, biotechnological tools.

Antecedentes

Durante las últimas dos décadas, a nivel mundial la comunidad científica ha mostrado un gran interés por aquello que habita en ambientes extremos, donde pareciera que es imposible que exista vida debido a condiciones adversas como; escasez de alimento, clima, suelo con alto contenido de sal, baja humedad, entre otros (Amina y Lotfi, 2024; Sepe *et al.*, 2025). Estos seres son las bacterias “extremófilas”, las cuales viven y se reproducen bajo condiciones extremas de temperatura, salinidad, radiación, presión, entre otros (Bag *et al.*, 2025; Santos *et al.*, 2023). Este tipo de bacterias se pueden localizar en los ambientes más inhóspitos del planeta Tierra; desde la Antártida, pasando por el Gran Lago Salado y géiseres calientes en Yellowstone, hasta la famosa y radiactiva ciudad de Chernóbil ubicada al norte de Ucrania (Grattieri *et al.*, 2017; Pandey y Dhakar, 2025).

Las bacterias extremófilas han demostrado tener una gran capacidad de producir diversos metabolitos secundarios que les dan ventajas para su adaptación al entorno y para su defensa hacia otros microorganismos (Mashakhtri *et al.*, 2024; Pardo-Esté *et al.*, 2024). Las variadas capacidades metabólicas de las bacterias extremófilas les han permitido ser utilizadas en diversos campos como la biotecnología, agricultura, farmacéutica y cosmética (Ashaolu *et al.*, 2025; Faskhutdinova *et al.*, 2024; Rawat *et al.*, 2024).

¿En qué circunstancias habitan las bacterias extremófilas?

Al existir diversas condiciones principalmente de clima y suelo en la Tierra, las bacterias extremófilas se clasifican dependiendo de las condiciones en las que vivan (Fig. 1). Por ejemplo, por gradientes de temperatura se clasifican en psicrófilas, termófilas e hipertermófilas (Milojevic *et al.*, 2022). Por la concentración de sal (NaCl) en el suelo están las halotolerantes, halófilas e hiper halófilas (Gavrilov *et al.*, 2023). Por el pH del suelo están las alcalófilas y acidófilas (Lim, 2025). A las bacterias que sobreviven en lugares extremadamente secos, en donde no hay una sola gota de agua por largos periodos de tiempo, se les llama xerófilas; y a las que sobreviven altas concentraciones de metales, metalófilas (Akramov *et al.*, 2023; Murawska-Wlodarczyk *et al.*, 2022). Las bacterias piezófilas viven en condiciones de alta presión y normalmente se encuentran a profundidades muy grandes (5,000 - 10,000 m), y las radiotolerantes son aquellas de ambientes con alta radiactividad (rayos gamma o rayos X) superiores a 1000 grays (Gy) (Stan-Lotter y Fendrihan, 2015; Kristjansson y Stetter, 2021).

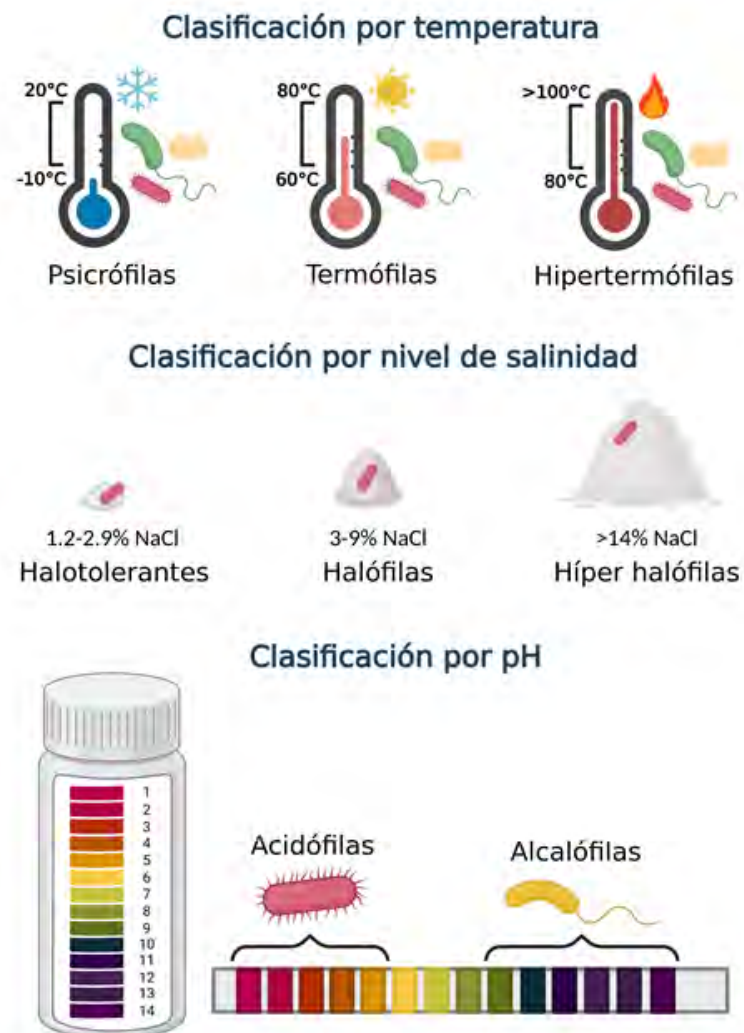


Figura 1. Clasificación de bacterias extremófilas por temperatura, salinidad y pH.



¿En dónde se han descubierto a las bacterias extremófilas?

Actualmente, existen reportes de bacterias extremófilas en muchas partes del mundo (Fig. 2). Por ejemplo, se han encontrado bacterias halófilas en lagos salinos como el Salar de Atacama, Chile, el Mar Muerto en Israel o el Gran Lago Salado en Estados Unidos, y en suelos con alta salinidad debido a su cercanía con el mar como la salinera más grande del mundo, ubicada en Guerrero Negro, México (Oren, 2024; Ramos-Tapia *et al.*, 2022). La Antártida es un ambiente rico en bacterias extremófilas, pues no solo habitan aquellas que resisten el frío sino también hay una gran presencia de microorganismos halófilos, por los más de 300 lagos salinos que existen en este continente (Moreno *et al.*, 2025).

Las bacterias termófilas habitan en su mayoría bajo ambientes relacionados con actividad volcánica como el Parque Nacional de Yellowstone en Estados Unidos o chimeneas hidrotermales que se encuentran a miles de metros de profundidad en el mar (Pandey y Dhakar, 2025; Stephens *et al.*, 2024). De igual manera, en el mar podemos encontrar microorganismos piezófilos en fosas marinas como la Fosa de las Marianas, el lugar más profundo conocido en la Tierra, el cual tiene más de 10,000 metros de profundidad (McClain *et al.*, 2022). La ciudad de Chernóbil en Ucrania, mundialmente conocida por el famoso accidente ocurrido en la central nuclear Vladimir Ilich Lenin en 1986, que tuvo y sigue teniendo efectos negativos en el medio ambiente y la salud humana, es también un hogar para los microorganismos radiotolerantes (Guo y Zhang, 2026).



Figura 2. Ambientes habitados por bacterias extremófilas.

¿Qué tipo de metabolitos producen las bacterias extremófilas?

Hay diversos metabolitos secundarios que producen las bacterias extremófilas con numerosos beneficios (Tabla 1). El estudio mundial de estos microorganismos ha coadyuvado a la generación de nuevo conocimiento científico, pero sobre todo abre el abanico de posibilidades para diversas aplicaciones con beneficios al medio ambiente, a la salud humana y animal (Chia *et al.*, 2025; Uppar *et al.*, 2024). Por ejemplo, muchas de estas bacterias son fáciles de cultivar bajo técnicas de laboratorio, se adaptan y crecen en diversos medios de cultivo sintéticos debido a que no requieren un nutriente específico y se desarrollan en un amplio rango de temperaturas (Schultz *et al.*, 2023; Yu, 2023). Además, los metabolitos producidos por las bacterias extremófilas, a diferencia de otros microorganismos, funcionan en condiciones extremas de temperatura, pH, presión o salinidad (Li *et al.*, 2025; Mashakhetri *et al.*, 2024). Estas ventajas son muy importantes porque vuelven a estos microorganismos, candidatos perfectos para su uso en diferentes campos como la medicina, industria, biotecnología, entre otras (Rekadwad *et al.*, 2023; Sun *et al.*, 2024).

**Tabla 1.** Ejemplos de metabolitos secundarios de bacterias extremófilas estudiados en diversas disciplinas y/o áreas.

Bacteria	Hábitat natural	Metabolito	Función	Referencia
<i>Bacillus seohaeanensis</i> , <i>Jeotgalibacillus alkaliphilus</i> , <i>Halobacillus andaensis</i> , <i>Thalassobacillus devorans</i> , <i>H. campisalis</i>	Sitio geotérmico (México)	Ácido indol-3-acético (AIA)	Fitohormona que regula el crecimiento de las plantas	Tuesta-Popolizio et al. (2021)
<i>Bacillus halotolerans</i> , <i>Massilia alkalitolerans</i> , <i>B. aryabhatai</i>	Lago Karun (Egipto)	Sideróforo (Si) y ácido salicílico (As)	Si - compuesto quelante del hierro y As - es un regulador del crecimiento vegetal	Abdelaziz et al. (2023)
<i>Stenotrophomonas rhizophila</i>	Laguna Ojo de Liebre (México)	Quitinasa y glucanasa	Enzimas que degradan pared celular de hongos fitopatógenos	Rivas-García et al. (2022)
<i>Aeribacillus pallidus</i>	Aguas termales (Bulgaria)	Exo-polisacáridos	Propiedades fisicoquímicas en cremas para la piel humana	Radchenkova et al. (2015)
<i>Geobacillus thermoleovorans</i> , <i>Oceanobacillus saliphilus</i>	Ventila térmica marina (China)	Superóxido dismutasa (SOD)	Enzima que protege a las células de los radicales libres usada en cremas y medicinas	Zhang et al. (2025a)
<i>Thermoactinospora</i> , <i>Thermocatellispora</i>	Geotérmica (China)	Antibióticos	Controla patógenos como <i>Acinetobacter baumannii</i> , <i>Escherichia coli</i> y <i>Staphylococcus aureus</i>	Liu et al. (2016)
<i>Haloterrigena hispanica</i>	Fuente de Piedra (España)	Exo-polisacáridos	Estudio para resistir condiciones adversas (radiación, presión atmosférica) que simulan el entorno del planeta Marte	Gómez-Villegas et al. (2020)

La biotecnología y su relación con las bacterias extremófilas

En 1919 el ingeniero húngaro Károly Ereky utilizó por primera vez el término “Biotecnología” dentro de su libro que publicó en Berlín titulado “Biotecnología de la producción de carne, grasa y leche en una granja agrícola a gran escala”, donde describe la tecnología usada para transformar a la materia prima en un producto más útil (Nagarajan y Hoonjan, 2024). A lo largo de los años, el término “Biotecnología” se ha ido modificando, sin embargo, conserva su base; disciplina que utiliza organismos vivos, o parte de ellos (células, tejidos y/o moléculas) para crear o modificar productos y procesos a partir de materias primas de origen biológico (Bentahar *et al.*, 2023; Heaven *et al.*, 2025).

La aplicación de la biotecnología ha permitido el desarrollo de diversas áreas, destacando la conservación del medio ambiente, agricultura, salud humana y animal, energías renovables, seguridad alimentaria, farmacología, cosmética, industria, entre otros. El desarrollo de biotecnologías novedosas está ligado con el estudio y aplicaciones de microorganismos como las bacterias extremófilas (Rawat *et al.*, 2024; Sethi y Bhatti, 2024). En este sentido, un ejemplo clásico es la Taq ADN polimerasa, la cual, es una enzima que interviene durante el proceso de replicación del ADN y que fue aislada de la bacteria *Thermus aquaticus*, la cual, vive en ambientes extremos de aguas termales de hasta 80°C (Szabelewska, 2025). La Taq ADN polimerasa es un reactivo utilizado comúnmente en la biología molecular y ciencias de la vida.

La biotecnología a través de las tecnologías ómicas ha permitido el estudio de las bacterias extremófilas a gran escala, destacando a la genómica (para el estudio de todo el ADN), transcriptómica (para el estudio de todos los ARN mensajeros), proteómica (para el estudio de todas las proteínas), metabolómica (para el estudio de los subproductos químicos del metabolismo) y la fenómica (para el estudio de todas las características físicas) (Antunes *et al.*, 2024; Bilova *et al.*, 2025; Rappaport y Oliverio, 2024). Los resultados de estos estudios han permitido utilizar células, tejidos y/o moléculas de bacterias extremófilas en la medicina, bio-energía, bio-materiales, bio-seguridad, biología sintética, ingeniería de ADN/proteínas, bio-minería, reciclaje de basura, entre otros.

¿Quiénes estudian a las bacterias extremófilas?

A nivel mundial en los últimos 35 años, diversos países han investigado y publicado información científica de los microorganismos extremófilos (incluidas a las bacterias) aislados de los seis continentes (Asia, América, África, Antártida, Europa y Oceanía) destacando: Estados Unidos,



China, Alemania, India, Reino Unido, España, Italia, Francia, Chile y México (Fig. 3). Las principales áreas de estudio han sido; bioquímica, genética y biología molecular, inmunología y microbiología, agricultura y ciencias biológicas, ciencia ambiental, medicina, entre otros (Fig. 4). Diversos grupos multidisciplinares de científicos y estudiantes de pre (licenciatura) y posgrado (maestría y doctorado) de centros, institutos y universidades de investigación a nivel mundial se dedican al estudio de bacterias extremófilas y sus posibles aplicaciones a diversos campos para la solución de problemas específicos, algunos ejemplos se citan en la Tabla 2.

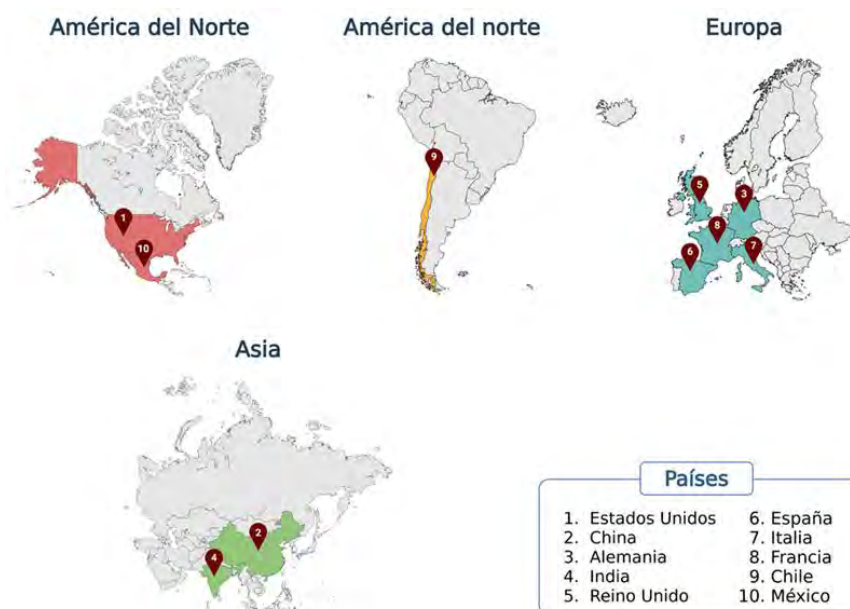


Figura 3. Países con mayor número de publicaciones sobre extremófilos.

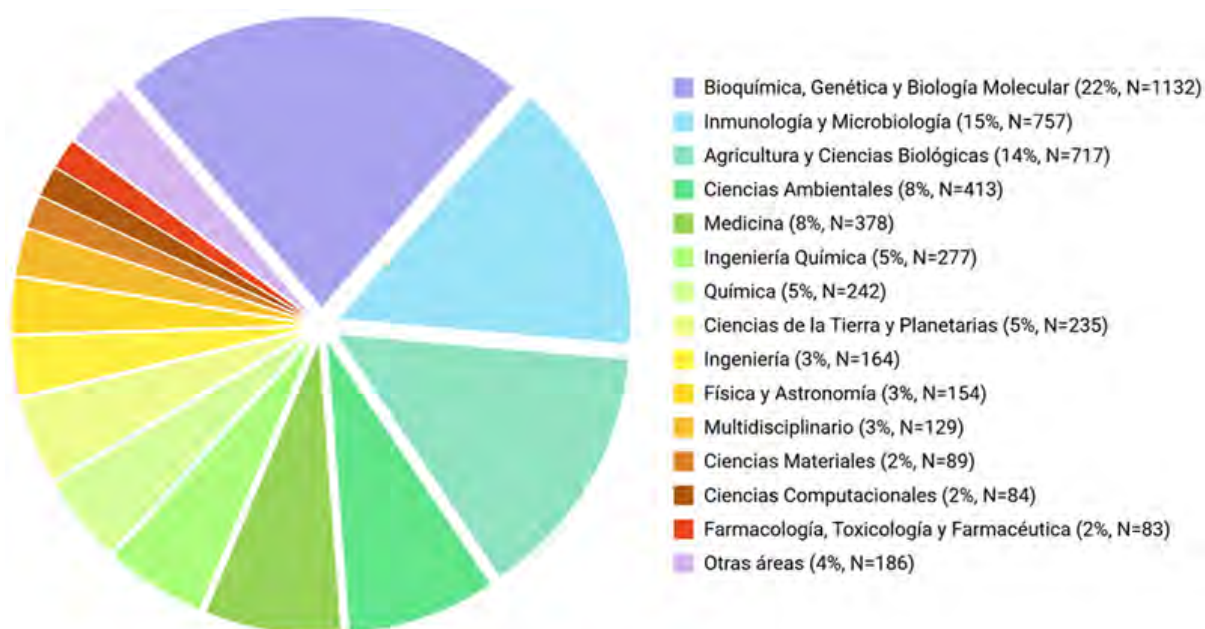


Figura 4. Publicaciones sobre organismos extremófilos por área temática.

Tabla 2. Ejemplo de centros, institutos y universidades de investigación a nivel mundial que estudian a las bacterias extremófilas.

País	Instituto	Área	Campo
Arabia Saudita	Universidad Rey Saud	Departamento de Zoología	Farmacología
Argentina	Planta Piloto de Procesos Industriales Microbiológicos	Laboratorio de Investigaciones Microbiológicas de Lagunas Andinas	Agricultura
Bulgaria	Academia Búlgara de Ciencias	Instituto de Microbiología Stephan Angeloff	Medicina
Chile	Universidad de Antofagasta	Laboratorio de Microorganismos Extremófilos	Biotecnología
China	Universidad de Jiangsu	Departamento de Botánica	Biorremediación
Colombia	Universidad Tecnológica de Bolívar	Grupo de Estudios Químicos y Biológicos	Astrobiología
Corea	Universidad de Kyonggi	Departamento de Ingeniería de Energía Ambiental	Biorrefinería
Ecuador	Universidad Católica de Cuenca	Grupo de Microbiología Molecular y Biotecnología	Arte microbiano
España	Universidad Politécnica de Valencia	Instituto de Biología Molecular y Celular de Plantas	Agricultura
India	Universidad de Rajastán	Departamento de Botánica	Ecología
Irán	Universidad de Teherán	Departamento de Biotecnología Microbiana	Medicina
México	Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste	Laboratorio de Biotecnología Microbiana	Agricultura
República Checa	Universidad Tecnológica de Brno	Facultad de Química	Biorremediación
Sudáfrica	Universidad de Stellenbosch	Facultad de Medicina	Medicina
Túnez	Universidad de Manouba	Instituto Superior de Biotecnología de Sidi Thabet	Bioplásticos

El cambio climático y sus efectos en las bacterias extremófilas

Las variaciones principalmente de temperatura y precipitaciones de origen natural o por consecuencia de la actividad humana en el planeta Tierra, han originado permutaciones importantes de los patrones climáticos (Bonebrake, 2026; Feigin *et al.*, 2023). Por ejemplo, los cambios en la cobertura terrestre originados primordialmente por actividades antropogénicas (deforestación y



cambio del uso del suelo de bosque a tierras de cultivo), ha provocado un enfriamiento superficial que afecta globalmente a todos los seres vivos (Lawrence *et al.*, 2022; Luo *et al.*, 2024).

La contaminación generada por la vida humana origina cambios a nivel atmosférico (Petrov *et al.*, 2023; Roy *et al.*, 2022a). Además, el cambio climático está afectando la distribución y abundancia de la flora y la fauna en diversas regiones del planeta, incluyendo entornos extremos (Ali *et al.*, 2024). En esta investigación temática también se destaca la caracterización de bacterias reductoras de óxido nitroso (un reconocido gas de efecto invernadero) en las fuentes hidrotermales de las profundidades marinas, enfatizando su capacidad para reducir las emisiones de gases al medio ambiente (Ding *et al.*, 2026; Jonassen *et al.*, 2022).

Con respecto al cambio climático, las comunidades microbianas y las plantas de entornos extremos se están evaluando como herramientas biotecnológicas para mejorar la tolerancia de los cultivos de cereales y árboles a eventos climáticos adversos (como sequías, inundaciones, heladas, olas de calor y frío) y así prevenir pérdidas económicas en la agricultura (Faskhutdinova *et al.*, 2024; Zenteno-Alegría *et al.*, 2024). Los microorganismos que favorecen el crecimiento de plantas en desiertos fríos y cálidos son posibles alternativas para mejorar la tolerancia a la sal de plantas de importancia agrícola. Por ejemplo, los genes de dehidrina relacionados con el estrés por frío pueden ser una herramienta adecuada en ingeniería genética para mejorar la tolerancia al frío en las plantas (Xie *et al.*, 2025).

Las bacterias extremófilas y su relación con la medicina

La obtención de metabolitos de interés en la medicina humana y veterinaria ha tenido auge en los últimos años, investigaciones recientes mencionan a las actinobacterias aisladas de ambientes extremos como microorganismos con bioactividad destacada (Bahamdain *et al.*, 2025; Trenozhnikova *et al.*, 2024). Dentro del uso de extremófilos en la medicina humana, se ha destacado el uso de metabolitos con actividades antibacterianas contra cepas resistentes a antibióticos, antifúngicas, anti-VIH, anticancerígenas y antiinflamatorias. Asimismo, diversos metabolitos derivados de estos organismos aislados de ambientes extremófilos han tenido efectos promisorios contra ciertos patógenos humanos, por ejemplo, la ivermectina derivada de *Streptomyces avermitilis* para tratar la filariasis y mostrando inhibición contra la replicación del SARS-CoV-2 causante del COVID-19 (Cerna-Chávez *et al.*, 2024; Sun *et al.*, 2022).

Existen casos dónde se han aislado componentes de actinobacterias termófilas y tolerantes a cambios de pH ácido/básicos con capacidad para degradar β -glucano, un componente importante

en la pared celular de hongos patógenos de humanos, plantas y animales (Giddings y Newman, 2022; Shrivastava *et al.*, 2024). También se han obtenido extractos de carotenos con actividad antioxidante contra varios tipos de estrés como; radiación UV-C, altos niveles de peróxido de hidrógeno y productos de desecación (Hui *et al.*, 2021).

En la medicina veterinaria, se ha destacado el uso de extremófilos del dominio arquea ya que lo hace especialmente práctico para la suplementación probiótica de rumiantes, ya que al tener un ambiente en el rumen libre de oxígeno es necesario bacterias anaerobias capaces de sintetizar metabolitos y que además toleren alto contenido de gas metano. Las bacterias patógenas zoonóticas del género *Mycobacterium* han sido una gran problemática debido a las pérdidas económicas que causa al sector agropecuario, por lo que se han buscado alternativas probióticas como *Methanococcus jannaschii* (Karunakaran *et al.*, 2025).

Las bacterias extremófilas y su relación con la agricultura sustentable

Las bacterias extremófilas tienen una importante contribución en la agricultura, por lo que numerosas cepas (ya sea cepas individuales o en consorcios) o sus compuestos asociados se han aplicado como biofertilizantes y agentes de control biológico de fitopatógenos (Miloudi-Agha y Kebdani, 2026; Toral *et al.*, 2023). Uno de los géneros más estudiado ha sido *Streptomyces*, donde su papel ha sido estudiado debido a la adaptación al cambio climático por sus mecanismos de producción de extremo-enzimas, metabolitos secundarios con actividad antibacteriana y antifúngica contra fitopatógenos y promotores del crecimiento vegetal debido a su capacidad de solubilización de fósforo y fijación del nitrógeno (Farda *et al.*, 2022; Zhang *et al.*, 2025b).

Bacillus, *Stenotrophomonas* y *Pseudomonas* son otros géneros de bacterias altamente explorados como extremófilos dentro de la agricultura. Estas bacterias compiten por espacio y nutrientes contra fitopatógenos, además de producir auxinas, compuestos volátiles orgánicos (COVs) y enzimas extracelulares capaces de limitar el crecimiento de otros microorganismos en la rizosfera de las plantas (Carmona-Hernández *et al.*, 2019; Chiquito-Contreras *et al.*, 2019; Reyes-Pérez *et al.*, 2019).

Otro aporte que se ha observado del género *Bacillus* es la producción de metabolitos secundarios que ayudan al crecimiento y germinación de las plantas ya que ayudan a solubilizar y absorber los nutrientes del suelo más simple y eficaz a la planta, además del potencial antifúngico que se ha modulado por el mecanismo de defensa de Resistencia Sistémica Inducida (RSI) de la planta (Roy *et al.*, 2022b; Xie *et al.*, 2021).



Las bacterias extremófilas y su relación con la industria

El uso de bacterias extremófilas en formas de consorcio se ha vuelto de peculiar interés en la industria tanto en la alimentaria, bebidas, biotecnológica, construcción y biorremediación debido a los complejos que pueden llegar a formar, representan una clave de adaptación y supervivencia por los biofilms que forman, su resistencia estructural y las interacciones entre mecanismos de nutrientes y comunicación. Llegan a tener gran parte de interés por ejemplo en la industria alimentaria y de bebida la búsqueda de cepas que incrementen la velocidad de fermentación estabiliza la calidad del producto debido a su termoestabilidad enzimática a altas temperaturas y mejoran el sabor debido a las interacciones microbianas (Ashaolu *et al.*, 2025; John *et al.*, 2025). Dentro de la biotecnología y biorremediación se han observado cepas de extremófilas del género *Pseudomonas*, *Thermococcus* y *Bacillus* que han sido clonadas y transformadas sus exoenzimas/proteínas debido a su resistencia frente a pH ácidos y su capacidad de tener estabilidad catalítica en el caso de las enzimas para realizar reacciones obteniendo rendimientos logarítmicos en un tiempo corto (Zada *et al.*, 2025).

En la industria de la construcción por su parte toma una relevancia en años recientes y se ha vuelto innovador emplear a los extremófilos debido a la bioactividad surfactante de estructuras supramoleculares de alta resistencia de ramnolípidos producidos por *Pseudomona aeruginosa*, la cual es una bacteria aislada de ambientes petroleros que proporciona información mecanicista de posibles materiales de construcción, además son rentables (bajo impacto), reducen huella antropogénica y son ideales en lugares con altas temperaturas y alto porcentaje de salinidad (Cheng *et al.*, 2023; Sikandar *et al.*, 2024).

Conclusiones

Las bacterias extremófilas tienen un gran potencial para ser aplicadas en distintas áreas, sin embargo, aún se presentan desafíos en su investigación relacionados con la comprensión de sus mecanismos de acción, identificación de metabolitos secundarios y sus interacciones con otras comunidades microbianas en diferentes ambientes y campos del conocimiento. Los enfoques ómicos, que incluyen la secuenciación del genoma completo, genómica de células individuales, proteómica, metagenómica, entre otros, serán herramientas de utilidad para tener un mejor entendimiento de como estos microorganismos extremófilos han existido desde hace millones de

años y como se podrían utilizar de manera eficiente en los diversos campos de la ciencia para alcanzar un progreso tecnológico, social, económico y medioambiental.

Referencias

- Abdelaziz, S., E.E. Belal, D.A. Al-Quwaie, M.F. Ashkan, F.S. Alqahtani, K.A. El-Tarabily, T.A. El-Mageed, A. Sami, M.M. Nader y N.F. Hemeda. 2023. *Extremophilic bacterial strains as plant growth promoters and biocontrol agents against Pythium ultimum and Rhizocotnia solani*. Journal of Plant Pathology 105(4):1347-1369.
- Akramov, I., S. Axanbayev, B. Alikulov, S. Mukhtorova, A. Ergashev y Z. Ismailov. 2023. *Plant growth-promoting properties of endophytic bacteria isolated from some xerophytic plants distributed in arid regions (Uzbekistan)*. Plant Science Today 10(4):228-237.
- Ali, I., H. Qaiser, R. Abdullah, A. Kaleem, M. Iqtedar, I. Iqbal y X. Chen. 2024. *Prospective roles of extremophilic fungi in climate change mitigation strategies*. Journal of Fungi 10(6):385.
- Amina, M. y G. Lotfi. 2024. *An overview of extremophile: microbial diversity, adaptive strategies, and potential applications*. Microbiology and Biotechnology Letters 52(3):233-254.
- Antunes, A., R.R. De La Haba, M. Jebbar, M. y B.P. Hedlund. 2024. *Community series-extremophiles: microbial genomics and taxogenomics, volume II*. Frontiers in Microbiology 15:1371210.
- Ashaolu, T.J., T. Malik, R. Soni, M.A. Prieto y S.M. Jafari. 2025. *Extremophilic microorganisms as a source of emerging enzymes for the food industry: a review*. Food Science & Nutrition 13(1):e4540.
- Bag, S., D. Biswal y S. Chatterjee. 2025. *Comprehensive analysis of salt-tolerant extremophilic bacterial groups in the coastal belt of Digha, India*. Geomicrobiology Journal 42(10):983-997.
- Bahamdain, L.A., M. Aly, M. Alshammari y E. Beyari. 2025. *Identifying extremophilic actinomycetes effective against multidrug-resistant bacterial pathogens and demonstrating high enzyme activities*. Journal of Contemporary Medical Sciences 11(3).
- Bentahar, S., R. Abada y N. Ykhlef. 2023. *Biotechnology: definitions, types and main applications*. Ymer 22(4):563-575.



- Bilova, T., N. Golushko, N. Frolova, A. Soboleva, S. Silinskaia, A. Khakulova, A. Orlova, M. Sinetova, D. Los y A. Frolov. 2025. *Strain-specific features of primary metabolome characteristic for extremotolerant/extremophilic cyanobacteria under long-term storage*. International Journal of Molecular Sciences 26(5):2201.
- Bonebrake, T.C. 2026. *Extinction threats from anthropogenic climate change and overexploitation interactions*. Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences 381:1942.
- Carmona-Hernández, S., J.J. Reyes-Pérez, R.G. Chiquito-Contreras, G. Rincon-Enriquez, C. Cerdan-Cabrera y L.G. Hernández-Montiel. 2019. *Biocontrol of postharvest fruit fungal diseases by bacterial antagonists: A review*. Agronomy 9(3):121.
- Cerna-Chávez, E., J.F. Rodríguez-Rodríguez, K.B. García-Conde y Y.M. Ochoa-Fuentes. 2024. *Potential of Streptomyces avermitilis: a review on avermectin production and its biocidal effect*. Metabolites 14(7):374.
- Cheng, X., M. Fu, W. Dou, S. Chen y G. Liu. 2023. *Accelerated degradation of cathodic protected epoxy coating by Pseudomonas aeruginosa in seawater*. Construction and Building Materials 408:133640.
- Chia, X. K., T. Hadibarata, M. Jusoh, L.I. Sutiknowati, I.S. Tan y C.Y. Foo. 2025. *Role of extremophiles in biodegradation of emerging pollutants*. Topics in Catalysis 68(9):965-982.
- Chiquito-Contreras, R.G., B. Murillo-Amador, S. Carmona-Hernández, C.J. Chiquito-Contreras y L.G. Hernández-Montiel. 2019. *Effect of marine bacteria and ulvan on the activity of antioxidant defense enzymes and the bio-protection of papaya fruit against Colletotrichum gloeosporioides*. Antioxidants 8(12):580.
- Ding, X., J. Li, J. Hou, W. Zhao, L. Huang, D. Wang y X.X. Zhang. 2026. *Alleviating nitrous oxide emission in partial denitrification via transition to a partial denitrification-anammox process: Critical role of enriched nitrous oxide reducing bacteria*. Bioresource Technology 134332.
- Farda, B., R. Djebaili, I. Vaccarelli, M. Del Gallo y M. Pellegrini. 2022. *Actinomycetes from caves: an overview of their diversity, biotechnological properties, and insights for their use in soil environments*. Microorganisms 10(2):453.
- Faskhutdinova, E.R., N.V. Fotina, O.A. Neverova, Y.V. Golubtsova, G. Mudgal, L. Asyakina y L.M. Aksenova. 2024. *Extremophilic bacteria as biofertilizer for agricultural wheat*. Foods and Raw Materials 12(2):348-360.

- Feigin, S.V., D.O. Wiebers, G. Lueddeke, S. Morand, K. Lee, A. Knight, M. Brainin, V.L. Feigin, A. Whitfort, J. Marcum, T.K. Shackelford, L.F. Skerratt, A.S. Winkler y A.S. Winkler. 2023. *Proposed solutions to anthropogenic climate change: a systematic literature review and a new way forward*. Heliyon 9(10).
- Gavrilov, S.N., A.S. Barashkova, T.A. Cherdyntseva, M.I. Prokofeva, O.V. Tresvyatskii, D.A. Lukianov, A.A. Nikandrova, T. Haertle, A. Merkel, E.A. Bonch-Osmolovskaya y E.A. Rogozhin. 2023. *Search for novel halophilic and halotolerant producers of antimicrobial compounds in various extreme ecosystems*. Microbiology 92(3):342-357.
- Giddings, L.A. y D.J. Newman. 2022. *Extremophilic fungi from marine environments: underexplored sources of antitumor, anti-infective and other biologically active agents*. Marine Drugs 20(1):62.
- Grattieri, M., M. Suvira, K. Hasan y S.D. Minter. 2017. *Halotolerant extremophile bacteria from the Great Salt Lake for recycling pollutants in microbial fuel cells*. Journal of Power Sources 356:310-318.
- Gómez-Villegas, P., J. Vígara, M. Vila, J. Varela, L. Barreira y R. León. 2020. *Antioxidant, antimicrobial, and bioactive potential of two new haloarchaeal strains isolated from odier salterns (Southwest Spain)*. Biology 9(9):298.
- Guo, Z. y X. Zhang. 2026. *Life in extreme environments*. Introduction to Geobiology 43.
- Heaven, S., S. Kusch-Brandt, L. Byfield, A. Bywater, F. Coulon, T. Curtis, T. Gutierrez, A. Higson, J. Sadhukhan. 2025. *What is environmental biotechnology? although widely applied, a clear definition of the term is still needed*. Environments 12(10):393.
- Hui, M.L.Y., L.T.H. Tan, V. Letchumanan, Y.W. He, C.M. Fang, K.G. Chan, J.W.F. Law y L.H. Lee. 2021. *The extremophilic actinobacteria: from microbes to medicine*. Antibiotics 10(6):682.
- John, G.E., A.I. Elijah, B.N. Effiong, E.A. Okpo y J.A. Lennox. 2025. *Extremophiles and their Potentials in the Food Industries: A Review*. Asian Food Science Journal 24(1):48-60.
- Jonassen, K.R., L.H. Hagen, S.H. Vick, M. Arntzen, V.G. Eijsink, A. Frostegård, P. Lycus, L. Molstad, P.B. Pope y L.R. Bakken. 2022. *Nitrous oxide respiring bacteria in biogas digestates for reduced agricultural emissions*. The ISME Journal 16(2):580-590.
- Karunakaran, R., V.Y. Viva, P. Raja y M. Parthiban. 2025. *Quantification and microbial diversity analysis of ruminal Methanogenic populations in indian gir native cattle*. Asian Journal of Dairy and Food Research 44(3):457-466
- Kristjansson, J.K. y K.O. Stetter. 2021. *Thermophilic bacteria*. In: Thermophilic bacteria (pp. 1-18). CRC press.



- Lawrence, D., M. Coe, W. Walker, L. Verchot y K. Vandecar. 2022. *The unseen effects of deforestation: biophysical effects on climate*. *Frontiers in Forests and Global Change* 5:756115.
- Li, D., Y. Wang, Y. Huang, H. Zhou, X. Xia, W. Huang y C. Wang. 2025. *Computational study on potentially active antibacterial compounds in secondary metabolites of extremophilic microorganisms*. *ChemistryOpen* e202500460.
- Lim, L.W. 2025. *CRISPR-Cas applications in extremophiles: Thermophiles, psychrophiles, halophiles, acidophiles, alkaliphiles, piezophiles, xerophiles, radiophiles and metallophiles*. *Total Environment Microbiology* 100029.
- Liu, L., N. Salam, J.Y. Jiao, H.C. Jiang, E.M. Zhou, Y.R. Yin, H. Ming y W.J. Li. 2016. *Diversity of culturable thermophilic actinobacteria in hot springs in Tengchong, China and studies of their biosynthetic gene profiles*. *Microbial Ecology* 72(1):150-162.
- Luo, H., J. Quaas y Y. Han. 2024. *Decreased cloud cover partially offsets the cooling effects of surface albedo change due to deforestation*. *Nature Communications* 15(1):7345.
- Mashakhetri, K.D., C.S. Aishwarya, T. Prusty y F. Bast. 2024. *Secondary metabolites from extremophiles*. *Trends in biotechnology of Polyextremophiles* 177-201.
- McClain, C.R., S.R. Bryant, G. Hanks y M.W. Bowles. 2022. *Extremophiles in earth's deep seas: A view toward life in exo-oceans*. *Astrobiology* 22(8):1009-1028.
- Milojevic, T., M.A. Cramm, C.R. Hubert y F. Westall. 2022. *Freezing thermophiles: from one temperature extreme to another*. *Microorganisms* 10(12):2417.
- Miloudi-Agha, L. y M. Kebdani. 2026. *Mechanisms underpinning the biocontrol potential of halophilic and halotolerant bacillus species against fusarium and other fungal phytopathogens: an eco-friendly alternative for sustainable agriculture*. *Bacteria* 5(1):16.
- Moreno, M.L.I., R.B.M. Pérez, M.I.E. Alvarado y R.M.C. Ruíz. 2025. *Organismos halófilos: extremos y amantes de la sal*. *Enfoques Transdisciplinarios: Ciencia y Sociedad* 3(1):15-28.
- Murawska-Wlodarczyk, K., U. Korzeniak, A. Chlebicki, E. Mazur, C.C. Dietrich y A. Babst-Kostecka. 2022. *Metalliferous habitats and seed microbes affect the seed morphology and reproductive strategy of Arabidopsis halleri*. *Plant and Soil* 472(1):175-192.
- Nagarajan, D. y M. Hoonjan. 2024. *Inaugural editorial of discover biotechnology*. *Discover Biotechnology* 1(1):1.
- Oren, A. 2024. *Novel insights into the diversity of halophilic microorganisms and their functioning in hypersaline ecosystems*. *npj Biodiversity* 3(1):18.
- Pandey, A. y K. Dhakar. 2025. *Extreme thermal environments: reservoirs of industrially important thermozymes*. *Frontiers in Microbiology* 16:1739143.

- Pardo-Esté, C., J. Cortés, J. Castro-Severyn, V. Pérez, K. Henriquez-Aedo, F. Cuadros, C. Yañez, S. Cuadros, C. Dorador, V. Molina, Y. Eissler, P. Paquis, W.H. Jeffrey, P. Pozo, P.A. Pérez y M.B. Hengst. 2024. *Secondary metabolites with antimicrobial activity produced by thermophilic bacteria from a high-altitude hydrothermal system*. *Frontiers in Microbiology* 15:1477458.
- Petrov, M., Z. Nikolaeva y A. Dimitrov. 2023. *The impact of anthropogenic activity on the global environment*. *Science. Business. Society*. 8(2):59-64.
- Radchenkova, N., I. Panchev, S. Vassilev, M. Kuncheva, S. Dobrev y M. Kambourova. 2015. *Continuous cultivation of a thermophilic bacterium Aeribacillus pallidus 418 for production of an exopolysaccharide applicable in cosmetic creams*. *Journal of Applied Microbiology* 119(5):1301-1309.
- Ramos-Tapia, I., R. Nuñez, C. Salinas, P. Salinas, J. Soto y M. Paneque. 2022. *Study of wetland soils of the Salar de Atacama with different azonal vegetative formations reveals changes in the microbiota associated with hygrophile plant type on the soil surface*. *Microbiology Spectrum* 10(5):e00533-22.
- Rappaport, H.B. y A.M. Oliverio. 2024. *Lessons from extremophiles: functional adaptations and genomic innovations across the eukaryotic tree of life*. *Genome Biology and Evolution* 16(8):evae160.
- Rawat, M., M. Chauhan y A. Pandey. 2024. *Extremophiles and their expanding biotechnological applications*. *Archives of Microbiology* 206(6):247.
- Rekadwad, B.N., W.J Li, J. Gonzalez, R. Punchappady Devasya, A Ananthapadmanabha Bhagwath, R. Urana y P. Parwez. 2023. *Extremophiles: the species that evolve and survive under hostile conditions*. *3 Biotech* 13(9):316.
- Reyes-Pérez, J.J., L.G. Hernández-Montiel, S. Vero, J.C. Noa-Carrazana, E.E. Quiñones-Aguilar y G. Rincón-Enríquez. 2019. *Postharvest biocontrol of Colletotrichum gloeosporioides on mango using the marine bacterium Stenotrophomonas rhizophila and its possible mechanisms of action*. *Journal of Food Science and Technology* 56(11):4992-4999.
- Rivas-García, T., B. Murillo-Amador, J.J. Reyes-Pérez, R.G. Chiquito-Contreras, P. Preciado-Rangel, G.D. Ávila-Quezada, L. Lara-Capistran y L.G. Hernández-Montiel. 2022. *Debaryomyces hansenii, Stenotrophomonas rhizophila, and ulvan as biocontrol agents of fruit rot disease in muskmelon (Cucumis melo L.)*. *Plants* 11(2):184.
- Roy, B., D. Maitra, J. Ghosh y A.K. Mitra. 2022a. *Unique extremophilic Bacillus: their application in plant growth promotion and sustainable agriculture*. *Microbes and Microbial Biotechnology for Green Remediation* 287-304.



- Roy, P.S., R.M. Ramachandran, O. Paul, P.K. Thakur, S. Ravan, M.D. Behera, C. Sarangi y V.P. Kanawade. 2022b. *Anthropogenic land use and land cover changes-A review on its environmental consequences and climate change*. Journal of the Indian Society of Remote Sensing 50(8):1615-1640.
- Santos, A.P., C. Belfiore, C. Úrbez, A. Ferrando, M.A. Blázquez y M.E. Farías. 2023. *Extremophiles as plant probiotics to promote germination and alleviate salt stress in soybean*. Journal of Plant Growth Regulation 42(2):946-959.
- Sepe, F., E. Costanzo, E. Ionata y L. Marcolongo. 2025. *Biotechnological potential of extremophiles: Environmental solutions, challenges, and advancements*. Biology 14(7):847.
- Sethi, S. y G.S. Bhatti. 2024. *Biotechnology of extremophiles: advances and challenges*. Trends in Biotechnology of Polyextremophiles 417-440.
- Schultz, J., F. Modolon, R.S. Peixoto y A.S. Rosado. 2023. *Shedding light on the composition of extreme microbial dark matter: alternative approaches for culturing extremophiles*. Frontiers in Microbiology 14:1167718.
- Shrivastava, M., A. Kumar y P. Saxena. 2024. *Bioactive compounds/metabolites from extremophiles for biocontrol and plant disease management*. In: *Extremophiles for Sustainable Agriculture and Soil Health Improvement* (pp. 121-136). Cham: Springer Nature Switzerland.
- Sikandar, S., A. Jamal, A. Mansoor, M.M. Bekhit, S. Ghazanfar, M.I. Ali, M. Urynowicz y Z. Huang. 2024. *Deciphering supramolecular arrangements, micellization patterns, and antimicrobial potential of bacterial rhamnolipids under extreme treatments of temperature and electrolyte*. Frontiers in Microbiology 15:1493843.
- Stan-Lotter, H. y S. Fendrihan. 2015. *Halophilic archaea: life with desiccation, radiation and oligotrophy over geological times*. Life 5(3):1487-1496.
- Stephens, T.G., J. Van Etten, T. McDermott, W., Christian, W., Chaverra, J., Gurney, Y. Lee, H. Kim, C.H. Cho, E. Chovancek, P. Westhoff, A. Otte, T.R. Northen, B.P. Bowen, K.B. Louie, K. Barry, I.V. Grigoriev, T. Mock, S.L. Liu, S. Miyagishima, M. Yoshinaga, A. Weber, H.S. Yoon y D. 2024. *Temporal dynamics in a red alga dominated geothermal feature in Yellowstone National Park*. ISME communications 4(1):ycae151.
- Sun, H., X. Li, M. Chen, M. Zhong, Y. Li, K. Wang, Y. Du, X. Zhen, R. Gao, Y. Wu, Y. Shi, L. Yu, Y. Chen, Y. Li, J.D. Jiang, B. Hong y S. Si. 2022. *Multi-omics-guided discovery of omicsynins produced by Streptomyces sp. 1647: pseudo-tetrapeptides active against influenza a viruses and coronavirus HCoV-229E*. Engineering 16:176-186.

- Sun, J., X. He, R. Al-Tohamy y S.S. Ali. 2024. *Potential applications of extremophilic bacteria in the bioremediation of extreme environments contaminated with heavy metals*. Journal of Environmental Management 352:120081
- Szabelewska, A. 2025. Thermophiles: Masters of heat and their impact on humanity. Tutoring Gedanensis 10(3):47-62.
- Toral, L., M. Rodríguez, F. Martínez-Checa, A. Montaña, A. Cortés-Delgado, A. Smolinska, I. Llamas y I. Sampedro. 2023. *Corrigendum: Identification of volatile organic compounds in extremophilic bacteria and their effective use in biocontrol of postharvest fungal phytopathogens*. Frontiers in Microbiology 14:1267324.
- Trenozhnikova, L.P., G.B. Baimakhanova, B.B. Baimakhanova, A.S. Balgimbayeva, S.T. Daugaliyeva, E.R. Faizulina, L.G. Tatarkina, G.A. Spankulova, D.A. Berillo y J.A. Beutler. 2024. *Beyond traditional screening: Unveiling antibiotic potentials of actinomycetes in extreme environments*. Heliyon 10(22).
- Tuesta-Popolizio, D.A., J.B. Velázquez-Fernández, J. Rodríguez-Campos y S.M. Contreras-Ramos. 2021. *Isolation and identification of extremophilic bacteria with potential as plant growth promoters (PGPB) of a geothermal site: a case study*. Geomicrobiology Journal 38(5):436-450.
- Uppar, A.P., G.L. Vanti, N. Poondla, R.S Kaulgud y M.M. Kurjogi. 2024. *Applications of extremophiles in therapeutics*. Trends in Biotechnology of Polyextremophiles 231-242.
- Xie, D., X. Cai, C. Yang, L. Xie, G. Qin, M. Zhang, Y. Huang, G. Gong, X. Chang y H. Chen. 2021. *Studies on the control effect of Bacillus subtilis on wheat powdery mildew*. Pest Management Science 77(10):4375-4382.
- Xie, Y., Y. Ma, X. Sun, H. Liu y Z. Qiang. 2025. *Comprehensive analysis of dehydrin genes reveals ZmDHN3 contributes to drought resistance in maize (Zea Mays L.)*. BMC Plant Biology 25(1):1186.
- Yu, Z.M. 2023. *Evaluating extremophilic microorganisms in industrial regions*. Foods and Raw Materials 11(1):162-171.
- Zada, S., M. Rafiq y W. Sajjad. 2025. *Industrial application of extreme microbes: harnessing the power of nature's extremophiles*. Frontiers in Microbiology 16:1697504.
- Zenteno-Alegría, C.O., L.A. Yarzabal Rodríguez, J. Ciancas Jiménez, P.E. Álvarez Gutiérrez, N. Gunde-Cimerman y R.A. Batista-García. 2024. *Fungi beyond limits: the agricultural promise of extremophiles*. Microbial Biotechnology 17(3):e14439.



- Zhang, N., Z. Ren, D. Wei, M. Yang, M. Niu, C. Shen, X. Jin, M. Wei, J. Choi, M. Park y Z. Li. 2025a. *Discovery, expression, and characterization of highly tolerant superoxide dismutases from extremophiles for potential industrial applications*. International Journal of Biological Macromolecules 319:145272.
- Zhang, F., X. Jiao, Y. Wu, R. Sun, C. Wan, L. Bai, X. Luo y L. Li. 2025b. *PPtase-activated production of borrelidin from extremophilic actinobacteria against multidrug-resistant cotton pathogen Verticillium dahliae*. The Journal of Antibiotics 78(4):219-228.

Cita

Armendáriz Marrón, A.K., M. de J. Briseño López, C. Guluarte y L.G. Hernández Montiel. Las bacterias extremófilas: Hábitat, antecedentes, metabolitos y aplicaciones. Recursos Naturales y Sociedad, 2026. Vol. 12(1): 217-236.
<https://doi.org/10.18846/renaysoc.2026.12.12.01.0014>.

Sometido: 26 de marzo de 2026

Aceptado: 5 de junio de 2026

Editora asociada: Dra. Crisalejandra Rivera Pérez

Editora ejecutiva: Dra. Crisalejandra Rivera Pérez

Diseño gráfico editorial: Ing. Fca. Elizabeth Villegas Carrasco

El pasto salado nipa (*Distichlis palmeri*) como sistema modelo para el estudio de la tolerancia a salinidad y la microbiota asociada

El pasto salado nipa (*Distichlis palmeri*) como sistema modelo para el estudio de la tolerancia a salinidad y la microbiota asociada

Carolina Gallardo-Ybarra¹, Corina Hayano-Kanashiro^{1*},
Luis Fernando Olivarría-Arnold¹, Blanca Estela Romero-López², Jesse Poland³

Resumen

En las costas del noroeste mexicano, donde las altas temperaturas son impetuosas, el pasto marino Nipa, o, por su nombre en inglés, *Nipa Palmer saltgrass* (*Distichlis palmeri*), ha logrado prosperar aún en condiciones de extrema salinidad y calor. Dicha planta era de gran importancia en la alimentación de las tribus indígenas. Hoy se sabe que es una especie clave para la salud de los humedales y de los ambientes costeros. Sin embargo, aún se desconoce gran parte de la información sobre la especie, entre ellas la ecología microbiana involucrada en su supervivencia en condiciones extremas.

Palabras clave: Nipa, *Distichlis palmeri*, ecología microbiana.

¹Departamento de Investigaciones Científicas y Tecnológicas (DICTUS)-Universidad de Sonora.
Blvd. Luis Donaldo Colosio S/N casi esq. Con Sahuaripa. Col. Centro, CP 83000 Hermosillo, Sonora.

²Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste, S.C. (CIBNOR). Instituto Politécnico Nacional 195, Playa Palo Santa Rita Sur, La Paz, Baja California Sur, 23096, México.

³Biological and Environmental Science and Engineering Division, King Abdullah University of Science and Technology, 23955 Arabia Saudita.



* Autor de correspondencia: angela.hayano@unison.mx

Abstract

Along the northwestern coast of Mexico, where temperatures soar, the seagrass Nipa, or Nipa Palmer saltgrass (*Distichlis palmeri*), has thrived even under conditions of extreme salinity and heat. This plant was of great importance to the diet of indigenous tribes. Today, it is recognized as a key species for the health of wetlands and coastal environments. However, much about the species remains unknown, including the microbial ecology involved in its survival under extreme conditions.

Keywords: Nipa, *Distichlis palmeri*, microbial ecology.

Introducción

La crisis climática ha alterado el ritmo de la Tierra, lo que se ha traducido en sequías más severas y prolongadas. Esto ha puesto en peligro la seguridad alimentaria en diversas regiones del planeta. En México la crisis del agua es un tema de gran relevancia, ya que a inicios del 2025 cerca de 300 municipios reportaron sequía, principalmente en estados del norte del país, como Sonora, Chihuahua, Sinaloa y Nuevo León (CONAGUA, 2026). Durante el 2022, la sequía fue uno de los principales factores de pérdida en la producción agrícola, las pérdidas masivas en cultivos de maíz y arroz han promovido la búsqueda de especies alternativas que tengan resistencia a condiciones extremas de calor, salinidad o suelos impactados (Bhattacharya, 2019; Overpeck y Udall, 2020).

Suelos salinos: un reto creciente para los ecosistemas y la sociedad

Las prácticas agrícolas intensivas, caracterizadas por el uso de fertilizantes minerales y la falta de un aporte continuo de materia orgánica, conllevan a la degradación del suelo. A esta problemática se suma la aplicación frecuente de cal para corregir la acidificación del suelo (descenso del pH), un efecto secundario provocado precisamente por el uso continuo de fertilizantes nitrogenados (Céspedes y Wolf, 2021; FAO, 2024). Es importante destacar que el cambio climático altera las lluvias y eleva las temperaturas en diferentes regiones, lo que obliga a la sobreexplotación del agua subterránea y expone a los suelos a una mayor concentración de sales debido a la evaporación y al riego de los suelos con recursos hídricos escasos y degradados (Eswar et al., 2021).

Los suelos halomórficos son característicos de zonas áridas y semiáridas, así como de áreas costeras de baja altitud; los cuales se clasifican en salinos, salino-alcalinos o sódicos (alcalinos). Mientras que los suelos salinos se definen por concentrar niveles perjudiciales de sales solubles, los alcalinos poseen un exceso de iones de sodio en su complejo de intercambio, lo que deteriora gravemente su estructura física. Por su parte, los suelos sódicos representan el estado más severo de degradación terrestre (Buringh, 1970; Pessoa *et al.*, 2019).

Se estima que el costo anual global de la degradación del suelo por salinización en zonas de riego podría alcanzar los 27,300 millones de dólares, debido a las pérdidas en la producción agrícola. (Qadir *et al.* 2014). En el 2021, alrededor de 11 millones de hectáreas han sido afectadas por la salinidad y, según el Ministerio de Agricultura Rural y Desarrollo (SADER)-Mexico, alrededor del 42 % de los suelos agrícolas presentan un grado de afectación por salinidad (SADER, 2021a,b).

En especies susceptibles al estrés salino, la salinidad afecta el crecimiento vegetal debido al estrés osmótico, efectos iónicos específicos y desbalances nutricionales (Ashraf, 2004). Estos efectos se manifiestan a nivel fisiológico, bioquímico y molecular (Munns y James, 2003; Tester y Davenport, 2003). Las altas concentraciones de sales disminuyen el potencial hídrico del suelo, limitando la absorción de agua y nutrientes, e incluso provocando plasmólisis y sequía fisiológica, lo que reduce la turgencia, induce marchitamiento y disminuye el rendimiento vegetal (Gamalero *et al.*, 2020; Pandit *et al.* 2024). Asimismo, la acumulación excesiva de iones como Na^+ , Cl^- , HCO_3^- y CO_3^{2-} genera toxicidad y alteraciones metabólicas (Volkov, 2015). El exceso de Na^+ también compite con la absorción de nutrientes esenciales como K^+ , Ca^{2+} y Mg^{2+} (Blaylock *et al.*, 1994), mientras que la acumulación de sodio puede ocasionar daño celular y muerte celular rápida (Munns, 2002). Además, la salinidad reduce la actividad fotosintética mediante el cierre estomático y la disminución de la actividad de la enzima Rubisco (Chaves *et al.*, 2009). En etapas reproductivas, inhibe procesos como la microsporogénesis y favorece el aborto de óvulos y la senescencia embrionaria (Läuchli y Grattan, 2007; Munns y Rawson, 1999).

En este contexto la salinización del suelo afecta diferentes servicios ecosistémicos clave como la purificación del agua y la fertilidad de la tierra, por lo cual se ven afectados directamente los rendimientos de los cultivos agrícolas (Shrivastava y Kumar, 2015). Por todo esto, se han desarrollado varias estrategias para disminuir los efectos tóxicos causados por la alta salinidad en el crecimiento de las plantas, una de ellas es el uso de bacterias promotoras del crecimiento vegetal (BPCV) (Dimkpa *et al.*, 2009). Las comunidades microbianas asociadas a las raíces de las plantas son conocidas como rizosfera. Estos microorganismos son fundamentales para la adquisición de nutrientes, especialmente cuando la alta concentración de sales limita su disponibilidad. Bacterias



y hongos rizosféricos pueden solubilizar fósforo, fijar nitrógeno atmosférico y liberar compuestos quelantes que facilitan la absorción de micronutrientes como el hierro y el zinc. Además, algunos microorganismos promueven el crecimiento vegetal al producir fitohormonas y enzimas que mejoran la arquitectura radicular e incrementan la superficie de absorción (Shrivastava y Kumar, 2015; Velasco-Jiménez *et al.* 2020).

Las plantas halófitas especialistas en ambientes extremos

Las halófitas son plantas que habitan naturalmente en suelos con alta salinidad, término empleado desde hace dos siglos (Flowers *et al.* 1986). Las plantas halófitas están conformadas por una gran variedad de especies, que pueden ser herbáceas, arbustos e incluso árboles, como los manglares (Glenn, 1998). Gracias a sus adaptaciones fisiológicas, estas pueden filtrar las sales o absorber agua salina y mantener altas concentraciones de sales, mediante un mecanismo de regulación osmótica y de almacenamiento de sales a nivel tejido (Rueda-Puente *et al.* 2012; Greenway y Munns, 1980). En las halófitas hay un aumento en la densidad estomática y una disminución en el tamaño de los estomas; lo que proporciona una mejor adaptación a ambientes salinos. Esto podría ser responsable de reducir la pérdida de agua a través de la superficie foliar y, ser crucial en condiciones de sequía fisiológica. Este fenómeno se ha observado en diversas gramíneas como *Distichlis spicata*, *Triticum aestivum* y *Hordeum vulgare* (Keshavarzi, 2021).

La adaptación de diversas gramíneas, como *Distichlis spicata*, *Triticum aestivum* y el género *Hordeum* a entornos salinos está estrechamente vinculada a ajustes en la arquitectura foliar, específicamente mediante el incremento de la densidad estomática y la reducción del tamaño de los estomas. Esta modificación anatómica optimiza la eficiencia en el uso del agua al minimizar la transpiración superficial, un mecanismo de supervivencia determinante para mitigar los efectos de la sequía fisiológica inducida por la salinidad (Keshavarzi, 2021).

El pasto salado *Distichlis palmeri*

Este pasto es comúnmente denominado Nipa o pasto salado y es sinónimo de *Uniola palmeri* (Vasey). El pasto salado es una gramínea halófito nativa del noroeste de México, particularmente del delta del río Colorado, resistente a la salinidad, endémico y característico de las zonas costeras del norte del Golfo de California de México (Felger, 2023). Las plantas del género *Distichlis* se caracterizan por presentar flores agrupadas en espiguillas visibles en la punta de los tallos. Sus hojas se disponen en dos filas bien definidas (Fig. 1) y sus estructuras florales son ovaladas con bordes

marcados. Además, son plantas que se expanden mediante rizomas rastreros y es una especie dioica, ya que los órganos reproductores masculinos y femeninos se presentan en individuos separados, lo cual forma parte de su estrategia reproductiva (Arrieta y Peterson, 2017). Las plantas tienen tallos rígidos y erectos, que en condiciones naturales raramente alcanzan 120 cm. Las hojas presentan una forma acicular a lineal, distribuyéndose de forma alterna entre los nudos del tallo. Además, sus hojas se caracterizan por excretar sales a través de las glándulas de sal (Bell y Columbus, 2008; Clayton *et al.* 2006; Fassett, 1925).

Entre las características biológicas de *D. palmeri* destaca que es una planta dioica, además presentan fotosíntesis C4. La fotosíntesis C4 se caracteriza por modificaciones en la expresión génica, especializaciones metabólicas y una anatomía foliar particular, en la cual hay un mecanismo de concentración de carbono eficiente, lo cual resulta de gran ayuda para plantas de regiones áridas. Generalmente, las plantas C4 presentan la anatomía tipo Kranz, compuesta por dos tipos de células fotosintéticas: las células de la vaina del haz (BS), que rodean los centros vasculares, y las células del mesófilo (M), que a su vez envuelven a las primeras (Garner *et al.*, 2016).



Figura 1. Pasto salado (*Distichlis palmeri*), Bahía de Kino (Sonora)-México. Tomada por Carolina Gallardo Ybarra.



Esta planta produce una semilla similar a la del trigo o del arroz, lo cual es de gran importancia, ya que hace siglos el grupo étnico Cucapá utilizaba estos granos para su alimentación. El proceso de cosecha de *D. palmeri* requería de una expedición anual a la boca del río, con una duración aproximada de 5 semanas, que abarcaba desde finales del mes de abril hasta los primeros días de junio, un periodo que no incluía el tiempo adicional invertido en los trayectos de ida y vuelta al campo: los indios cucapá viajaban en balsas largas de junco o de tule para realizar la cosecha de las plantas que se encontraban en las zonas intermareales (Fig. 2). El grano se cocinaba como cereal, el cual era tostado o usado para la elaboración de pan o rellenos. Estudios realizados sobre el grano de Nipa muestran que este aporta un alto contenido de aminoácidos, no contiene gluten y tiene un sabor agradable, similar al de la nuez. El Informe de las Naciones Unidas sobre el Medio Ambiente (2006) afirma sobre la planta: «Es una sólida candidata para convertirse en un importante cultivo alimentario mundial y podría convertirse en el mayor regalo de este desierto al mundo» (Kelly, 1977; Vasey, 1989).



Figura 2. Indígenas Cucapá cosechando pasto salado. (Imagen creada con Inteligencia artificial ChatGPT).

Las lagunas costeras en Sonora

En México la extensión de la línea de costa es de aproximadamente 12,022 km (SIMAR, 2022). En dichas áreas se encuentran una infinidad de ecosistemas marinos, de los cuales uno de los de gran importancia son las marismas. Las marismas salinas son áreas de tierra cubiertas principalmente por vegetación halófila que se inundan regularmente con el mar, se ubican por lo general en sitios protegidos como desembocaduras de ríos, bahías, caletas o lagunas costeras, entre otros (Allen, 2000). Donde pueden encontrarse especies como el pasto salado del género *Distichlis spp.*, y otras especies del género *Spartina spp.*, *Juncus spp.*, *Scirpus spp.*, *Limonium spp.*, *Aster spp.*, *Triglochin spp.* (Correll *et al.* 2019).

Las lagunas costeras se encuentran entre los ecosistemas de mayor importancia, siendo uno de los ambientes más ricos y variados. Estos ambientes poseen aguas cálidas y tranquilas que cumplen diferentes funciones, como ser el lugar seguro de reproducción para especies de aves migratorias, así como fungir como áreas de guarderías de larvas de peces e invertebrados de importancia comercial (Gómez-León *et al.*, 2018; Rosenberg, 1985). Dentro de estos ecosistemas se encuentran diversas plantas, como los mangles y algunas especies halófitas, que ayudan a purificar los suelos de las altas concentraciones de sales, así como de diversos contaminantes (Ball, 1988). A pesar de todo esto, las lagunas costeras han sufrido el impacto de la actividad humana, ya que son constantemente contaminadas por desechos agrícolas, acuícolas e industriales (Martínez-Córdova *et al.* 2009; Michael Beman *et al.* 2005; Rosenberg, 1985).

La laguna “La Cruz” es considerada una de las que presentan la mayor productividad primaria del Golfo de California (Castro-Longoria y Grijalva-Chon, 1991). Está localizada en el municipio de Hermosillo (Sonora), en Bahía de Kino, en los meridianos 111°50’ y 111°56’ Oeste, entre los paralelos 28°45’ y 28°49’ Norte (Grijalva-Chon *et al.* 1996). Se caracteriza por tener un clima semicálido y muy seco, con una temperatura promedio anual de 28 ± 4.5 °C y lluvias muy escasas (Holguín, 1994; Reynaga-Franco *et al.* 2019). El sitio es conocido como un humedal costero con manglares, marismas e islotes, y constituye una zona clave de refugio, alimentación y reproducción para diversas especies protegidas, incluidas aves, tortugas marinas y peces en peligro de extinción. Este ecosistema brinda servicios esenciales para las comunidades locales, especialmente para la pesca y la ostricultura, por lo cual fue catalogado como sitio RAMSAR, que son humedales de importancia internacional que brindan servicios ecosistémicos y que fueron designados bajo los criterios de la Convención de Ramsar, que pueden incluir la conservación de biodiversidad biológica (RAMSAR, 2025).

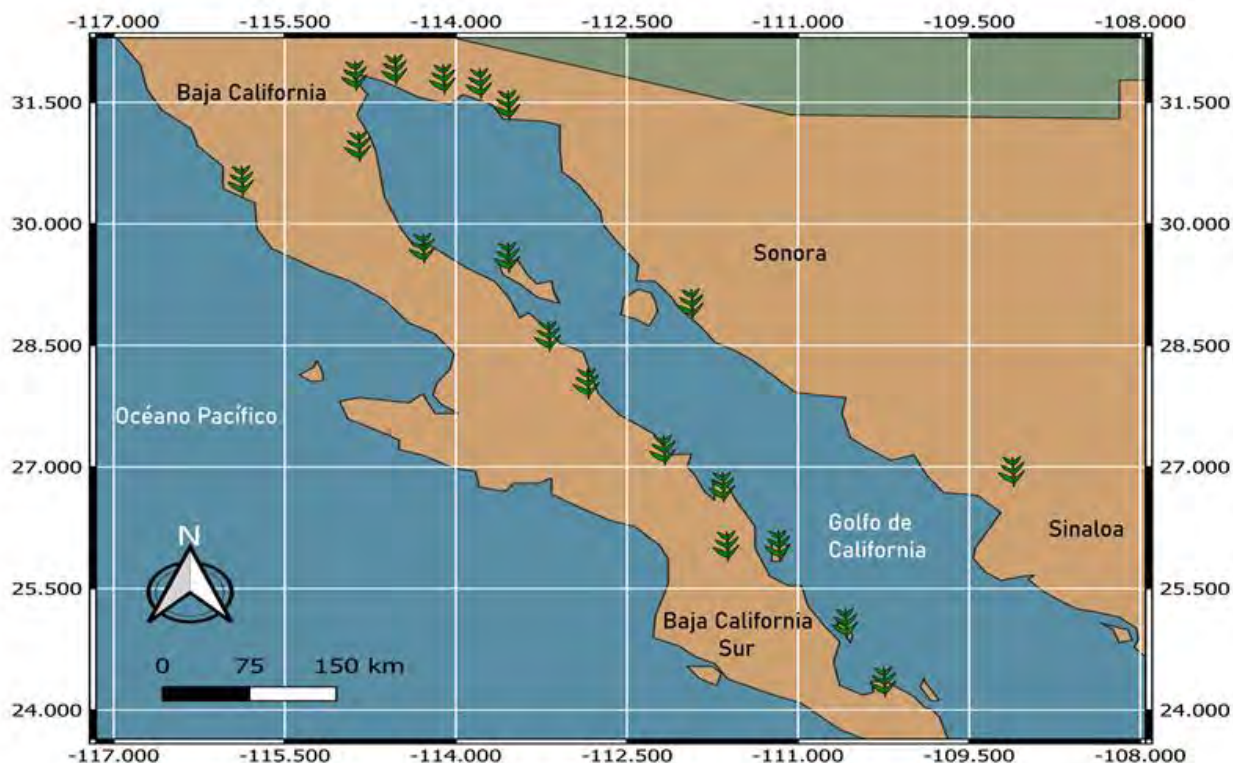


Figura 3. Mapa de distribución de *D. palmeri* en México. (Información de (eHALOPH,2026).

Actualmente se tienen registros de la especie *D. palmeri* en el área del estero de La Cruz, Bahía de Kino (Fig. 3) (Ehaloph, 2026; Meltzer et al. 2012). Su presencia en dicha laguna es de gran importancia, ya que la especie se distribuye en la zona de Bahía de Kino, en áreas de salinidades que llegan hasta los 58 ppt (Fig. 4). Además, es importante destacar que la especie es capaz de resistir las fluctuaciones de temperatura y salinidad que se presentan en dicha zona, lo que representa un alto valor para la conservación, así como para el estudio de los recursos vegetales con posibles aplicaciones biotecnológicas. Por lo tanto, representan una oportunidad para estudiar los mecanismos de resistencia al estrés salino en esta especie. Este conocimiento puede contribuir a la mejora de los cultivos o al desarrollo de sistemas agrícolas en suelos afectados.



Figura 4. Poblaciones de *D. palmeri* en Bahía de Kino, Sonora en el mes de enero 2026 (izquierda) y marzo de 2026 (derecha).



El suelo como soporte de microbioma y redes invisibles de cooperación entre plantas y microorganismos

En el estudio de las plantas, el suelo constituye un elemento de interés central. Este no solo actúa como sustrato físico, sino también como un sistema dinámico en el que se desarrolla una compleja red de interacciones biológicas. Los organismos vegetales y animales que se desarrollan y mueren en su interior o sobre su superficie son descompuestos por la actividad microbiana, transformándose en materia orgánica que se integra en la matriz edáfica. El suelo posee una gran complejidad estructural y funcional; está compuesto por minerales, aire y agua en proporciones variables y se considera un sistema heterogéneo, debido a la gran diversidad de sus componentes (abióticos y bióticos), y a los procesos que se llevan a cabo en él. Como todo sistema, el suelo está en constante evolución y los factores ambientales y bióticos son los que van modelando su estructura (FAO, 2024; Srivastava *et al.* 2019).

Es importante destacar que las lagunas son ecosistemas donde se mezclan aguas dulces y saladas, formando ambientes salobres con gradientes de salinidad que van desde la conexión con el mar hasta las desembocaduras de los ríos. Muchas de las lagunas costeras están rodeadas de manglares y vegetación halófila que aportan grandes cantidades de materia orgánica a través de sus hojas. Esta acumulación convierte el suelo y el fondo marino en un ambiente fangoso, rico en materia orgánica en descomposición y con escasez de oxígeno (anóxico), lo que favorece la retención de materiales y la acumulación de sedimentos (Contreras *et al.* 1996; Lankford, 1977).

Siendo así, las lagunas costeras se caracterizan por poseer suelos ricos en nutrientes, debido a la proliferación de diversos microorganismos que promueven la mineralización de la materia orgánica, lo cual genera una gran cantidad de nutrientes que resultan esenciales para las plantas (Kathiresan *et al.* 1995). En los ecosistemas costeros, diversos microorganismos establecen simbiosis con las plantas y les ayudan a sobrevivir en condiciones extremas como la alta salinidad o la presencia de contaminantes. Estos simbioses, principalmente bacterias y hongos, al estar protegidos por sus hospederos y alimentarse de los compuestos que las raíces exudan, alcanzan grandes poblaciones y mantienen una intensa actividad biológica, cumpliendo un papel fundamental en los ciclos de nutrientes (Beinart, 2019). Por ejemplo, las ectomicorrizas y ciertos hongos endófitos llamados "septados oscuros" contribuyen a descomponer la materia orgánica más resistente mediante enzimas que liberan fuera de sus células (Moreau *et al.* 2019).

Entre los microorganismos asociados, se encuentran las bacterias que habitan distintos compartimentos de las plantas. Las bacterias del género *Kushneria*, están presentes tanto en el

suelo alrededor de las raíces (rizosfera) como en las hojas (filosfera) de manglares y halófitas como la *Salicornia* (Mapelli *et al.* 2013). También son clave las del género *Halomonas*, que habitan la rizosfera de diversas plantas costeras y promueven el crecimiento de raíces en especies como *Sesuvium portulacastrum* y en manglares, ayudándoles a tolerar el estrés salino y los metales pesados (Mapelli *et al.* 2013; Meinzer *et al.* 2023). Las bacterias del género *Bacillus* también participan activamente: por ejemplo, la cepa *Bacillus flexus* es atraída por las raíces de la halófito *Limonium sinense* mediante sustancias que esta secreta, lo que favorece su crecimiento bajo condiciones salinas (Xiong *et al.* 2020). Por último, grupos como *Bacteroidota* y *Actinobacteriota* han sido identificados en hojas y raíces de manglares como *Avicennia marina* (Yang *et al.* 2023). En *Distichlis spicata* se ha encontrado especies de microorganismos de las familias Halobacteriaceae, Bacillaceae, Nocardiopteraceae, Ectothiorhodospiraceae y Moraxellaceae (Zhang *et al.* 2019).

Debido a la gran importancia de los microorganismos, las ciencias ómicas que estudian grandes cantidades de datos provenientes del ADN, contribuyen al conocimiento de la riqueza taxonómica de las comunidades microbianas. Para ello, la metagenómica y estudios de metabarcoding están revolucionando la forma en que entendemos la relación entre las plantas y los microorganismos que las habitan (Burki *et al.* 2021). Gracias a este tipo de análisis, hoy sabemos que estos microorganismos son especies clave para la salud vegetal. Cada vez hay más bases de datos públicas que almacenan información genómica y genética de estas comunidades microbianas, obtenidas directamente de su entorno natural, así como del interior de las plantas (endófitos). Esto ha permitido identificar no solo qué microbios están presentes, sino también sus funciones y actividades. En la técnica de metabarcoding: procedimiento de Reacción en Cadena de la Polimerasa (conocido por sus siglas en inglés: PCR), amplifica fragmentos cortos de ADN de marcadores genéticos específicos, que luego pueden identificarse mediante secuencias de referencia conocidas, lo que permite la identificación a nivel de familia o género (Fig. 5) (Shehzad *et al.* 2012).

Otras técnicas utilizadas para determinar comunidades microbianas en el suelo es la metagenómica. Esta técnica implica la secuenciación aleatoria directa de todo el ADN genómico en lugar de un pequeño número de marcadores genéticos (Bohmann *et al.* 2014; Bovo *et al.* 2018; Serite *et al.* 2023). También, para estudios metagenómicos es necesario desarrollar herramientas bioinformáticas capaces de manejar enormes volúmenes de datos e identificar las especies de microorganismos presentes en los diferentes ecosistemas (Daniel, 2005). Sin embargo, todos los estudios referentes a metagenómica y metabarcoding han propiciado la generación de más



preguntas, como: ¿qué especies forman estas comunidades?, ¿qué funciones desempeñan?, ¿cómo actúan en tejidos como tallos, hojas o raíces? y ¿cuál es la relación entre estos microorganismos y las plantas? Siendo así, la necesidad de desarrollar más investigación en este ámbito (Melcher et al. 2014).

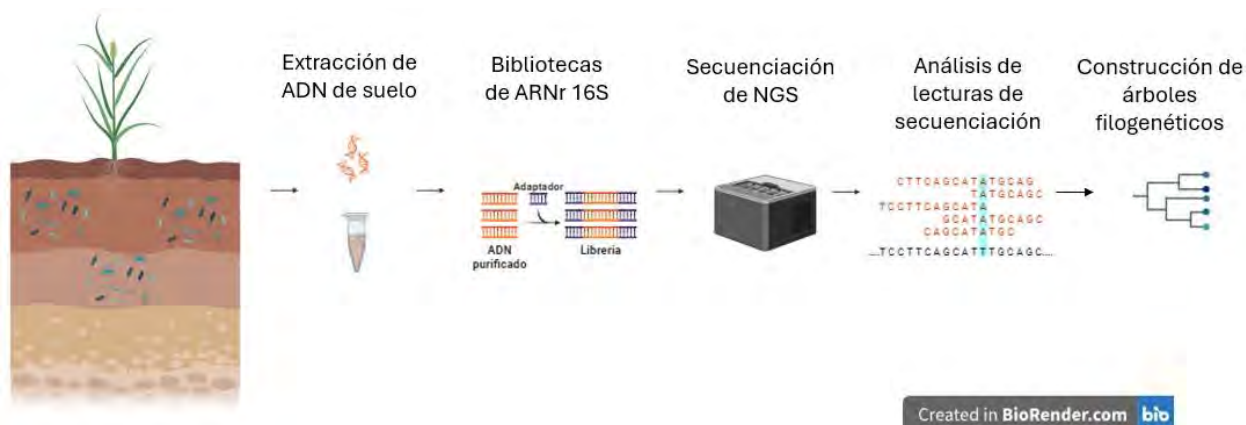


Figura 5. Representación esquemática de la metodología de metabarcoding basada en la secuenciación del gen ARNr 16S para la identificación de bacterias en suelo.

Finalmente, cabe resaltar que *Distichlis palmeri*, conocida comúnmente como planta Nipa, representa una especie de gran importancia para la seguridad alimentaria en México. Esta planta forma parte de la vegetación asociada a lagunas costeras y su distribución se localiza principalmente dentro de Áreas Naturales Protegidas. Esta planta halófila y endémica que presenta su mayor productividad en la Reserva de la Biosfera Alto Golfo de California y Delta del Río Colorado se ha utilizado desde tiempos ancestrales como una importante fuente de alimento. Nipa puede tolerar concentraciones elevadas de sales en los suelos. Además, puede producir hasta 1.2 toneladas por hectárea de un grano de excelente calidad, comparable incluso al del trigo. Esta especie ya ha sido utilizada para la producción de grano y como forraje en otros países y, pese a ser endémica de nuestro país, su uso es escaso en México. Sin duda, la planta nipa tiene un gran potencial para aprovechar suelos agrícolas que se han vuelto hipersalinos debido al riego y a la aplicación excesiva de agroquímicos y, por ello, debe ser considerada como una alternativa ante la crisis alimentaria que enfrenta la humanidad (CONANP, 2018). Es importante mencionar que la FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura) destaca que debe promoverse la implementación de especies resistentes a altas salinidades, así como al desarrollo de los mercados de las halófitas. En este contexto, es fundamental desarrollar investigaciones orientadas al estudio de especies resistentes a condiciones extremas, con la finalidad de generar a futuro, estrategias de cultivo sustentables que contribuyan a enfrentar la posible crisis alimentaria global.

Bibliografía

- Allen, J.R.L. 2000. Morphodynamics of Holocene salt marshes: A review sketch from the Atlantic and Southern North Sea coasts of Europe. *Quaternary Science Reviews*. 19 (12): 1155–1231.
- Arrieta, Y.H. y P.M. Peterson. 2017. *Familia Gramineae subfamilia Chloridoideae I: (Género Muhlenbergia)*. *Flora del Bajío*. Instituto de Ecología AC. Pátzcuaro, Michoacán, México. pp. 3-10.
- Ashraf, M. 2004. *Some important physiological selection criteria for salt tolerance in plants*. *Flora - Morphology, Distribution, Functional Ecology of Plants*. 199 (5): 361–376.
- Ball, M.C. 1988. *Ecophysiology of mangroves*. *Trees*. 2 (3): 129–142.
- Beinart, R.A. 2019. *The Significance of Microbial Symbionts in Ecosystem Processes*. *mSystems*. 4 (3): e00127-19.
- Bell, H.L. y T.J. Columbus. 2008. *Proposal for an Expanded Distichlis (Poaceae, Chloridoideae): Support from Molecular, Morphological, and Anatomical Characters*. *Systematic Botany*. 33 (3): 536–551.
- Beman, J.M., K.R. Arrigo y P.A. Matson. 2005. *Agricultural runoff fuels large phytoplankton blooms in vulnerable areas of the ocean*. *Nature*. 434 (7030): 211–214.
- Bhattacharya, A. 2019. *Global Climate Change and Its Impact on Agriculture*. *Changing Climate and Resource Use Efficiency in Plants*. Academic Press.
- Blaylock, A.D. 1994. Soil salinity, salt tolerance and growth potential of horticultural and landscape plants. Co-operative Extension Service, University of Wyoming, Department of Plant, Soil and Insect Sciences, College of Agriculture, Laramie, Wyoming.
- Bohmann, K., A. Evans, M.T.P. Gilbert, G.R. Carvalho, S. Creer, M. Knapp, D.W. Yu y M. Bruyn. 2014. *Environmental DNA for wildlife biology and biodiversity monitoring*. *Trends in Ecology y Evolution*. 29 (6): 358–367.
- Bovo, S., A. Ribani, V.J. Utzeri, G. Schiavo, F. Bertolini y L. Fontanesi. 2018. *Shotgun metagenomics of honey DNA: Evaluation of a methodological approach to describe a multi-kingdom honey bee derived environmental DNA signature*. *PLOS One*. 13 (10): e0205575.
- Buringh, P. 1970. *Introduction to the study of soils in tropical and subtropical regions*. (2nd ed.). Wageningen Centre for Agricultural Publishing and Documentation.



- Burki, F., M. Sandin y M. Jamy. 2021. *Diversity and ecology of protists revealed by metabarcoding*. Current Biology. 31: R1267–R1280.
- Castro-Longoria, R. y J.M. Grijalva-Chon. 1991. *Spatio-temporal variability of nutrients and seston in the coastal lagoon La Cruz, Sonora*. Ciencias Marinas. 17 (2): 83–97.
- Céspedes, C y M.W. Wolf. 2021. La materia orgánica como eje del manejo sustentable de los suelos. In Manual de prácticas agrícolas para una agricultura sustentable | FAO (Vol. 426). INIA - Instituto de Investigaciones Agropecuarias. <https://www.fao.org/family-farming/detail/es/c/1733237/>
- Chaves, M.M., Flexas, J y C. Pinheiro. 2009. *Photosynthesis under drought and salt stress: Regulation mechanisms from whole plant to cell*. Annals of Botany. 103 (4): 551–560.
- Clayton, W.D., K.T. Harman y H. Williamson. 2006. *World Grass Species - Synonymy database The Board of Trustees of the Royal Botanic Gardens, Kew*. En: <http://powo.science.kew.org/taxon/urn:lsid:ipni.org:names:82339-2> (Consultado el 24/02/2026)
- CONAGUA. 2026. *Monitor de Sequía en México*. En: <https://smn.conagua.gob.mx/es/climatologia/monitor-de-sequia/monitor-de-sequia-en-mexico>. (Consultado 12/02/2026).
- CONANP. 2018. *100 años de conservación en México*. SEMARNAT-CONANP.
- Contreras, B.F., O.L. Castañeda, R. Torres-Alvarado y M.F. Gutiérrez. 1996. *Nutrientes en 39 lagunas costeras mexicanas*. Revista de Biología Tropical. 44: 417–425.
- Correll, M.D., W. Hantson, T.P. Hodgman, B.B. Cline, C.S. Elphick, W. Gregory Shriver, E.L. Tymkiw y B.J. Olsen. 2019. *Fine-Scale Mapping of Coastal Plant Communities in the Northeastern USA*. Wetlands. 39 (1): 17–28.
- Daniel, R. 2005. *The metagenomics of soil*. Nature Reviews Microbiology 3 (6): 470–478.
- Dimkpa, C., T. Weinand y F. Asch. 2009. *Plant–rhizobacteria interactions alleviate abiotic stress conditions*. Plant, Cell & Environment. 32 (12): 1682–1694.
- eHALOPH. 2026. *eHALOPH - Show Plant*. De: <https://ehaloph.uc.pt/showplant/13171?p=1>. (Consultado el 24/02/2026)
- Eswar, D., R. Karuppusamy y S. Chellamuthu. 2021. *Drivers of soil salinity and their correlation with climate change*. Current Opinion in Environmental Sustainability. 50: 310–318.

- FAO. 2024. *Global status of salt-affected soils. Main report*. FAO. ISBN: 978-92-5-139307-9. Roma, Italia. <https://doi.org/10.4060/cd3044en>. 1-7 pp.
- Fassett, N.C. 1925. *Notes on Distichlis*. <https://doi.org/10.5281/ZENODO.16172854>.
- Felger, R.S. 2023. *Flora of the Gran Desierto and Río Colorado Delta*. University of Arizona Press.
- Flowers, T.J., M.A. Hajibagheri y N.J.W. Clipson. 1986. *Halophytes*. The Quarterly Review of Biology. 61 (3): 313–337.
- Gamalero, E., E. Bona, V. Todeschini y G. Lingua. 2020. *Saline and Arid Soils: Impact on Bacteria, Plants, and Their Interaction*. Biology. 9 (6): 116.
- Garner, D.M., C.M. Mure, P. Yerramsetty y J. O. Berry. 2016. Kranz Anatomy and the C4 Pathway. En Encyclopedia of Life Sciences. John Wiley & Sons, Ltd. 1-10 pp.
- Glenn, E.P., J.J. Brown y J.W. O’Leary. 1998. *Irrigation crops with seawater*. Scientific American. 279: 76-81.
- Gómez-León, A., G.M. Rodríguez-Figueroa, E. Shumilin, A.L. Carreño y A. Sánchez. 2018. *Abundance and distribution of benthic foraminifera as indicators of the quality of the sedimentary environment in a subtropical lagoon, Gulf of California*. Marine Pollution Bulletin. 130: 31–39.
- Greenway, H. y R. Munns. 1980. *Mechanisms of Salt Tolerance in Nonhalophytes*. Annual Review of Plant Physiology. 31 (1): 149–190.
- Grijalva-Chon, J.M., S. Núñez-Quevedo y R. Castro-Longoria. 1996. *Ichthyofauna of la cruz coastal lagoon, Sonora, Mexico*. Ciencias Marinas. 22 (2): 129–150.
- Holguín, J.E.V. 1994. *Variaciones diarias de temperatura, salinidad, oxígeno disuelto y clorofila a, en una laguna hipersalina del Golfo de California*. Ciencias Marinas. 20 (2): 123–137.
- iNaturalist. 2026. *Distichlis palmeri*. iNaturalist. En: <https://www.inaturalist.org/taxa/288192-Distichlis-palmeri>. (Consultado el 24/02/2026)
- Kathiresan, G., G.Manickam y P. Parameswaran. 1995. *Efficiency of phosphobacteria addition on cane yield and quality*. Cooperative Sugar. 26: 629–631.
- Kelly, W.H. 1977. *Cocopa ethnography*. University of Arizona Press.
- Keshavarzi, M. 2021. *An Overview of Ecological Anatomy of Poaceae Halophytes from Iran*. En Grigore M.N. (Eds). Handbook of Halophytes Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-57635-6_35. 1035–1062 pp.



- Lankford, R.R. 1977. *Coastal lagoons of Mexico their origin and classification*. En *Estuarine Processes*. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-751802-2.50022-9>. 182–215 pp.
- Läuchli, A y S.R. Grattan. 2007. *Plant Growth And Development Under Salinity Stress*. M. A. Jenks, P. M. Hasegawa, & S. M. Jain (Eds.). En *Advances in Molecular Breeding Toward Drought and Salt Tolerant Crops*. Springer Netherlands. 1–32 pp.
- Mapelli, F., R. Marasco, E. Rolli, M. Barbato, H. Cherif, A. Guesmi, I. Ouzari, D. Daffonchio y S. Borin. 2013. *Potential for plant growth promotion of rhizobacteria associated with Salicornia growing in Tunisian hypersaline soils*. *BioMed Research International*. 2013: 248078.
- Martínez-Córdova, L.R., M. Martínez Porchas y E. Cortés-Jacinto. 2009. *Camaronicultura mexicana y mundial: ¿actividad sustentable o industria contaminante?* *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*. 25 (3): 181–196.
- Meinzer, M., N. Ahmad y B.L. Nielsen. 2023. *Halophilic plant-associated bacteria with plant-growth-promoting potential*. *Microorganisms*. 11 (12): 2910.
- Melcher, U., R. Verma y W.L. Schneider. 2014. *Metagenomic search strategies for interactions among plants and multiple microbes*. *Frontiers in Plant Science*. 5: 268.
- Meltzer, L., E. Wittman y H. Perez-Puig. 2012. *Ficha informativa de los humedales de Ramsar (Humedales de La Laguna La Cruz)*. http://www.ramsar.org/ris/key_ris_index.htm
- Moreau, D., R.D. Bardgett, R.D. Finlay, D.L. Jones y L. Philippot. 2019. *A plant perspective on nitrogen cycling in the rhizosphere*. *Functional Ecology*. 33 (4): 540–552.
- Munns, R y H.M. Rawson. 1999. *Effect of salinity on salt accumulation and reproductive development in the apical meristem of wheat and barley*. *Australian Journal of Plant Physiology*. 26(5): 459–464.
- Munns, R. 2002. *Comparative physiology of salt and water stress*. *Plant, Cell & Environment*. 25 (2): 239–250.
- Munns, R y R.A. James. 2003. *Screening methods for salinity tolerance: A case study with tetraploid wheat*. *Plant and Soil*. 253 (1): 201–218.
- Overpeck, J.T. y B. Udall. 2020. *Climate change and the aridification of North America*. *Proceedings of the National Academy of Sciences, USA*. 117 (22): 11856–11858.
- Pandit, K., Chandni, S. Kaur, M. Kumar, R. Bhardwaj y S. Kaur. 2024. *Salinity stress: Impact on plant growth*. En *Advances in Food Security and Sustainability*. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/bs.af2s.2024.07.002>. 145–160 pp.

- Pessoa, L.G.M., M.B.D.S. Freire, J.C.D.A. Filho, P.R.D. Santos, M.F.A. Miranda, M.F.A y F.J. Freire. 2019. *Characterization and classification of halomorphic soils in the semiarid region of northeastern Brazil*. Journal of Agricultural Science. 11 (4): 405.
- Qadir, M., E. Quill  rou, V. Nangia, D.G. Murtaza, M. Singh, R. Thomas, P. Drechsel y A. Noble. 2014. *Economics of salt-induced land degradation and restoration*. Natural Resources Forum. 38: 282-295.
- RAMSAR. 2025. *Humedales de la Laguna La Cruz | Servicio de Información sobre Sitios Ramsar*. En: https://rsis.ramsar.org/es/ris/2154?_goaway_challenge=meta-refresh&_goaway_id=21b8813acb0cbeaf6d38fd76a622bc72&_goaway_referer=https%3A%2F%2Fwww.google.com%2F&language=es. (Consultado el 16/03/2026).
- Reynaga-Franco, F. de J., J. Chávez-Villalba, R.H. Barraza-Guardado, E. Alcántara-Razo, J.A. Arreola-Lizárraga, R. Castro-Longoria, y J.M. Grijalva-Chon. 2019. *Influencia de la variabilidad ambiental de la Laguna la Cruz (Sonora) en el crecimiento y condición del ostión del Pacífico Crassostrea gigas*. Biotecnia. 21 (2): 62–70.
- Rosenberg, R. 1985. *Eutrophication—The future marine coastal nuisance?* Marine Pollution Bulletin. 16 (6): 227–231.
- Rueda-Puente, E.O., J. López-Elías y M.A. Huez-López. 2012. *Las halófitas en la agricultura de zonas   ridas. Las halófitas como un potencial agroindustrial en la agricultura de zonas   ridas*. Editorial Académica española. ISBN 978-3-659-03196-0. Saarbrucken, Alemania. 17-21 pp
- SADER. 2021. *Mapa Agrícola de afectación por salinidad en México*. gob.mx. De: <http://www.gob.mx/agricultura/acciones-y-programas/mapa-agricola-de-afectacion-por-salinidad-en-mexico>. (Consultado el 11/04/2026)
- SADER. 2021. *Suelos afectados por salinidad*. En: https://agriculturasostenible.mx/public//docu/291121-Infografia-GIZ-3_Salinidad.pdf. (Consultado el 12/03/2026).
- Serite, C.P., A. Emami-Khoyi, O.K. Ntshudisane, N.C. James, B. Jansen van Vuuren, T. Bodill, P.D. Cowley, A.K. Whitfield y P.R. Teske. 2023. *eDNA metabarcoding vs metagenomics: An assessment of dietary competition in two estuarine pipefishes*. Frontiers in Marine Science, 10: 1116741.
- Shehzad, W., T. Riaz, M.A. Nawaz, C. Miquel, C. Poillot, S.A. Shah, F. Pompanon, E. Coissac y P. Taberlet. 2012. *Carnivore diet analysis based on next-generation sequencing: Application to the leopard cat (Prionailurus bengalensis) in Pakistan*. Molecular Ecology. 21 (8): 1951–1965.



- Shrivastava, P. y R. Kumar. 2015. *Soil salinity: A serious environmental issue and plant growth promoting bacteria as one of the tools for its alleviation*. Saudi Journal of Biological Sciences. 22 (2): 123–131.
- SIMAR. 2022. *Compromisos nacionales e internacionales – SIMAR*. En: <https://simar.conabio.gob.mx/compromisos/>. (Consultado el 16/03/2026).
- Srivastava, P., R. Singh, R. Bhadouria, S. Tripathi, H. Singh y A. Singh-Raghubanshi. 2019. Understanding soil aggregate dynamics and its relation with land use and climate change. En: *Climate change and agricultural ecosystems*. Woodhead Publishing. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-816483-9.00021-9>. 331–354 pp.
- Tester, M y R. Davenport. 2003. *Na⁺ Tolerance and Na⁺ transport in higher plants*. Annals of Botany. 91 (5): 503–527.
- Vasey, G. 1989. *New or little known plants-Uniola palmeri*. Garden and Forest. 2: 401–402.
- Velasco-Jiménez, A., O. Castellanos-Hernández, G. Acevedo-Hernández, R.C. Aarland y A. Rodríguez-Sahagún. 2020. *Bacterias rizosféricas con beneficios potenciales en la agricultura*. Terra Latinoamericana. 38 (2): 333–345.
- Volkov, V. 2015. Salinity tolerance in plants. *Quantitative approach to ion transport starting from halophytes and stepping to genetic and protein engineering for manipulating ion fluxes*. Frontiers in Plant Science. 6: 873.
- Xiong, Y.W., X.W. Li, T.T. Wang, Y. Gong, C.M. Zhang, K. Xing y S. Qin. 2020. *Root exudates-driven rhizosphere recruitment of the plant growth-promoting rhizobacterium Bacillus flexus KLBMP 4941 and its growth-promoting effect on the coastal halophyte Limonium sinense under salt stress*. Ecotoxicology and Environmental Safety. 194: 110374.
- Yang, X., Z. Dai, R. Yuan, Z. Guo, H. Xi, Z. He y M. Wei. 2023. *Effects of Salinity on Assembly Characteristics and Function of Microbial Communities in the Phyllosphere and Rhizosphere of Salt-Tolerant Avicennia marina Mangrove Species*. Microbiology Spectrum. 11 (2): e0300022.
- Zhang, Q., J.J. Acuña, N.G. Inostroza, M.L. Mora, S. Radic, M.J. Sadowsky y M.A. Jorquera. 2019. *Endophytic Bacterial Communities Associated with Roots and Leaves of Plants Growing in Chilean Extreme Environments*. Scientific Reports. 9 (1): 4950.

Datos de los autores:

- **Dr. Jesse Poland**

Es Profesor en la Universidad Rey Abdullah de Ciencia y Tecnología en Arabia Saudita. Su línea de investigación se enfoca en el fitomejoramiento y genética vegetal para desarrollar cultivos resistentes al cambio climático. Además, tiene proyectos basados en genética cuantitativa y estudios de diversidad genética en cultivos como el trigo y la palma datilera. En estos momentos, tiene un proyecto de investigación en una planta tolerante al estrés salino, llamado pasto salado (*Distichlis palmeri*), donde utiliza herramientas genómicas para entender las respetas fisiológicas y moleculares de esta planta.

- **Dra. Corina Hayano-Kanashiro**

Es investigadora del Sistema Nacional de Investigadores, Nivel II, adscrita al Departamento de Investigaciones Científicas y tecnológicas (DICTUS) de la Universidad de Sonora. Su línea de investigación se basa en análisis transcriptómicos en plantas y microalgas bajo estrés abiótico o nutricional, estudios genómicos en plantas de importancia agrícola del estado de Sonora; así como marcadores moleculares en plantas. Actualmente es colaboradora del proyecto de investigación liderado por el Dr. Poland con la planta *D. palmeri*.

- **Dra. Blanca Estela Romero López**

Es investigadora del Sistema Nacional de Investigadoras e Investigadores, Nivel I, adscrita al Laboratorio de Microbiología Ambiental del Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste y es investigadora asociada del Bashan Institute of Science. Es revisora de 11 revistas indexadas, editora invitada de Microorganisms y promotora de Plant and Soil. Cuenta con 15 años de experiencia en investigación sobre bacterias promotoras del crecimiento de plantas (PGPBs) y en la elucidación de los mecanismos de interacciones mutualistas entre microalgas-bacterias y plantas-bacterias, principalmente endófitas y rizosféricas.

- **Lic. Luis Fernando Olivarria Arnold**

Es biólogo egresado de la Licenciatura en Biología de la Universidad de Sonora, donde desarrolló una investigación enfocada en el estudio de la halófito *Distichlis palmeri*, en el cual se evaluó el efecto del estrés salino sobre la germinación y la respuesta génica postgerminativa en *D. palmeri*, con el fin de aportar conocimiento de esta especie nativa con gran potencial para la agricultura sustentable.



- **Dra. Carolina Gallardo Ybarra**

Es egresada del doctorado en Biociencias de la Universidad de Sonora, donde se especializó en Biología molecular. Su formación académica se ha enfocado en la aplicación de técnicas moleculares en diversos organismos acuícolas y microalgas. Actualmente está adscrita como maestra de asignatura en la Universidad de Sonora, además trabaja realizando una estancia posdoctoral en el proyecto de investigación liderado por el Dr. Poland con la planta *D. palmeri*.

Cita

Gallardo-Ybarra, C., C. Hayano-Kanashiro, L.F. Olivarría-Arnold, B.E. Romero-López y J. Poland. El pasto salado nipa (*Distichlis palmeri*) como sistema modelo para el estudio de la tolerancia a salinidad y la microbiota asociada. *Recursos Naturales y Sociedad*, 2026. Vol. 12(1): 238-257. <https://doi.org/10.18846/renaysoc.2026.12.12.01.0015>.

Sometido: 16 de abril de 2026

Aceptado: 12 de junio de 2026

Editor asociado: Dr. Arturo Sánchez-Paz

Editor ejecutivo: Dr. Arturo Sánchez-Paz

Diseño gráfico editorial: Ing. Fca. Elizabeth Villegas Carrazco

Exploring the potential of bioinsecticides derived from marine and terrestrial organisms

Explorando el potencial de los bioinsecticidas derivados de organismos marinos y terrestres

Mayra Pamela Becerra Amezcua¹,
Fernando Misael Matadamas Guzmán², Xochitl Guzmán García^{1*}

Resumen

La agricultura es fundamental para nuestra alimentación y economía, pero el uso intensivo de pesticidas químicos ha generado serios problemas ambientales y de salud. Cada año, las plagas de insectos destruyen hasta una cuarta parte de la producción agrícola mundial, provocando pérdidas millonarias y afectando la seguridad alimentaria. Además, muchos pesticidas no solo eliminan insectos dañinos, sino también organismos benéficos como las abejas, y su uso prolongado se ha relacionado con alteraciones neurológicas, problemas de desarrollo y la aparición de resistencia en las propias plagas. Frente a este panorama, los bioinsecticidas surgen como una alternativa más sostenible, ya que estos productos se obtienen de organismos naturales o de los compuestos que producen, y además son biodegradables, específicos y menos dañinos para el ambiente.

Entre las fuentes más prometedoras se encuentran los venenos de animales como arañas, escorpiones y anémonas de mar, ya que sus toxinas actúan sobre el sistema nervioso de los insectos de manera precisa, afectando los canales iónicos esenciales para su funcionamiento. En México, donde recientemente se han restringido varios plaguicidas peligrosos, explorar las toxinas de las anémonas marinas podría abrir la puerta al desarrollo de nuevos bioinsecticidas más seguros y amigables con el medio ambiente.

Palabras clave: Anémonas, bioinsecticidas, toxinas, canales iónicos, agricultura.

¹ Departamento de Hidrobiología, División de Ciencias Biológicas y de la Salud, Laboratorio de Ecotoxicología, Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Iztapalapa, Ciudad de México C. P. 09340, México.

² Doctorado en Ciencias Biológicas y de la Salud, Universidad Autónoma Metropolitana, Ciudad de México, México.

* Autor de correspondencia: xgg@xanum.uam.mx



Abstract

Agriculture is fundamental to our food supply and economy; however, the intensive use of chemical pesticides has generated serious environmental and health concerns. Every year, insect pests destroy up to a quarter of global agricultural production, causing losses in the millions and affecting food security. Furthermore, many pesticides not only eliminate harmful insects but also beneficial organisms like bees, and their prolonged use has been linked to neurological disorders, developmental problems, and resistance in pests. Faced with this situation, bioinsecticides are emerging as a more sustainable alternative. These products are derived from natural organisms or their compounds, and are biodegradable, more targeted, and less harmful to the environment. Among the most promising sources are the venoms of animals such as spiders, scorpions, and sea anemones. Their toxins act precisely on insect nervous system, affecting ion channels essential for their function. In Mexico, where several hazardous pesticides have recently been restricted, exploring the toxins of sea anemones could open the door to developing new, safer, and more environmentally friendly bioinsecticides.

Keywords: Sea anemones, bioinsecticides, toxins, ion channels, agriculture.

Antecedentes

La agricultura en la actualidad es esencial para la supervivencia humana generando seguridad alimentaria y nutricional, además de ser un motor económico y de desarrollo rural, sin embargo, es necesaria la adopción de técnicas de agricultura sostenible para conservar el suelo y mitigar el cambio climático. Una de las principales problemáticas de la agricultura tradicional es el uso de insecticidas químicos que tienen un impacto negativo en la salud humana, el medio ambiente y la biodiversidad (Barathi *et al.*, 2024).

Una propuesta para mitigar estos impactos es el uso de bioinsecticidas, los cuales son productos derivados de materiales naturales diseñados para controlar plagas agrícolas de manera sostenible, entre estos, existen microorganismos patógenos para insectos, como *Bacillus thuringiensis*, que produce una toxina utilizada como plaguicida (Bravo *et al.*, 2013, Rousset y Gallet, 2025). Algunos extractos botánicos y aceites vegetales también pueden funcionar como bioinsecticidas amigables con el medio ambiente, como la azadiractina, un compuesto presente en la planta del neem y que

actúa como regulador del crecimiento de los insectos (Kilani-Morakchi *et al.*, 2021). La ventaja de este tipo de bioinsecticidas es que afectan principalmente a la plaga sin afectar a otros organismos, ayuda a mejorar la calidad de la cosecha y de los alimentos, y se descomponen fácilmente sin generar resistencia en los insectos (Reyes-Ávila *et al.*, 2024). Estos bioinsecticidas actúan por contacto, ingestión o repulsión, afectando a diversos insectos de distintas maneras, dependiendo de las características fisiológicas de cada especie. La eficacia radica en su capacidad de provocar la destrucción celular mediante diversos procesos bioquímicos (Boate y Abalis, 2020).

Insectos, plagas y un problema global que nos afecta a todos

¿Sabías que los insectos pueden causar daños enormes a nivel mundial?

Cada año, las plagas de insectos destruyen entre el 18 y el 26 % de la producción agrícola global, lo que se traduce en pérdidas económicas cercanas a los 470 mil millones de dólares. Estas pérdidas no solo afectan a los agricultores, sino que también impactan directamente en el precio de los alimentos y en la seguridad alimentaria de millones de personas. Pero el problema no termina ahí, muchos insectos también actúan como vectores de enfermedades. Mosquitos y otros insectos chupadores de sangre transmiten padecimientos como el dengue y la malaria, enfermedades que cada año provocan millones de casos y cientos de miles de muertes en todo el mundo. Un dato alarmante: solo la malaria causó 216 millones de casos y más de 445 000 muertes en un solo año (Smith *et al.*, 2013). Aunado a esto, los insectos necesitan una temperatura tropical para acelerar su metabolismo y reproducción, debido al cambio climático ahora estos insectos han colonizado nuevas latitudes templadas, alterando su distribución geográfica (Ojija *et al.*, 2025).

Para combatir estas plagas, durante décadas se han utilizado pesticidas y plaguicidas químicos, los cuales son diseñados para controlar, repeler o eliminar organismos considerados plagas (Ahmad *et al.*, 2024). Aunque son efectivos a corto plazo, su uso intensivo ha tenido consecuencias serias. Diversos estudios han demostrado que la exposición prolongada a estos productos químicos puede estar relacionada con:

- Alteraciones neurológicas
- Enfermedades como el Parkinson
- Problemas de desarrollo en niños
- Disminución de la fertilidad masculina



Además, los pesticidas no distinguen entre insectos dañinos y benéficos. Polinizadores como las abejas; aves, peces e invertebrados acuáticos también sufren sus efectos tóxicos, afectando el equilibrio de los ecosistemas (Giulioni *et al.*, 2022, Henry *et al.*, 2012, Rodríguez *et al.*, 2025).

Un dato preocupante: muchos insectos han desarrollado resistencia a los pesticidas actuales, lo que obliga a usar dosis más altas o compuestos más agresivos, creando un círculo vicioso difícil de romper (Ahmad *et al.*, 2024).

Bioinsecticidas de organismos terrestres: el poder oculto del veneno

Ante el panorama de la afectación de pesticidas y plaguicidas químicos, la ciencia ha volteado a ver a la naturaleza en busca de alternativas más seguras. Así surgen los bioinsecticidas, una opción cada vez más prometedora.

Los bioinsecticidas se obtienen a partir de materiales y organismos naturales o de los compuestos que producen, y presentan ventajas claras:

- Son biodegradables
- Contaminan menos el ambiente
- Actúan de forma más específica contra las plagas
- Reducen el daño a otros organismos

Aunque el mercado global de bioinsecticidas sigue creciendo, actualmente representan menos del 1 % del uso total de insecticidas, lo que indica que aún hay un enorme potencial por desarrollar (Smith *et al.*, 2013).

Un dato interesante es que muchos animales venenosos han perfeccionado sus toxinas a lo largo de millones de años de evolución para cazar insectos de manera eficiente. Arañas, escorpiones, avispa y abejas producen venenos altamente especializados, capaces de paralizar rápidamente a los insectos. Lo más sorprendente es que menos del 1 % de las arañas representa un peligro para los humanos, pero sus venenos son extremadamente efectivos contra insectos (Saez y Herzig, 2019).

Los bioinsecticidas basados en venenos animales son soluciones avanzadas y sostenibles que emplean péptidos neurotóxicos para controlar plagas agrícolas. Son específicos para insectos, biodegradables y actúan sobre el sistema nervioso, las patentes relacionadas con la utilización de venenos en bioinsecticidas va en aumento, utilizándose con mayor frecuencia los de escorpión, serpiente y avispa (Figura 1) (Oliveira *et al.*, 2021).

Los venenos animales comprenden numerosas familias de toxinas compuestas principalmente por péptidos y proteínas. En las presas, estas toxinas afectan diversos sistemas vitales y pueden causar incluso la muerte en algunos de ellos. Durante el proceso de evolución, este tipo de moléculas adquirió la capacidad de unirse selectivamente y con gran afinidad a diferentes blancos moleculares biológicos en los organismos, lo que las convierte en valiosas para la generación de bioinsecticidas, ya que algunas de estas toxinas atacan tipos específicos de canales iónicos y receptores de insectos (Smith *et al.*, 2013, Utkin, 2021).



Figura 1. Número de patentes registradas para moléculas aisladas de organismos venenosos utilizadas como bioinsecticidas, fuente de la información (Oliveira, 2021) y Google patents.

Bioinsecticidas de organismos marinos: un tesoro poco explorado

Los océanos albergan una biodiversidad impresionante y, con ella, una enorme riqueza química aún poco estudiada. Organismos marinos como caracoles cono, medusas y anémonas de mar producen toxinas para defenderse o capturar presas. Esto los convierte en candidatos ideales para nuevos bioinsecticidas, con mecanismos de acción diferentes a los productos tradicionales (Figura 2) que generalmente se enfocan en inhibir enzimas como la acetilcolinesterasa o en bloquear canales de sodio para paralizar el sistema nervioso, las toxinas de organismos marinos presentan estructuras más complejas y mecanismos de acción multisistémicos (Gao *et al.*, 2017).

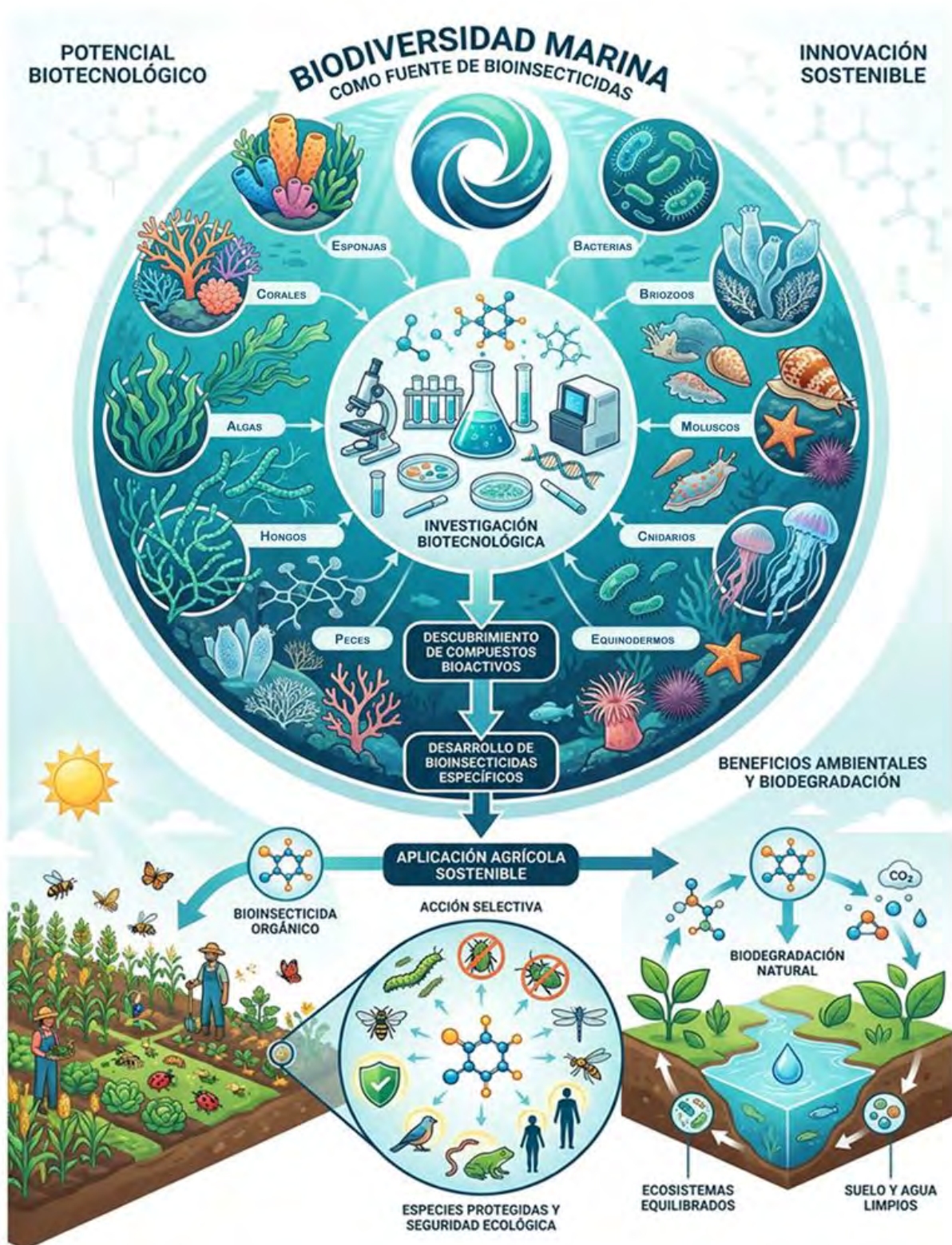


Figura 2. Utilización de organismos marinos como fuente de compuestos con potencial bioinsecticida.

La anémona de mar: pequeña, colorida y llena de potencial como bioinsecticida

Las anémonas de mar (Figura 3) son invertebrados marinos pertenecientes al filo Cnidaria y a la clase Anthozoa que, a simple vista, parecen inofensivas y decorativas, sin embargo, los tentáculos que les sirven para atrapar el alimento y llevarlo a la boca, contienen unas cápsulas urticantes llamadas nematocistos. Estas estructuras contienen un filamento hueco enrollado, generalmente con púas, que contiene veneno. Este filamento se utiliza para inmovilizar a organismos para su alimentación, defenderse de depredadores y competir contra otras anémonas por el territorio. Los nematocistos se activan mediante estimulación mecánica o química, revirtiendo su cápsula para impulsar el filamento hacia su presa, liberando el veneno (Bosmans y Tytgat, 2007).

A pesar de su importancia ecológica, económica y farmacológica, los estudios sobre estos organismos en nuestro país son escasos (Becerra-Amezcuca *et al.*, 2025, González-Muñoz *et al.*, 2013, Herrera-Bojórquez *et al.*, 2020, González-Muñoz *et al.*, 2015, Barragán *et al.*, 2019); y la composición de la mayoría de los venenos sigue siendo desconocida, a pesar de décadas de investigación. Sin embargo, se ha demostrado que sus venenos son mezclas complejas de proteínas, péptidos y compuestos no proteínicos, y los principales componentes pueden agruparse en cuatro tipos funcionales (Madio *et al.*, 2019):

- **Fosfolipasas A2** que degradan lípidos de las membranas de las células neuronales y musculares, causando daño nervioso e inflamación muscular.
- **Citolisinas** que actúan sobre las membranas celulares y provocan lisis celular.
- **Neurotoxinas** que interactúan con receptores y canales iónicos dependientes de voltaje y de ligando alterando la transmisión neuronal.
- **Compuestos no proteínicos** que se piensa que inducen dolor durante el envenenamiento.

En la actualidad existe un compuesto sintético derivado de una toxina de anémona llamado dalazatide que se encuentra en fases avanzadas de ensayos clínicos farmacéuticos; este compuesto bloquea canales de potasio en linfocitos T, fundamentales en el sistema inmunitario, lo que ayuda a detener procesos inflamatorios en padecimientos como la esclerosis múltiple, psoriasis y artritis reumatoide (Iwakawa *et al.*, 2019).

Las anémonas de mar producen una gran cantidad de toxinas, de las cuales un gran grupo actúa sobre los canales de sodio dependientes de voltaje, receptores importantes para el potencial bioinsecticida. Sin embargo, comparado con otros organismos sus venenos y toxinas han sido poco estudiados. Dada la estrecha relación evolutiva entre crustáceos e insectos, no es sorprendente que



las toxinas de las anémonas también afecten a los canales de sodio de insectos, por lo que estos compuestos pueden considerarse una alternativa en el desarrollo de insecticidas (Bosmans y Tytgat, 2007). La interacción de las toxinas con receptores de insectos podrían modificarse para aumentar su estabilidad y especificidad, haciendo un producto innovador para la agricultura (Bosmans y Tytgat, 2007).



Figura 3. Anémona *Bunodosoma* sp. de Tecolutla, Veracruz.

Consideraciones finales y perspectivas

En México se han reportado alrededor de 16 especies de anémonas en las costas de Yucatán, 30 especies en el Pacífico mexicano y 17 especies en el mar Caribe y el Golfo de México (González-Muñoz *et al.*, 2013, Herrera-Bojórquez *et al.*, 2020, Barragán *et al.*, 2019), Sin embargo, no hay reportes sobre la investigación de toxinas de este grupo animal como posible bioinsecticida. Considerando su capacidad regenerativa, estos organismos podrían representar una fuente potencial para la búsqueda y desarrollo de bioinsecticidas más amigables para el ambiente (Van Der Burg y Prentis, 2021).

Aunado a esto México ha prohibido la importación, producción y uso de 35 plaguicidas altamente peligrosos para fomentar una agricultura sostenible y segura, buscando sustituir estas moléculas por alternativas menos tóxicas priorizando la salud pública y ambiental. Así, la investigación de toxinas provenientes de anémonas representa una oportunidad potencial para su utilidad en nuestro país (Vilaboa-Arróniz *et al.*, 2025).

Aunque la producción de un producto comercial para este fin lleva años de investigación, nuestro país cuenta con los recursos naturales y capacidades científicas necesarias para iniciar e impulsar su desarrollo y producir productos bioinsecticidas amigables con el medio ambiente.

Agradecimientos

Al proyecto “Moléculas bioactivas y biomarcadores ecotoxicológicos en la anémona *Bunodosoma* sp. para su uso biotecnológico”, CF-2023.Segunda etapa. Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI). Al proyecto Indicadores de Integridad Ecológica y Salud Ambiental. UAM. Departamento de Hidrobiología. 2023-2026. Y al proyecto de Estancias posdoctorales por México 2022(1)-SECIHTI “Biomarcadores de vulnerabilidad al cambio climático en corales utilizados en proyectos de restauración”. A Saúl López Vite por la ayuda en la edición de las imágenes.



Literatura citada

- Ahmad, M.F., F.A. Ahmad, A.A. Alsayegh, M. Zeyaulah, A.M. AlShahrani, K. Muzammil, A.A. Saati, S. Wahab, E.Y. Elbendary, N. Kambal, M.H. Abdelrahman y S. Hussain. 2024. *Pesticides impacts on human health and the environment with their mechanisms of action and possible countermeasures*. Heliyon. 7 (10):e29128.
- Barathi, S., N. Sabapathi, S. Kandasamy y J. Lee. 2024. *Present status of insecticide impacts and eco-friendly approaches for remediation-a review*. Environmental Research. (240):117432.
- Barragán, Y., C. Sánchez y E. Rodríguez. 2019. *First inventory of sea anemones (Cnidaria: Actiniaria) from La Paz Bay, southern Gulf of California (Mexico)*. Zootaxa. 3 (4559):501–549.
- Becerra-Amezcu, M.P., F.M. Matadamas-Guzmán, L. Hernández-Orihuela, I. Guerrero-Legarreta y X. Guzmán-García. 2025. *Proteomic Analysis Is Needed to Understand the Vulnerability of Bunodosoma cavernatum Sea Anemones to Climate Change*. Journal of Proteome Research. 2 (24):742-749.
- Boate, U.R. y O.R. Abalis. 2020. *Review on the Bio-insecticidal Properties of Some Plant Secondary Metabolites: Types, Formulations, Modes of Action, Advantages and Limitations*. Asian Journal of Research in Zoology. 4 (3):27-60.
- Bosmans, F. y J. Tytgat. 2007. *Sea anemone venom as a source of insecticidal peptides acting on voltage-gated Na⁺ channels*. Toxicon. 4 (49):550-560.
- Bravo, A., I. Gómez, H. Porta, B.I. García-Gómez, C. Rodríguez-Almazan, L. Pardo y M. Soberón. 2013. *Evolution of Bacillus thuringiensis Cry toxins insecticidal activity*. Microbial Biotechnology. 1 (6):17-26.
- Giulioni, C., V. Maurizi, D. Castellani, S. Scarcella, E. Skrami, G. Balercia y A.B. Galosi. 2022. *The environmental and occupational influence of pesticides on male fertility: A systematic review of human studies*. Andrology. 7 (10):1250-1271.
- González-Muñoz, R., N. Simões, J.L. Tello-Musi, J. Sánchez-Rodríguez y E. Rodríguez. 2015. *New records of sea anemones (Cnidaria, Anthozoa, Actiniaria) in the Mexican Caribbean*. Marine Biodiversity Records. (8):e100.
- González-Muñoz, R.E., N. Simões, J.L. Tello-Musi y E. Rodríguez. 2013. *Sea anemones (Cnidaria, Anthozoa, Actiniaria) from coral reefs in the southern Gulf of Mexico*. ZooKeys. (341):77-106.

- Henry, M., M. Béguin, F. Requier, O. Rollin, J.-F. Odoux, P. Aupinel, J. Aptel, S. Tchamitchian y A. Decourtye. 2012. *A Common Pesticide Decreases Foraging Success and Survival in Honey Bees*. Science. 6079 (336):348-350.
- Herrera-Bojórquez, L.G., R. González-Muñoz, L.V. León-Deniz, G. Arjona-Torres y R. Sima-Álvarez. 2020. *Sea anemones (Anthozoa: Actiniaria) from the coast of Yucatán, Mexico*. Revista mexicana de biodiversidad. (91):
- Iwakawa, N., N.J. Baxter, D.C.C. Wai, N.J. Fowler, R.A.V. Morales, K. Sugase, R.S. Norton y M.P. Williamson. 2019. *Conformational exchange in the potassium channel blocker ShK*. Scientific Reports. 1 (9):19307.
- Kilani-Morakchi, S., H. Morakchi-Goudjil y K. Sifi. 2021. *Azadirachtin-based insecticide: Overview, risk assessments, and future directions*. Frontiers in agronomy. (3):676208.
- Madio, B., G.F. King y E.A.B. Undheim. 2019. *Sea Anemone Toxins: A Structural Overview*. Marine Drugs. 6 (17):325.
- Ojija, F., M. Mng'ong'o, B.N. Aloo, G. Mayengo y M. Helikumi. 2025. *Effect of global climate change on insect populations, distribution, and its dynamics*. Journal of Asia-Pacific Entomology. 3 (28):102442.
- Oliveira, Á.S., A.L. Fantinel, F.D. Artuzo, L. de Oliveira, R.B. Singer, M.L.C.d.F. Júnior, H. Dewes y E. Talamini. 2021. *Applications of venom biodiversity in agriculture*. EFB Bioeconomy Journal. (1):100010.
- Reyes-Ávila, A., R. López-Ruiz, F.J. Egea González, R. Romero-González y A. Garrido Frenich. 2024. *Chemistry and development of bioinsecticides for safe and sustainable use*. Current Opinion in Environmental Science & Health. (41):100568.
- Rodríguez, A., M.L. Castrejón-Godínez y N. Monterrosas-Brisson. 2025. *Pesticides: Environmental Stressors Implicated in the Development of Central Nervous System Disorders and Neurodegeneration*. Stresses. 2 (5):31.
- Rousset, R. y A. Gallet. 2025. *Unintended effects of Bacillus thuringiensis spores and Cry toxins used as microbial insecticides on non-target organisms*. Current Opinion in Environmental Science & Health. (43):100598.
- Saez, N.J. y V. Herzig. 2019. *Versatile spider venom peptides and their medical and agricultural applications*. Toxicon. (158):109-126.



- Smith, J.J., V. Herzig, G.F. King y P.F. Alewood. 2013. *The insecticidal potential of venom peptides*. Cellular and Molecular Life Sciences. 19 (70):3665-3693.
- Utkin, Y. 2021. *Animal Venoms and Their Components: Molecular Mechanisms of Action*. Toxins. 6 (13):415.
- Van Der Burg, C.A. y P.J. Prentis. 2021. *The Tentacular Spectacular: Evolution of Regeneration in Sea Anemones*. Genes. 7 (12):1072.
- Vilaboa-Arróniz, J., J. Aguilar-Ávila, E.G. Martínez-González, D.E. Platas-Rosado, E.M. Gasperín-García y A. Heribia-Virués. 2025. *El uso de plaguicidas en México y el enfoque de logística inversa: una revisión de literatura*. Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas. 8 (16):e3921.

Datos de los autores

- **Dra. Mayra Pamela Becerra Amezcu**, es egresada del doctorado en Biología Experimental de la Universidad Autónoma Metropolitana, realizó una estancia posdoctoral en el CINVESTAV- Mérida en el posgrado de Biología Marina y actualmente realiza una estancia posdoctoral en la UAM, es miembro del sistema Nacional de Investigadores-Nivel I y la línea de investigación que realiza es el potencial biotecnológico de venenos de origen marino. mayrapame@gmail.com
- **Dra. Xochitl Guzmán García** es Bióloga por la UNAM y Doctora en Biología Experimental por la Universidad Autónoma Metropolitana. Es Profesora-Investigadora en el Laboratorio de Ecotoxicología del Departamento de Hidrobiología. Su trabajo se enfoca en el análisis tisular y el potencial biotecnológico de organismos acuáticos bajo condiciones de estrés ambiental. Es miembro del Sistema Nacional de Investigadores (Nivel I) y participa activamente en iniciativas de divulgación y educación ambiental.
- **M. en C. Fernando Matadamas Guzmán** es egresado de la Licenciatura en Biología Experimental y cuenta con Maestría en el Posgrado en Energía y Medio Ambiente. Su línea de investigación se centra en el estudio de anémonas de mar con potencial biotecnológico, particularmente en el análisis de su capacidad de regeneración y la evaluación de la bioactividad de extractos crudos. Actualmente es alumno del Doctorado en Ciencias Biológicas en la Universidad Autónoma Metropolitana.

Cita

Becerra Amezcua, M.P., F.M. Matadamas Guzmán, y X. Guzmán García. Explorando el potencial de los bioinsecticidas derivados de organismos marinos y terrestres. Recursos Naturales y Sociedad, 2026. Vol. 12(1): 259-271. <https://doi.org/10.18846/renaysoc.2026.12.12.01.0016>

Sometido: 16 de abril de 2026

Aceptado: 12 de junio de 2026

Editor asociado: Dr. Arturo Sánchez-Paz

Editor ejecutivo: Dr. Arturo Sánchez-Paz

Diseño gráfico editorial: Ing. Fca. Elizabeth Villegas Carrasco

A set of adaptations for flowering in coastal dune environments

Un repertorio de adaptaciones para florecer en las dunas costeras

Arely V. Pérez López¹, Blanca E. Romero López¹,
Alfonso Medel Narváez¹, Jorge G. Rocha Estrada^{1*}

Resumen

Las dunas costeras son ecosistemas dinámicos que, a pesar de sus condiciones extremas, son habitadas por una notable diversidad de plantas adaptadas a la escasez de agua, la alta salinidad y la movilidad del sustrato. En el noroeste de México, particularmente en Baja California Sur, estas formaciones constituyen un laboratorio natural donde la vegetación ha desarrollado estrategias morfológicas y fisiológicas para sobrevivir y reproducirse. En este artículo, describimos las principales adaptaciones que permiten la floración en estos ambientes, incluyendo el almacenamiento de agua y la sincronización entre la floración y un clima favorable. Asimismo, enlistamos algunas flores representativas de cada zona de las dunas costeras y discutimos su papel en la estabilización del sustrato y en el mantenimiento de la biodiversidad. Finalmente, destacamos la importancia ecológica de estas comunidades vegetales, su vulnerabilidad frente a actividades humanas y la necesidad de su conservación como barreras naturales ante procesos de erosión y cambio climático.

Palabras clave: vegetación en zonas áridas, adaptación vegetal, floración.

¹Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste, S.C. (CIBNOR). Instituto Politécnico Nacional 195, Playa Palo Santa Rita Sur, La Paz, Baja California Sur, 23096, México.

* Autor de correspondencia: jrocha@cibnor.mx



Abstract

Coastal dunes are dynamic ecosystems that, despite their extreme environmental conditions, host a remarkable diversity of plant species adapted to drought, high salinity, and substrate instability. In northwestern Mexico, particularly in Baja California Sur, these systems serve as natural laboratories where vegetation evolved a wide range of morphological and physiological strategies to survive and reproduce. Here, we describe key adaptations that enable flowering under such constraints, including water storage and flowering overlap with a favorable climate. Additionally, we enlist flowers from each coastal dune zone, highlighting their ecological roles in stabilizing the substrate and maintaining biodiversity. Finally, we discuss the ecological relevance of these ecosystems and their vulnerability to human disturbance, emphasizing the need for their conservation as natural barriers against coastal erosion and climate change.

Keywords: arid vegetation, plant adaptation, flowering.

Antecedentes

Cuando visitamos las playas mexicanas, esperamos encontrar un paisaje con palmeras cocoteras; sin embargo, en muchas de ellas el viento marino y la fuerza del oleaje han formado acumulaciones onduladas de arena llamadas dunas. Estas ondulaciones se moldean con la materia prima del acarreo de restos de moluscos y arrecifes, así como con la desintegración de rocas, y en ellas se genera una vegetación aparentemente escasa (Martínez y Valverde, 1992).

Las dunas pueden parecer simples montículos de arena, pero constituyen estructuras vivas cuya forma y estabilidad dependen no solo de las condiciones climáticas, sino también de la vegetación que las recubre. Las dunas costeras mexicanas, que se extienden por más de 800,000 hectáreas (Fig. 1a) (CONAFOR, 2013), aportan importantes beneficios de la naturaleza, como la protección de las costas. Las dunas costeras, son transiciones ambientales (ecotonos) entre el mar y el desierto, pobres en nutrientes, pero que presentan una diversidad significativa de innovaciones biológicas, producto de la evolución y adaptación de las plantas a estos ambientes.

En este entorno, las plantas enfrentan una paradoja: la proximidad del mar contrasta con la escasez de agua dulce (Fig. 1b); además, el aire y la movilidad de la arena dificultan su establecimiento. Bajo

estas condiciones extremas, las plantas no solo sobreviven, sino que también adaptan su morfología y fisiología. Por ejemplo, desarrollan hojas suculentas para almacenar agua salada, raíces profundas que localizan la humedad en el suelo inestable y tallos que se entierran para evitar la radiación solar; algunas dividen las etapas de la fotosíntesis para perder menos agua y otras acortan su vida a los periodos de bonanza (incluso nacer, crecer, reproducirse y morir en menos de un mes) (Espejel *et al.* 2017). Estas adaptaciones a condiciones adversas reflejan procesos evolutivos que dan lugar a flores singulares. En las dunas, la floración ocurre únicamente cuando se alinean condiciones ambientales específicas de temperatura, humedad y viento; además de contextos particulares como la presencia de polinizadores.

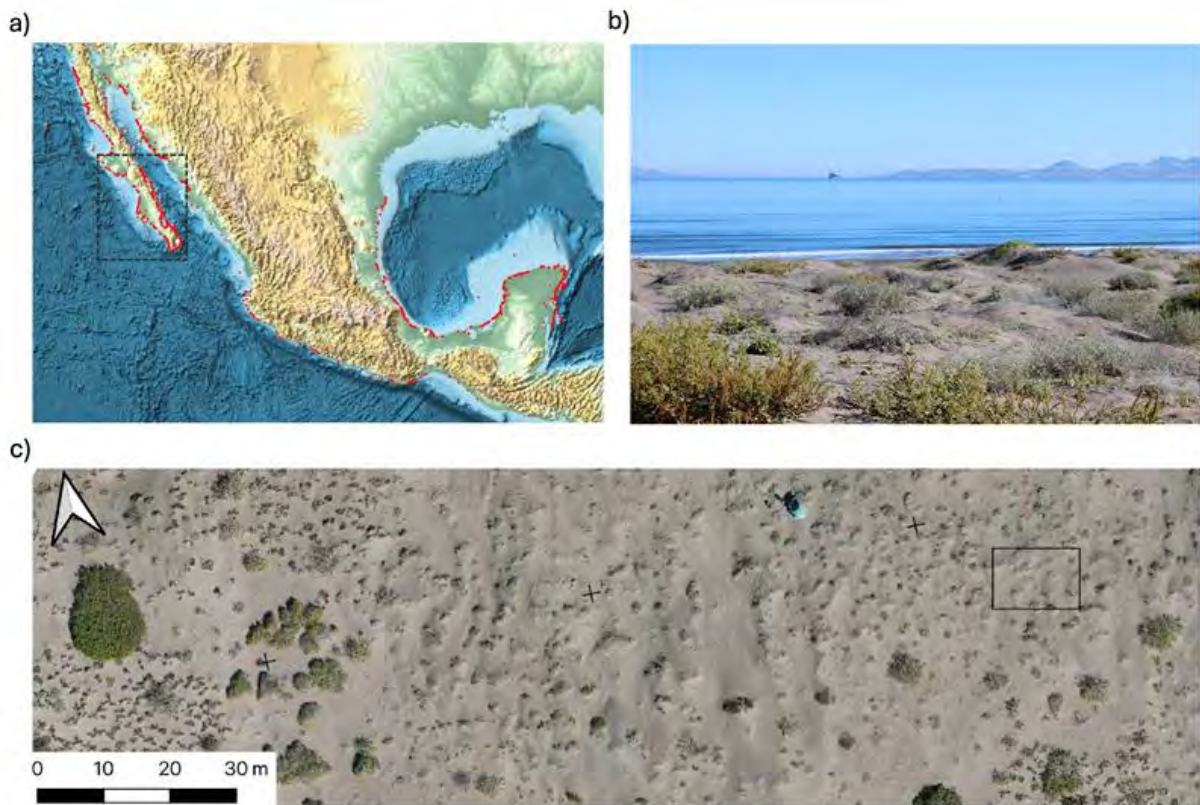


Figura 1. Geografía de las dunas costeras mexicanas. a) Inventario florístico de dunas costeras en México con registro en herbario (datos en rojo obtenidos de Espejel y cols., 2017), donde destaca Baja California Sur (recuadro). Fotografías de las dunas costeras de El Mogote, La Paz, BCS b) vista lateral y c) vista cenital (dron).

El desafío del desierto costero

En el noroeste de México, la Península de Baja California Sur destaca por su amplia extensión de dunas costeras (Fig. 1a). En esta región, característicamente árida o semiárida, se encuentra el 22 % del litoral mexicano que comprende extensas dunas del desierto costero. Las dunas constituyen



un laboratorio natural donde la sequía, el viento y la arena interactúan para generar una notable diversidad vegetal (Espejel *et al.* 2017). El viento modela el paisaje y la arena está en constante movimiento, solo detenida por parches verdes esporádicos (Fig. 1c). Aquí, las plantas pueden enfrentar grandes desafíos fisiológicos, y sus estrategias de floración juegan roles esenciales:

1. La inestabilidad del sustrato: la arena se desplaza de forma continua, lo que puede enterrar tallos o exponer raíces. Las plantas responden mediante un crecimiento acelerado, la formación de raíces finas y profundas para el anclaje o el desarrollo de tejidos flexibles que toleran el entierro parcial. La morfología se convierte en una estrategia de supervivencia. En algunas especies, las flores suelen ser pequeñas y próximas al suelo, o bien emergen sólo durante períodos breves, lo que minimiza su exposición al viento.
2. La salinidad: la brisa marina introduce sales disueltas en el sustrato. Únicamente las plantas tolerantes a la sal (halófitas) prosperan mediante mecanismos de exclusión, excreción o acumulación controlada de sales. Sus hojas pueden eliminar la sal, sus raíces pueden impedir su absorción, o bien, sus organelos de almacenamiento, como las vacuolas, pueden compartimentarla. En muchas especies, la floración ocurre durante periodos de menor estrés, cuando la planta puede asignar recursos a la reproducción.
3. Baja disponibilidad de agua: Aunque el mar esté cerca, la arena retiene poca agua y carece de nutrientes; las plantas están rodeadas de agua que no pueden absorber. Muchas recurren al intercambio nocturno de gases para el ahorro de agua (fotosíntesis CAM); también reducen el tamaño de sus hojas o almacenan líquidos en tejidos suculentos o en ingeniosas estructuras para captar agua del aire. La flor, entonces, aparece de forma breve y sincronizada, más cercana a una ventana fisiológica que a una estación prolongada, donde incluso aprovecha una lluvia esporádica.

Las especies que se sobreponen a estos desafíos dominan el paisaje selectivo de las dunas. En estos ambientes, las plantas invierten sus recursos estratégicamente en la floración, el proceso más exigente de su ciclo vital. Su fisiología representa el equilibrio entre la desecación y la persistencia. Durante la floración, estas especies transforman el entorno árido en un mosaico de colores y aromas. Aunque la cobertura vegetal rara vez supera el 20 % en los primeros cordones de dunas (Fig. 1c), estas plantas conforman la estructura biológica que sostiene las dunas y evidencian su vitalidad durante la floración.

Floreciendo en ambientes inesperados

En las zonas más próximas al mar se ubican las playas con suelo más inestable y con vegetación costera, seguidas de las dunas embrionarias, que son las más inestables y cercanas a la costa. Enseguida, se encuentran cordones de dunas de extensión variable, las cuales presentan una estructura y especies de plantas más estables (Figs. 2b y 2c). En las dunas costeras la vegetación es escasa, pero desempeña funciones ecológicas fundamentales; entre las especies características se encuentran las llamadas pioneras, las cuales estabilizan la arena y facilitan el establecimiento de otras formas de vida en ambientes extremos (Romero López, 2004). Además, demuestran que la floración es posible incluso en sustratos desnudos; donde muchas veces las flores, por su tamaño o posición en la planta, suelen pasar desapercibidas. Entre las especies con flores que dominan las dunas costeras de BCS se destacan las siguientes (Figs. 2a y 2b):

- *Ipomoea pes-caprae* (tripa de aura, bejuco de playa): es una herbácea perenne y, como miembro de la familia de plantas Convolvuláceas, presenta delgados tallos que se postran en la arena y llegan a formar grandes colonias que permiten cierta estabilización de las dunas. Sus flores violáceas emergen a nivel del suelo, protegidas del viento, y se abren durante las horas de menor estrés térmico. Las hojas carnosas y brillantes resisten la desecación y la salinidad, mientras que las flores, de gran tamaño, se abren durante el día y resaltan sobre el fondo arenoso. Aunque el aroma es tenue, la floración es prolongada y abundante, lo que genera manchas de color que indican la presencia de vida en un entorno poco propicio para las flores.
- *Oenothera drummondii talassaphila* (primavera de los cabos): Es una herbácea anual; sus flores amarillas se abren al anochecer, cuando disminuye la temperatura y aparecen los polinizadores nocturnos, principalmente las palomillas. Esta sincronía constituye un ejemplo de adaptación fenológica.
- *Abronia maritima* (alfombrilla): la floración de esta herbácea perenne se concentra en ramos de pequeñas flores rosadas (umbelas), sobre un follaje postrado. El aroma, más intenso al caer la tarde, compensa la escasa presencia de insectos y dirige la atención hacia estos puntos de color suspendidos sobre la arena. Sus hojas carnosas proporcionan la turgencia necesaria para almacenar agua, lo que permite una floración sostenida en suelos pobres en nutrientes y con baja retención de agua. Son hogar de reptiles y proveen de néctar a numerosas especies de mariposas.



- *Euphorbia leucophylla* (golondrina): presenta una estrategia llamativa, pero de menor tamaño. Es una herbácea perenne; sus flores pequeñas están acompañadas de primordios de hojas (brácteas) claras que reflejan eficientemente la intensa radiación. No produce aromas florales perceptibles; su resistencia se basa en la presencia de látex protector, hojas diminutas y una fisiología adaptada a la sequía, así como a la resistencia al viento y a la salinidad. La floración ocurre en condiciones mínimamente favorables, lo que evidencia la funcionalidad de adaptaciones sutiles. No obstante, puede formar parches tan extensos que sirven de néctar para una diversidad de pequeños coleópteros y dípteros en ambientes de dunas.
- *Psorothamnus emoryi* (dalea del desierto): es una herbácea perenne de la familia de las fabáceas, que prefiere sustratos arenosos, encontrada en lechos de arroyo, así como en dunas embrionarias e interiores. Presenta hojas muy reducidas cubiertas por vellosidades vegetales (tricomas) que reflejan la radiación solar, disminuyen la pérdida de agua y le confieren al follaje un tono grisáceo opaco. Sus flores aromáticas, pequeñas y violáceas, se agrupan en racimos discretos sobre el follaje y aparecen únicamente durante breves períodos en condiciones ambientales favorables. Presentan glándulas aceitosas, asociadas a metabolitos secundarios y pigmentos amarillos asociados a la resistencia a ambientes hostiles.

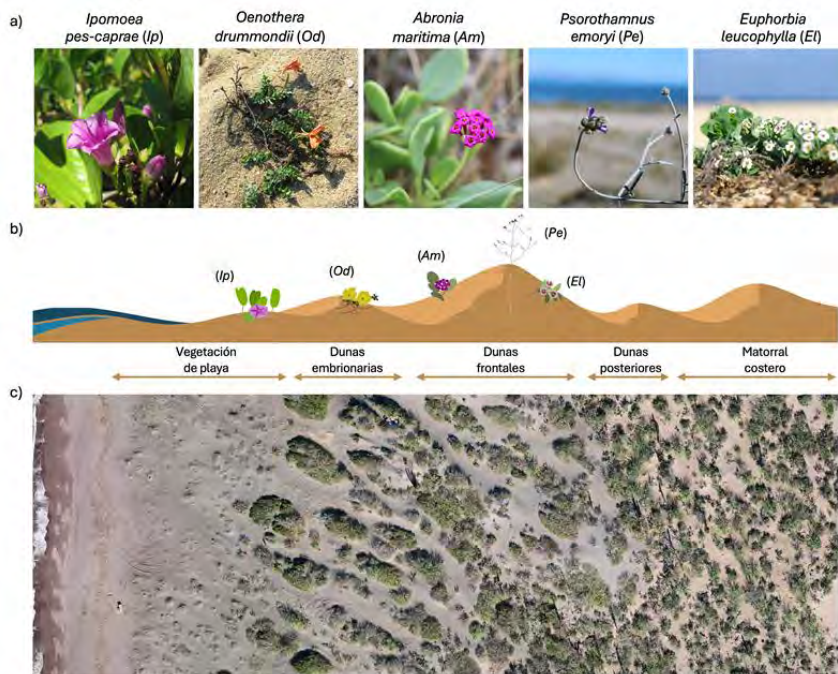


Figura 2. Vegetación, floración y zonación de las dunas costeras de Baja California Sur. A. Fotografías de flores representativas por zonación de izquierda a derecha *Ipomoea pes-caprae* (Ip), *Oenothera drummondii* (Od), *Abronia maritima* (Am), *Psorothamnus emoryi* (Pe), *Euphorbia leucophylla* (El). B Esquema de zonación de dunas en gradiente de estabilidad. C Fotografía de dron de dunas costeras El Mogote, BCS.

Discusión académica

Las dunas costeras y su invaluable vegetación son sistemas ambientales frágiles en los que el equilibrio entre el viento, la arena y la vegetación puede romperse con facilidad (CONABIO, 2025). Su uso inapropiado para el establecimiento de infraestructura urbana o turística, así como el tránsito de vehículos, destruyen su geomorfología y su vegetación; en otros casos compactan el sustrato y debilitan los cimientos biológicos que mantienen estable la costa. Cuando estas especies desaparecen, la arena se dispersa, la erosión se acelera y la capacidad natural del litoral para amortiguar las tormentas disminuye.

Aunque a menudo se perciben como vegetación escasa o insignificante, en realidad estas especies representan formas de vida con una ingeniería ecológica altamente eficiente. Cada planta contribuye a fijar la arena, regular la humedad, filtrar sales y modificar el microclima, lo que favorece la presencia de otras especies, desde polinizadores hasta microorganismos. En conjunto, forman cinturones verdes que protegen la costa y aumentan su resiliencia frente al cambio climático. Ninguna estructura artificial iguala la flexibilidad ni la capacidad de adaptación de estos sistemas autorregulados (Rodríguez-Revelo *et al.* 2014).

Consideraciones finales y perspectivas

Las dunas vegetadas son barreras naturales que constituyen un ejemplo biológico relevante. En estos desiertos costeros, la vida prospera con recursos escasos y florece en condiciones extremas. Las plantas de las dunas demuestran que la resiliencia implica adaptación, cooperación y transformación. Su conservación y valoración representan una oportunidad para proteger el litoral y para estudiar las novedosas estrategias que la naturaleza implementa para enfrentar las condiciones más adversas, y a su vez, nos permiten desarrollar estrategias para enfrentar el futuro incierto del cambio climático.

Glosario

- Convolvulácea: planta rastrera perteneciente a la familia *Convolvulaceae*.
- Duna costera: acumulación de arena transportada por el viento en zonas litorales, estabilizada por la vegetación.



- Ecotono: zona de transición ecológica entre dos ecosistemas distintos.
- Fabácea: familia de plantas leguminosas que incluye frijoles, habas y otras especies fijadoras de nitrógeno.
- Halófito: planta que tolera o requiere salinidad elevada.
- Metabolismo CAM: mecanismo fotosintético que permite ahorrar agua al fijar CO₂ durante la noche, cuando la temperatura es menor y la transpiración de H₂O se reduce.
- Suculencia: capacidad de almacenar agua en los tejidos.
- Tricomas: estructuras dérmicas parecidas a pelos o filamentos que se encuentran en la superficie de algunas plantas.

Literatura citada

- CONABIO. 2025. Ecosistemas costeros de México. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. México.
- CONAFOR. 2013. Inventario nacional forestal y de suelos: informe de resultados. Comisión Nacional Forestal. México.
- Espejel, I., P. Moreno-Casasola y G. Castillo-Campos. 2017. Dunas costeras de México: biodiversidad y manejo. Instituto de Ecología, A.C. Xalapa, México.
- Martínez, M.L. y T. Valverde. 1992. Vegetación de dunas costeras en México. *Revista de Ecología* 6 (2): 123-135.
- Rodríguez-Revelo, N., et al. 2014. Dinámica y conservación de dunas costeras. *Revista Mexicana de Biodiversidad* 85 (3): 789-802.
- Romero López, B.E. 2004. Vegetación costera y procesos ecológicos en dunas. Tesis de licenciatura. Universidad Nacional Autónoma de México. México.

Datos de los autores:

- **Arely V. Pérez López**

Doctora en ciencias en Biología Integrativa, Investigadora postdoctoral del SECIHTI en CIBNOR en el programa de Agricultura en Zonas Áridas y Candidata SNII. Su investigación integra enfoques de fisiología vegetal, microbiología y ecología para entender cómo las plantas y sus microbiomas responden al estrés por sequía y salinidad, con el objetivo de generar bases para soluciones biotecnológicas sostenibles. Además, impulsa iniciativas de divulgación científica, ilustración y muralismo. Correo electrónico: aperez@pg.cibnor.mx.

- **Blanca E. Romero López**

Doctora en Ciencias en Uso, Manejo y Preservación de Recursos Naturales por el Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste. Nivel I del SNII. Su línea de investigación es ecología de las interacciones entre plantas y microorganismos nativos de ambientes desértico-costeros. Laboratorio de Microbiología Ambiental. Actualmente es Técnico Académico (Titular "C") del CIBNOR. Correo electrónico: bromero@cibnor.mx.

- **Alfonso Medel Narváez**

Doctor en Ciencias en Uso Manejo y Preservación de los recursos Naturales. Responsable del Herbario HCIB, Candidato a SNII. Contribuye al reconocimiento y conservación de los recursos florísticos de BCS, con énfasis en especies endémicas. Ha participado en la última década en la descripción de nuevas especies vegetales en el estado e incidido en normativas para la protección de endemismos y servicios ecosistémicos. Ha publicado distintos libros para el conocimiento de la flora local y guías de identificación en campo. Correo electrónico: amedel@cibnor.mx.

- **Jorge G. Rocha Estrada**

Doctor en ciencias, investigador titular del CIBNOR en el programa de Agricultura en Zonas Áridas; Nivel II del SNII. Su área de especialización es microbiología, particularmente en interacciones entre plantas y bacterias. Su línea principal de investigación es el estudio de las funciones benéficas del microbioma de plantas nativas desérticas de BCS y el ensamble de comunidades bacterianas sintéticas, con la finalidad de entender su contribución a la salud de las plantas en condiciones extremas. Correo electrónico: jrocha@cibnor.mx.

**Cita**

Pérez López, A.V., B.E. Romero López, A. Medel Narváez y J.G. Rocha Estrada. Un repertorio de adaptaciones para florecer en las dunas costeras. Recursos Naturales y Sociedad, 2026. Vol. 12(1): 273-282. <https://doi.org/10.18846/renaysoc.2026.12.12.01.0017>.

Sometido: 7 de abril de 2026

Aceptado: 20 de junio de 2026

Editor asociado: Dr. Arturo Sánchez-Paz

Editor ejecutivo: Dr. Arturo Sánchez-Paz

Diseño gráfico editorial: Ing. Fca. Elizabeth Villegas Carrazco

When it is time reproduce:
How does the leopard grouper reproduce in La Paz Bay?

Cuando llega el momento de reproducirse: ¿Cómo se reproduce la cabrilla sardinera en la Bahía de La Paz?

Minerva Maldonado-García¹, José Antonio Estrada-Godínez²,
Francisco Encarnación-Ramírez¹, Roxana Inohuye-Rivera¹, Vicente Gracia-López¹,
Cristian Machuca¹, Deneb Maldonado-García³, Marco A. Hernández-de Dios^{1*}

Resumen

La cabrilla sardinera (*Mycteroperca rosacea*) es un pez endémico del noroeste de México con alto valor comercial, lo que la convierte en una especie de interés para la acuicultura. Este estudio analizó su ciclo reproductivo en la bahía de La Paz durante un año para comprender su biología y aportar información útil para su manejo. Los resultados mostraron que predominan las hembras, con una proporción cercana a cuatro por cada macho, y que los machos suelen ser más grandes y pesados. Además, se identificó un solo periodo de reproducción al año, que ocurre entre mayo y julio, durante los meses más cálidos y con mayor duración del día. El ciclo reproductivo se divide en cuatro etapas: maduración, desove, posdesove y reposo, cada una con cambios en las gónadas y en el uso energético. También se identificaron individuos con características de ambos sexos y un caso de cambio sexual, lo que evidencia cierta flexibilidad reproductiva de la especie. Estos resultados permiten comprender mejor su reproducción y resaltan la importancia de proteger la especie en su etapa más vulnerable, como la temporada de desove.

Palabras clave: peces marinos, biología reproductiva, desove, conservación.

¹ Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste, S.C. (CIBNOR). Instituto Politécnico Nacional 195, Playa Palo Santa Rita Sur, La Paz, Baja California Sur, 23096, México.

² Facultad de Ciencias del Mar, Universidad Autónoma de Sinaloa (UAS), Mazatlán, Sinaloa, 80040, México.

³ SECIHTI-Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste (CIBNOR), La Paz, Baja California Sur, 23096, México.

* Autor de correspondencia: mahernandez@cibnor.mx



Abstract

The leopard grouper (*Mycteroperca rosacea*) is an endemic fish species from northwestern Mexico with high commercial value, making it of particular interest for aquaculture. This study analyzed its reproductive cycle in La Paz Bay over the course of one year to better understand its biology and provide useful information for its management. The results showed a predominance of females, with an approximate ratio of four females per male, and that males tend to be larger and heavier. In addition, a single annual reproductive period was identified, occurring between May and July, during the warmest months with the longest daylight hours. The reproductive cycle is divided into four stages: maturation, spawning, post-spawning, and resting, each associated with changes in the gonads and energy use. Individuals with characteristics of both sexes were also identified, along with one case of sex change, highlighting the species' reproductive flexibility. These findings contribute to a better understanding of its reproductive biology and emphasize the importance of protecting the species during its most vulnerable stage, particularly the spawning season.

Keywords: marine fish, reproductive biology, spawning, conservation.

Introducción

La cabrilla sardinera (*Mycteroperca rosacea*) es una especie representativa del Golfo de California, tanto por su papel ecológico como por su importancia para la pesca en el noroeste de México (Díaz-Uribe *et al.* 2001; Jackson *et al.* 2015). Como depredador en ecosistemas rocosos y arrecifales, contribuye al equilibrio de las comunidades marinas (Moreno-Sánchez *et al.* 2019). Además, posee un alto valor comercial y constituye un recurso importante para las pesquerías artesanales de la región, debido a la calidad de su carne y la demanda en mercados locales (Jackson *et al.* 2015). Su importancia económica ha incrementado el interés por conocer su biología y evaluar su potencial para la acuicultura (Omont *et al.* 2026).

El aprovechamiento sostenible de esta especie depende del conocimiento de su biología, especialmente de sus procesos reproductivos (Estrada-Godínez *et al.* 2011). En los peces marinos, la reproducción es un proceso complejo regulado por factores ambientales como la temperatura, la

duración del día y la disponibilidad de alimento. Estas condiciones determinan el momento del desove y el éxito de supervivencia de las crías (Pankhurst y Munday, 2011). Por ello, el estudio del ciclo reproductivo permite comprender mejor la dinámica de las poblaciones y reconocer los periodos en los que las especies son más vulnerables (Lowerre-Barbieri *et al.* 2017). Esta información es fundamental para el manejo y la conservación de los recursos pesqueros. En este contexto, analizar el desarrollo de las gónadas, la proporción de sexos y las estrategias reproductivas de la cabrilla sardinera permite comprender su dinámica poblacional. Este conocimiento contribuye a establecer medidas para su aprovechamiento responsable y la conservación de sus poblaciones en el Golfo de California.

Antecedentes

La cabrilla sardinera

La cabrilla sardinera alcanza la madurez sexual entre los tres y cinco años, cuando supera los 30 cm de longitud total. Durante la temporada reproductiva, los individuos se reúnen en agregaciones de desove, donde machos y hembras realizan rituales de cortejo a lo largo del día. Este comportamiento culmina al atardecer con la liberación simultánea de ovocitos y espermatozoides en el agua (Estrada-Godínez *et al.* 2011).

Al igual que otras especies de la familia de los serránidos, la cabrilla sardinera presenta estrategias reproductivas complejas. Entre ellas destaca la posible capacidad de las hembras para transformarse en machos a lo largo de su vida, así como la sincronización de la reproducción en épocas específicas del año (Choat y Robertson, 1975; Estrada-Godínez *et al.* 2011). Estas adaptaciones han sido ampliamente documentadas en especies relacionadas y contribuyen a maximizar el éxito reproductivo de las poblaciones (Erisman y Hastings, 2011; Sawada, 2023).

Reproducción como base para el aprovechamiento de la especie

El estudio de la reproducción en peces marinos es fundamental para desarrollar estrategias de manejo, conservación y cultivo (Zohar, 2021). Este conocimiento permite identificar los periodos en los que la especie está mejor preparada para reproducirse en cautiverio, así como aquellos momentos en los que puede ser más vulnerable en el medio natural (Estrada-Godínez *et al.* 2011).



En muchas especies, la reproducción está regulada por factores ambientales como la temperatura del agua, la duración del día y la disponibilidad de alimento (Kumar *et al.* 2022). Estos factores influyen en la maduración de las gónadas, es decir, de los órganos reproductores donde se producen los ovocitos y los espermatozoides, y también determinan el momento en que los peces liberan sus gametos al agua para reproducirse. Además, favorecen que este proceso ocurra en condiciones que aumentan las probabilidades de supervivencia de larvas y juveniles (Kumar *et al.* 2022; Brulé *et al.* 2022).

Importancia de las características biológicas en la reproducción

Para comprender mejor cómo responden las especies a esas condiciones ambientales, también es importante analizar las características biológicas de los organismos. En este sentido, variables como la talla, el peso y la proporción de sexos dentro de una población proporcionan información relevante sobre su estructura poblacional y su dinámica.

En la cabrilla sardinera, se ha observado que las poblaciones pueden estar dominadas por hembras y que existen diferencias de peso y tamaño entre machos y hembras (Figura 1) (Estrada-Godínez, 2012). Estas características pueden influir en su estrategia reproductiva y en la forma en que organiza su reproducción en su entorno natural. Además, la actividad reproductiva ocurre principalmente entre mayo y julio, coincidiendo con el incremento estacional de la temperatura del agua y otras condiciones ambientales favorables para la reproducción (Estrada-Godínez *et al.* 2011). Diversos estudios han demostrado que factores ambientales como la temperatura y el fotoperiodo desempeñan un papel importante en la maduración de las gónadas y en la sincronización del desove, favoreciendo el éxito reproductivo (Bromage *et al.* 2001; Brulé *et al.* 2022).



Figura 1. Diferencias de tamaño y peso según el estado sexual en la cabrilla sardinera. Imagen realizada con Canva IA.

Desarrollo del estudio

Área de estudio: Bahía de La Paz

En el suroeste del Golfo de California se encuentra la bahía de La Paz, un ecosistema marino dinámico donde las condiciones ambientales cambian a lo largo del año. En este escenario natural se llevó a cabo el estudio, con muestreos realizados durante un año en la parte norte de la bahía, en zonas cercanas a San Evaristo y la isla San José (Figura 2) (Estrada-Godínez, 2012).

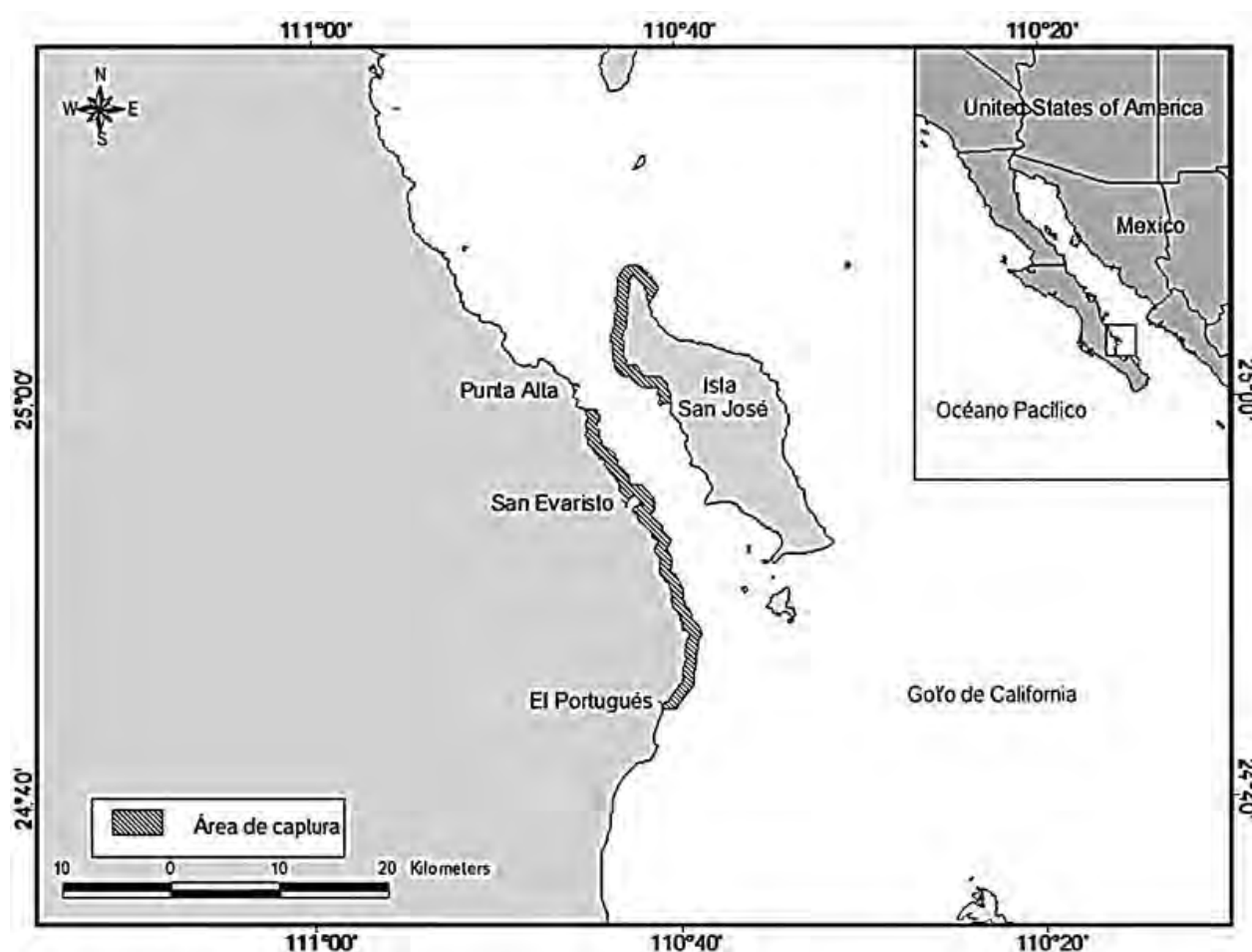


Figura 2. Mapa del área de captura de peces silvestres de la cabrilla sardinera (*M. rosacea*).



A lo largo de las estaciones, factores ambientales como la temperatura del agua y la duración del día varían notablemente, influyendo en los ritmos de vida de muchas especies marinas. Para la cabrilla sardinera, estos cambios no pasan desapercibidos, sino que están estrechamente relacionados con su reproducción. Gracias a estas características, la bahía de La Paz funciona como un laboratorio natural donde es posible observar cómo esta especie sincroniza su ciclo reproductivo con el ambiente que la rodea, revelando la estrecha conexión entre la vida marina y las condiciones del océano.

Desarrollo gonádico y maduración

El desarrollo de las gónadas es un indicador clave del estado reproductivo de los organismos, ya que permite evaluar su capacidad de reproducción. Mediante el uso de un microscopio, es posible analizar el tejido gonadal e identificar las distintas etapas que atraviesan antes, durante y después de la reproducción. Estos análisis permiten identificar cambios en la estructura y en las células reproductivas, lo que facilita la clasificación de los individuos según su grado de madurez (Ruiz-Ramírez *et al.* 2025).

En la cabrilla sardinera, el desarrollo gonádico presenta un patrón organizado que permite clasificar a los individuos en distintas fases reproductivas (Estrada-Godínez *et al.* 2011). En las hembras, los ovarios pasan por varias etapas que van desde el crecimiento temprano de los ovocitos, pasando por la acumulación de reservas energéticas (vitelogénesis), hasta la maduración final y el desove (Erisman *et al.* 2008). Después de liberar los óvulos, también pueden observarse estructuras residuales como folículos vacíos u otros procesos de reabsorción. Estas fases se ilustran en la Figura 3, donde se muestran las diferentes etapas de desarrollo ovárico observadas al microscopio.

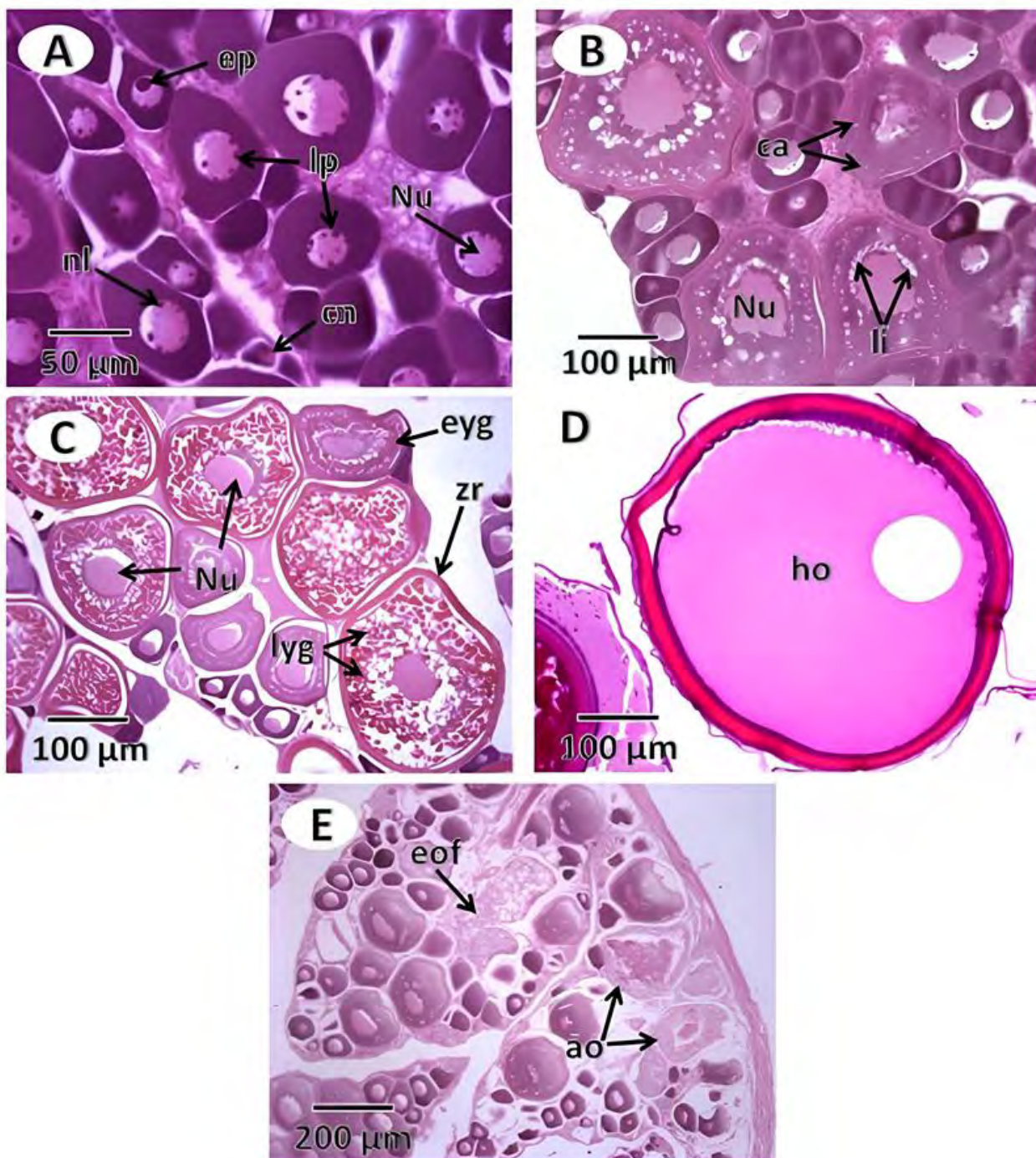


Figura 3. Tejido gonadal que muestra el desarrollo de los ovarios en la cabrilla sardinera (*M. rosacea*). (A) Crecimiento inicial de los ovocitos, (B) crecimiento intermedio con acumulación de reservas, (C) vitelogénesis, donde se almacenan nutrientes, (D) maduración final antes del desove y (E) etapa posterior al desove. Nu= núcleo, cn= nucléolo cortical, ep= perinucleolo temprano, lp= perinucleolo tardío, nl= nucléolo, ca= alveolo cortical, li= inclusiones lipídicas, eyg= gránulos de vitelo primarios, lyg= gránulos de vitelo tardíos, zr= zona radiata, ho= ovocito hidratado, ao= ovocito atrésico, eof= folículos ováricos vacíos.



En los machos, el desarrollo testicular también presenta cambios muy notorios. Se inicia con la presencia de células germinales inmaduras y avanza hacia la formación de espermatozoides en estructuras organizadas (Erisman *et al.* 2008). Durante la madurez, los testículos están llenos de espermatozoides listos para ser liberados, mientras que en fases posteriores pueden observarse signos de regresión tras el periodo reproductivo (Estrada-Godínez *et al.* 2011). Estos cambios se muestran en la Figura 4, donde se ilustran las distintas etapas de desarrollo testicular.

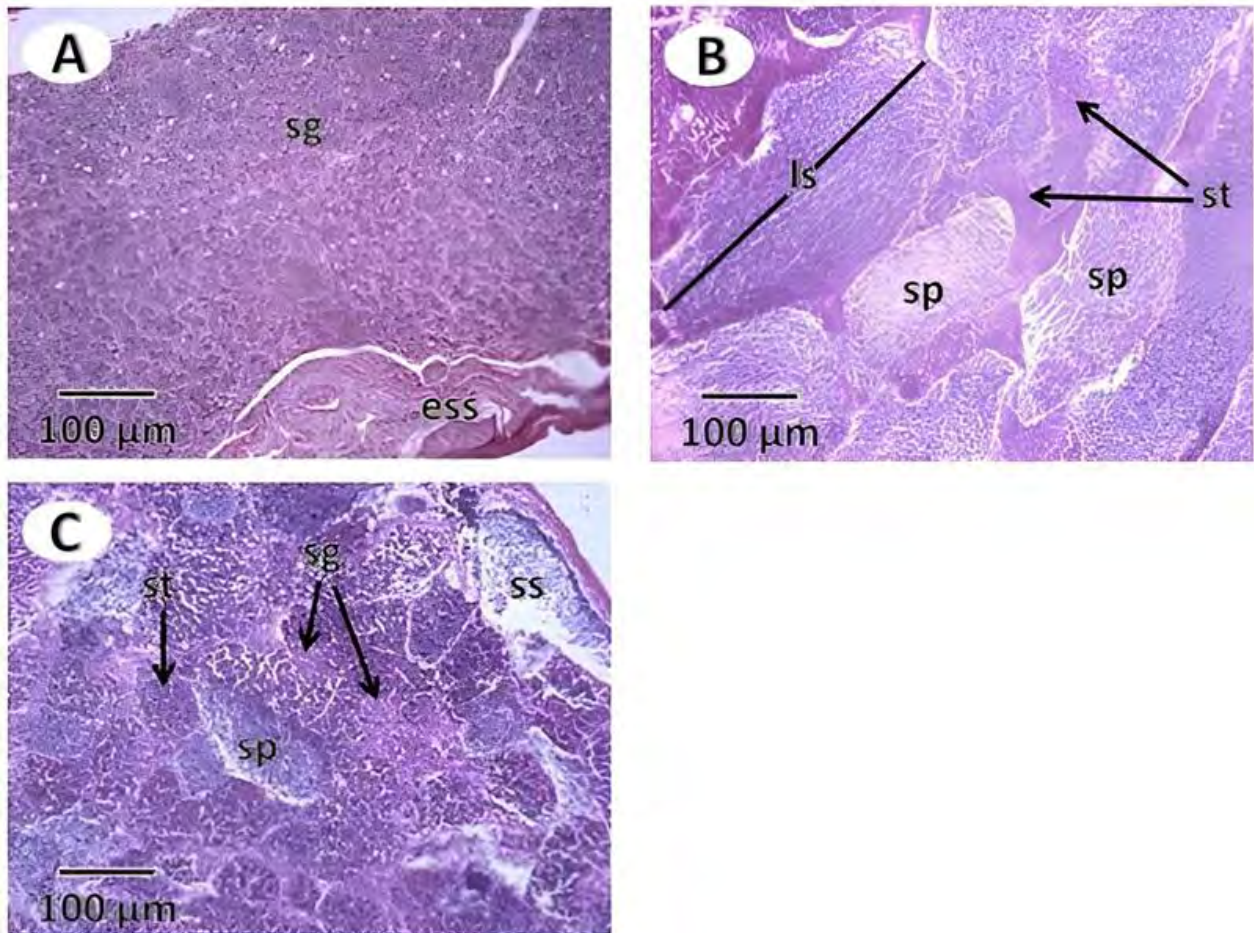


Figura 4. Tejido gonadal que muestra el desarrollo testicular en la cabrilla sardinera (*M. rosacea*). (A) Regresión o baja actividad, (B) madurez, con producción activa de células reproductivas, y (C) espermiación, espermatozoides listos para ser liberados. Ess= senos espermáticos vacíos, ls= espacio lobular, sg= espermatogonias, st= espermatocistos, sd= espermátides, sp= espermatozoides, ss= seno espermático.

Este proceso no ocurre de manera uniforme durante todo el año, sino que está asociado a periodos específicos en los que los peces destinan energía al crecimiento de las gónadas y a la producción de gametos (Bromage *et al.* 2001; Kumar *et al.* 2022). Asimismo, se ha observado que los machos pueden alcanzar la madurez sexual antes que las hembras, lo que sugiere diferencias en la dinámica reproductiva entre ambos sexos (Estrada-Godínez *et al.* 2011).

Estrategias reproductivas en la familia Serranidae

Un rasgo característico de las especies de la familia Serranidae es la capacidad de cambiar de sexo a lo largo de su vida, fenómeno conocido como hermafroditismo secuencial de tipo protogínico (Craig y Hastings, 2007). Este proceso representa una estrategia adaptativa, en el cual los individuos inician su vida como hembras y posteriormente pueden cambiar a machos (Fennessy y Sadovy, 2002; Erisman *et al.* 2008). En la cabrilla sardinera, se han identificado individuos con características de ambos sexos, así como evidencia de transición sexual. La presencia de organismos bisexuales inmaduros sugiere que el cambio de sexo es una estrategia reproductiva que permite a la población maximizar su éxito reproductivo bajo ciertas condiciones (Estrada-Godínez *et al.* 2011). Este proceso podría verse influido por factores como el tamaño corporal, la edad y la estructura social de la población, aunque los mecanismos que los regulan aún no se comprenden por completo. Este aspecto resalta la complejidad biológica de la especie y la necesidad de profundizar en su estudio.

Ciclo reproductivo de la cabrilla sardinera

El ciclo reproductivo de los peces puede dividirse en distintas etapas que reflejan los cambios fisiológicos que experimentan a lo largo del tiempo. En esta especie, se han identificado cuatro etapas principales: maduración, desove, posdesove y reposo (Figura 5). Durante el periodo de maduración, los organismos experimentan un desarrollo progresivo de las gónadas, preparándose para la reproducción. Posteriormente, durante el periodo de desove, se liberan gametos, lo que marca el punto máximo de la actividad reproductiva. Después del desove, los organismos entran en una fase de recuperación conocida como posdesove, en la que las gónadas disminuyen su actividad. Finalmente, durante el periodo de reposo, los peces presentan una actividad reproductiva mínima, lo que les permite recuperar sus reservas energéticas.

Estos periodos no solo reflejan cambios internos en los organismos, sino que también suelen sincronizarse con factores ambientales como la temperatura y el fotoperiodo, que actúan como señales que regulan la reproducción.



Figura 5. Ciclo anual de reproducción y uso de energía en la cabrilla sardinera (*M. rosacea*). Se identifican cuatro etapas: maduración (enero-abril), desove (mayo-julio), posdesove (julio) y reposo (agosto-diciembre). Imagen realizada con Canva IA.

Indicadores fisiológicos y su relación con la reproducción

El estudio del ciclo reproductivo también considera diversos indicadores fisiológicos que permiten comprender cómo los peces distribuyen su energía a lo largo del año. Estos indicadores reflejan el equilibrio entre el crecimiento, la reproducción y el mantenimiento del organismo (Figura 5). Uno de los principales es el índice gonadisomático (IGS), que relaciona el tamaño de las gónadas con el peso corporal. Este índice permite identificar cuándo los peces están en etapa de maduración o listos para el desove, ya que las gónadas aumentan de tamaño a medida que avanza la reproducción. Por otro lado, el índice hepatosomático (IHS) mide la relación entre el tamaño del hígado y el peso corporal. El hígado cumple un papel clave en el almacenamiento y la movilización de energía, por lo que sus cambios reflejan cómo el organismo utiliza su reserva de energía durante el proceso reproductivo. Asimismo, el índice de grasa visceral (IGV) permite evaluar las reservas energéticas almacenadas en forma de lípidos. Estas reservas son fundamentales, ya que la reproducción requiere un alto gasto energético especialmente durante la formación de gametos y el desove. Finalmente, el factor de condición (K) es un indicador general del estado de salud y bienestar del organismo, basado en la relación entre su peso y longitud. Este factor permite inferir si los peces se encuentran en buenas condiciones para realizar los procesos reproductivos.

En la cabrilla sardinera, estos indicadores presentan cambios a lo largo de las distintas etapas del ciclo reproductivo (Estrada-Godínez, 2012). Durante la etapa de maduración y el desove, las gónadas incrementan su tamaño debido a la producción de gametos, lo que refleja una mayor inversión de energía en la reproducción. Al mismo tiempo, las reservas energéticas almacenadas en el hígado y

el tejido graso son utilizadas para sostener este proceso. Después del desove, las gónadas reducen su tamaño y los organismos entran en una etapa de recuperación, durante la cual restablecen gradualmente sus reservas energéticas. Estos cambios muestran como la energía disponible se distribuye entre la reproducción, el crecimiento y el mantenimiento del organismo a lo largo del año, evidenciando la estrecha relación entre el estado fisiológico y la actividad reproductiva de la especie (Estrada-Godínez *et al.*, 2011; Estrada-Godínez, 2012).

Discusión

Los resultados del estudio muestran que la cabrilla sardinera presenta un período de reproducción bien establecido en la bahía de La Paz, que ocurre entre mayo y julio. Este periodo coincide con el aumento de la temperatura del agua y con una mayor duración del día, condiciones que favorecen el desarrollo de las gónadas y el éxito del desove. La sincronización del desove durante estos meses sugiere una estrategia reproductiva que maximiza la supervivencia de las larvas y los juveniles. Al reproducirse en condiciones ambientales favorables, incrementan las probabilidades de que sus crías se encuentren con alimento y condiciones adecuadas para su desarrollo.

Además, la predominancia de hembras y la presencia de individuos capaces de cambiar de sexo indican que la cabrilla sardinera posee una estrategia reproductiva flexible. El hermafroditismo secuencial permite ajustar la proporción de sexos en función de la estructura poblacional, lo que contribuye a mantener el éxito reproductivo incluso ante una baja densidad de machos. Por otro lado, los cambios observados en los indicadores fisiológicos reflejan cómo los organismos destinan la energía al proceso reproductivo. El aumento del tamaño de las gónadas durante la maduración y el desove, junto con la movilización de reservas energéticas, evidencia la estrecha relación entre el estado fisiológico y la reproducción.

En conjunto, estos resultados muestran que la cabrilla sardinera no solo presenta un período reproductivo bien definido, sino que también emplea estrategias que le permiten adaptarse a las condiciones ambientales y mantener su éxito reproductivo. Esto resalta la importancia de considerar esos procesos en el manejo de la especie, especialmente durante su temporada de desove.

La disminución del número de machos puede inducir el cambio de sexo en algunas hembras. Sin embargo, la pesca selectiva dirigida a organismos de mayor tamaño puede alterar la proporción de sexos, lo que afecta negativamente el éxito reproductivo de la población.



Importancia aplicada

El conocimiento generado sobre la reproducción de la cabrilla sardinera tiene aplicaciones directas en su manejo, ya que permite diseñar estrategias para la conservación de sus poblaciones y el aprovechamiento sostenible del recurso. Más allá de describir su ciclo reproductivo, esta información ayuda a identificar los periodos de mayor actividad reproductiva y los tamaños en los que los organismos alcanzan la madurez sexual, aspectos clave para la implementación de medidas de manejo pesquero.

En el ámbito pesquero, comprender cómo se organiza su reproducción facilita el diseño de medidas de regulación, como vedas temporales o tallas mínimas de captura, que contribuyan a proteger a la especie durante sus etapas críticas de desarrollo. Esto es especialmente relevante en especies que presentan cambios de sexo, ya que la extracción selectiva de individuos grandes puede alterar la estructura reproductiva de la población.

Por otro lado, en la acuicultura, conocer la dinámica reproductiva y los cambios fisiológicos asociados permite mejorar el manejo de los organismos en cautiverio. Esta información puede utilizarse para optimizar las condiciones que favorecen la maduración y el desove, lo que representa una ventaja para la producción controlada de la especie. En conjunto, integrar el conocimiento biológico con estrategias de manejo y producción contribuye a un aprovechamiento más responsable de la cabrilla sardinera. Esto no solo favorece la conservación de sus poblaciones naturales, sino que también asegura su disponibilidad a largo plazo como recurso.

Conclusiones

La cabrilla sardinera (*M. rosacea*) presenta un ciclo reproductivo bien definido y estrechamente ligado a las condiciones ambientales de la bahía de La Paz. A lo largo del año, esta especie alterna entre periodos de acumulación de energía, de reproducción activa y de recuperación, lo que le permite optimizar el uso de sus recursos para asegurar el éxito de su descendencia. Además, su capacidad de cambiar de sexo a lo largo de la vida refleja una estrategia reproductiva flexible, que le permite adaptarse a variaciones en la estructura de la población. Sin embargo, esta misma característica la hace vulnerable a prácticas como la pesca selectiva de individuos grandes, que puede alterar el equilibrio entre machos y hembras y afectar su reproducción. Comprender cómo se reproducen y cómo utilizan su energía no solo amplía nuestro conocimiento sobre la biología de esta

especie, sino que también aporta herramientas clave para su manejo. Proteger a la cabrilla sardinera durante su periodo de desove y considerar su dinámica reproductiva en las estrategias de pesca y acuicultura son fundamentales para asegurar su conservación y disponibilidad en el futuro.

Agradecimientos

Los autores expresan su agradecimiento al proyecto de Recursos Propios con la empresa Kampachi Farms México (proyecto: 20558). Asimismo, agradecen al investigador Dr. Juan Carlos Pérez Urbiola; al personal técnico Pedro Uriarte Ureta y Dr. Carlos Ernesto Ceseña; al Departamento de Mantenimiento Electromecánico del CIBNOR, en particular a los ingenieros Ramón Altamirano Cobos, René Gaxiola Márquez, Francisco Aguillón León, Julio Reyes García y Víctor Ormart; al Departamento de Mantenimiento y Servicios Generales, especialmente a los ingenieros Juan Mandujano García y Jessica Calvillo González; así como al personal administrativo en general. El apoyo de todo el equipo del CIBNOR ha sido fundamental para el desarrollo de la investigación con peces marinos y su colaboración resulta indispensable para la realización de investigaciones futuras.

Literatura citada

- Bromage, N., Porter, M., Randall, C., 2001. The environmental regulation of maturation in farmed finfish with special reference to the role of photoperiod and melatonin. *Aquaculture, Reproductive Biotechnology in Finfish Aquaculture* 197, 63–98.
- Brulé, T., Renán, X., Colás-Marrufo, T., 2022. Potential impact of climate change on fish reproductive phenology: a case study in gonochoric and hermaphrodite commercially important species from the Southern Gulf of Mexico. *Fishes* 7, 156.
- Choat, J.H., Robertson, D.R., 1975. Protogynous hermaphroditism in fishes of the family scaridae, in: Reinboth, R. (Ed.), *Intersexuality in the Animal Kingdom*. Springer, Berlin, Heidelberg, pp. 263–283.
- Craig, M.T., Hastings, P.A., 2007. A molecular phylogeny of the groupers of the subfamily Epinephelinae (Serranidae) with a revised classification of the Epinephelini. *Ichthyol. Res.* 54, 1–17.



- Díaz-Urbe, J.G., Elorduy-Garay, J.F., Gonzalez-Valdovinos, Ma.T., 2001. Age and Growth of the Leopard Grouper, *Mycteroperca rosacea*, in the Southern Gulf of California, Mexico. *Pac. Sci.* 55, 171–182.
- Erisman, B.E., Hastings, P.A., 2011. Evolutionary transitions in the sexual patterns of fishes: insights from a phylogenetic analysis of the seabasses (Teleostei: Serranidae). *Ichthyol. Herpetol.* 2011, 357–364.
- Erisman, B.E., Rosales-Casián, J.A., Hastings, P.A., 2008. Evidence of gonochorism in a grouper, *Mycteroperca rosacea*, from the Gulf of California, Mexico. *Environ. Biol. Fishes* 82, 23–33.
- Estrada-Godínez, J.A., 2012. Ciclo reproductivo y composición bioquímica de la cabrilla sardinera, *Mycteroperca rosacea* (Streets), en el medio natural. Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste, SC, La Paz, Baja California Sur.
- Estrada-Godínez, J.A., Maldonado-García, M., Gracia-López, V., Carrillo, M., 2011. Ciclo reproductivo de la cabrilla sardinera *Mycteroperca rosacea* en la bahía de La Paz, México. *Cienc. Mar.* 37, 425–441.
- Fennessy, S.T., Sadovy, Y., 2002. Reproductive biology of a diandric protogynous hermaphrodite, the serranid *Epinephelus andersoni*. *Mar. Freshw. Res.* 53, 147–158.
- Jackson, A.M., Munguía-Vega, A., Beldade, R., Erisman, B.E., Bernardi, G., 2015. Incorporating historical and ecological genetic data for leopard grouper (*Mycteroperca rosacea*) into marine reserve design in the Gulf of California. *Conserv. Genet.* 16, 811–822.
- Kumar, P., Babita, M., Kailasam, M., Muralidhar, M., Hussain, T., Behera, A., Jithendran, K.P., 2022. Effect of changing environmental factors on reproductive cycle and endocrinology of fishes. En: Sinha, A., Kumar, S., Kumari, K. (Eds.), *Outlook of Climate Change and Fish Nutrition*. Springer Nature Singapore, Singapore, pp. 377–396.
- Lowerre-Barbieri, S., DeCelles, G., Pepin, P., Catalán, I.A., Muhling, B., Erisman, B., Cadrin, S.X., Alós, J., Ospina-Alvarez, A., Stachura, M.M., Tringali, M.D., Burnsed, S.W., Paris, C.B., 2017. Reproductive resilience: a paradigm shift in understanding spawner-recruit systems in exploited marine fish. *Fish Fish.* 18, 285–312.
- Moreno-Sánchez, X.G., Perez-Rojo, P., Irigoyen-Arredondo, M.S., Marin-Enríquez, E., Abitia-Cárdenas, L.A., Escobar-Sanchez, O., 2019. Feeding habits of the leopard grouper, *Mycteroperca rosacea* (Actinopterygii: Perciformes: Epinephelidae), in the central Gulf of California, BCS, Mexico. *Acta Ichthyol. Piscat.* 49, 9–22.

- Omont, A., Spanopoulos-Zarco, M., Gracia-López, V., 2026. First evidence of color change from normal color to xanthism pattern in leopard grouper *Mycteroperca rosacea*, in captivity. Lat. Am. J. Aquat. Res. 54, 62–68.
- Pankhurst, N.W., Munday, P.L., 2011. Effects of climate change on fish reproduction and early life history stages. Mar. Freshw. Res. 62, 1015–1026.
- Ruiz-Ramírez, S., Reséndiz-Cruz, V.E., Lucano-Ramírez, G., Carretero-Montes, R.E., Lara-Mendoza, R.E., Ruiz-Ramírez, S., Reséndiz-Cruz, V.E., Lucano-Ramírez, G., Carretero-Montes, R.E., Lara-Mendoza, R.E., 2025. Biología reproductiva de la corvina *Umbrina xanti* (Perciformes: Sciaenidae) en el Pacífico central mexicano. Cienc. Mar. 51.
- Sawada, K., 2023. Simultaneous hermaphroditism in fishes. En: Kuwamura, T., Sawada, K., Sunobe, T., Sakai, Y., Kadota, T. (Eds.), Hermaphroditism and Mating Systems in Fish. Springer Nature, Singapore, pp. 31–62.
- Zohar, Y., 2021. Fish reproductive biology – Reflecting on five decades of fundamental and translational research. Gen. Comp. Endocrinol. 300, 113544.

Datos de los autores

- El Dr. **Marco Antonio Hernández de Dios** (mahernandez@cibnor.mx) es Técnico Titular C en el CIBNOR y se especializa en nutrición y reproducción de peces marinos.
- La Dra. **Minerva Concepción Maldonado García** (minervam04@cibnor.mx) es Investigadora Titular B en el CIBNOR y miembro del SNII, Nivel I; su especialidad es la acuicultura y la biología reproductiva de peces marinos.
- El Dr. **Deneb Maldonado García** (denebm@cibnor.mx), adscrito a Secihti-CIBNOR y miembro del SNII, Nivel I, se especializa en biología celular del espermatozoide, biotecnología y desarrollo embrionario de peces marinos.
- El Lic. **Encarnación Ramírez Francisco** (carnechon04@cibnor.mx) está adscrito al CIBNOR y se desempeña como Técnico del Laboratorio de Recepción y Mantenimiento de Peces Marinos.



- La M. en C. **Roxana Bertha Inohuye Rivera** (rinohuye@cibnor.mx) es Técnica Titular C, con especialidad en parasitología.
- El Dr. **Cristian Machuca** (cm15028@gmail.com) participa en el proyecto de reproducción de peces marinos en el Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste.
- El Dr. **Vicente Gracia López** (vinny@cibnor.mx) es Investigador Titular B y miembro del SNII, Nivel I; se especializa en producción de larvas y reproducción en cautiverio de peces y juveniles marinos.
- El Dr. **José Antonio Estrada Godínez** (joseestrada@uas.edu.mx) se especializa en acuicultura, se desempeña en el área de Biología Acuícola y pertenece al SNI, Nivel I.

Cita

Maldonado-García, M., J.A. Estrada-Godínez, F. Encarnación-Ramírez, R. Inohuye-Rivera, V. Gracia-López, C. Machuca, D. Maldonado-García y M.A. Hernández-de Dios. Cuando llega el momento de reproducirse: ¿cómo se reproduce la cabrilla sardinera en la bahía de La Paz?. Recursos Naturales y Sociedad, 2026. Vol. 12(1): 284-299. <https://doi.org/10.18846/renaysoc.2026.12.12.01.0018>.

Sometido: 13 de abril de 2026

Aceptado: 23 de junio de 2026

Editor asociado: Dr. Arturo Sánchez-Paz

Editor ejecutivo: Dr. Arturo Sánchez-Paz

Diseño gráfico editorial: Ing. Fca. Elizabeth Villegas Carrasco

Huauzontle:
valor cultural, nutricional y agroecológico en México

Huauzontle: valor cultural, nutricional y agroecológico en México

Eréndira Esmeralda Hernández-Andrade^{1*},
Libia Iris Trejo-Téllez¹, Yolanda Leticia Fernández-Pavía¹

Resumen

El huauzontle (*Chenopodium berlandieri* subsp. *nuttalliae*) es un cultivo tradicional mexicano con valor alimentario, cultural y agroecológico. El artículo analiza su contribución potencial a la diversificación de la dieta y de los sistemas agrícolas ante la malnutrición y el cambio climático. Sus hojas, inflorescencias y semillas contienen proteínas, carbohidratos, fibra, vitaminas, minerales y compuestos fenólicos con actividad antioxidante y antiinflamatoria. Además, las semillas presentan características de pseudocereal y ofrecen posibilidad para la elaboración de alimentos fermentados, ingredientes funcionales y productos fortificados. El cultivo también muestra aplicaciones potenciales en el manejo de plagas y en la alimentación animal. Su capacidad de adaptación a ambientes áridos, altas temperaturas y salinidad moderada incrementa su interés agronómico, aunque la respuesta depende del cultivar, la etapa fenológica y las condiciones de manejo. En México, su producción se concentra principalmente en Puebla, Tlaxcala, Guerrero y Morelos, dentro de sistemas campesinos, huertos de traspatio y milpas. Su aprovechamiento requiere conservar semillas, documentar prácticas culinarias, fortalecer cadenas locales de comercialización y validar su desempeño agronómico, nutricional, sensorial y económico. El huauzontle no sustituye a los cultivos básicos, pero puede complementar dietas regionales y favorecer la conservación de la agrobiodiversidad.

Palabras clave: pseudocereal, alimento ancestral, cambio climático, enfermedades crónicas.

¹ Colegio de Postgraduados Campus Montecillo, Programa de Edafología. Carretera Federal México-Texcoco Km. 36.5 Montecillo, 56264 Texcoco de Mora, México.

* Autor de correspondencia: hernandez.erendira@gmail.com



Abstract

Huauzontle (*Chenopodium berlandieri* subsp. *nuttalliae*) is a traditional Mexican crop with nutritional, cultural, and agroecological value. This article examines its potential contribution to dietary diversification and agricultural systems in the context of malnutrition and climate change. Its leaves, inflorescences, and seeds contain proteins, carbohydrates, fiber, vitamins, minerals, and phenolic compounds with antioxidant and anti-inflammatory activity. In addition, its seeds possess pseudocereal characteristics and offer opportunities for the development of fermented foods, functional ingredients, and fortified products. The crop also has potential applications in pest management and animal nutrition. Its ability to adapt to arid environments, high temperatures, and moderate salinity increases its agronomic relevance, although its response depends on the cultivar, phenological stage, and management conditions. In Mexico, huauzontle production is concentrated mainly in Puebla, Tlaxcala, Guerrero, and Morelos, where it forms part of smallholder farming systems, home gardens, and traditional milpa systems. Its sustainable use requires seed conservation, documentation of culinary practices, stronger local marketing chains, and validation of its agronomic, nutritional, sensory, and economic performance. Huauzontle does not replace staple crops; however, it can complement regional diets and contribute to agrobiodiversity conservation.

Keywords: pseudocereal, ancestral food, climate change, chronic diseases.

Antecedentes

El cambio climático representa uno de los principales desafíos para la sostenibilidad de los sistemas alimentarios y la seguridad alimentaria a nivel mundial (Becerra y Becerril, 2026). El incremento de las emisiones de gases de efecto invernadero ha intensificado la variabilidad climática, con efectos visibles en el aumento de la temperatura, la irregularidad de las precipitaciones y la mayor frecuencia de eventos extremos, como sequías, inundaciones y tormentas (Nemecek et al., 2016; Anshida et al., 2026). Estas condiciones reducen la productividad agrícola, aceleran la degradación de los suelos, modifican la disponibilidad y el precio de los alimentos, e interrumpen las cadenas de suministros. En conjunto, estos procesos afectan la nutrición humana y el bienestar social (Wossen et al., 2018).

La malnutrición, comprende condiciones asociadas con el consumo insuficiente, desequilibrado o excesivo de nutrientes esenciales, por ello, incluye tanto la desnutrición como la obesidad (Quevedo, 2019). Ambas expresiones reflejan limitaciones en el acceso a dietas saludables, seguras y nutritivas. El cambio climático agrava esta problemática porque compromete la disponibilidad, la accesibilidad y la calidad de los alimentos en especial en poblaciones con mayor vulnerabilidad social y económica (Becerra y Becerril, 2026).

En México, esta situación adquiere relevancia particular. Aunque el país ocupa posiciones destacadas en la producción agropecuaria mundial, persisten desigualdades importantes en el acceso a los alimentos (DGSIA, 2025). Esta condición favorece la coexistencia de obesidad y desnutrición, fenómeno reconocido como doble carga de la malnutrición (FAO, 2013). Por ello, resulta necesario fortalecer sistemas alimentarios más diversos, resilientes y sostenibles, capaces de contribuir a la seguridad alimentaria y a una nutrición adecuada.

La diversificación agrícola constituye una estrategia para reducir la dependencia de un número limitado de cultivos. A pesar de que la humanidad ha domesticado alrededor de 150 especies vegetales la alimentación mundial depende en gran medida de cultivos como maíz (*Zea mays* L), trigo (*Triticum aestivum* L) y arroz (*Oryza Sativa*) (Shelef *et al.*, 2017). Esta dependencia incrementa la vulnerabilidad de los sistemas agrícolas frente al cambio climático y otros factores de estrés ambiental.

En este contexto, los cultivos subutilizados representan una alternativa para fortalecer la seguridad alimentaria y nutricional (Mukuwapasi *et al.*, 2024). Muchas de estas especies presentan tolerancia a sequía, resistencia a plagas y enfermedades, bajos requerimientos de insumos y contenidos relevantes de nutrientes. Además, contribuyen a la conservación de la agrobiodiversidad y a la resiliencia de los sistemas productivos. Cultivos como amaranto (*Amaranthus* spp.), la quinua (*Chenopodium quinoa*), el teff (*Eragrostis tef*), huauzontle (*Chenopodium berlandieri* subsp. *nuttalliae* Safford) y otras especies tradicionales muestran potencial para diversificar la dieta y ampliar las opciones productivas frente a escenarios ambientales adversos.

El huauzontle (*Chenopodium berlandieri* subsp. *nuttalliae* Safford) es un cultivo ancestral y tradicional de México (Heiser y Nelson, 1974; Xingú-López *et al.*, 2018) (Figura 1). Diversos estudios han documentado su contenido de proteínas, aminoácidos esenciales, fibra, minerales y compuestos antioxidantes, atributos que sustentan su interés como alimento con potencial nutricional (López- Monterrubio *et al.*, 2023; Santiago- López *et al.*, 2023). También se ha reportado su capacidad para crecer en ambientes con limitada disponibilidad de agua, altas temperaturas y



condiciones de salinidad en el medio de crecimiento (Hernández-Andrade *et al.*, 2026). Estas características le confieren interés agroecológico en el contexto del cambio climático. En este artículo se analiza el valor cultural, nutricional y agroecológico del huauzontle, con énfasis en su potencial para contribuir a la diversificación alimentaria y al fortalecimiento de sistemas agrícolas locales.



Figura 1. Planta de huauzontle (*Chenopodium berlandieri* subsp. *nuttalliae* Safford), donde se observan las hojas tiernas e inflorescencias (Tomada por Hernández Andrade E.E)

Generalidades culturales del huauzontle

El huauzontle pertenece a la familia Amaranthaceae. Es una planta anual que puede alcanzar entre 30 cm y 2 m de altura, según las condiciones de crecimiento y el material vegetal. Forma parte de la diversidad de quelites presentes en México, grupo que incluye alrededor de 350 especies comestibles (CONABIO, 2020).

De acuerdo con el Códice Florentino, escrito por fray Bernadino de Sahagún entre 1548 y 1585, la alimentación en el México prehispánico incluyó cultivos y plantas como maíz frijol, chile y diferentes quelites, entre ellos amaranto, chía y huauzontle (Sahagún, 1979). Esta referencia histórica permite ubicar al huauzontle dentro de una tradición alimentaria vinculada con el aprovechamiento de especies nativas y con el conocimiento culinario de distintas comunidades.

Tradicionalmente, el huauzontle se consume como hortaliza fresca o cocinada. Las hojas tiernas se aprovechan como quelite, mientras que las inflorescencias se preparan en diversos platillos regionales, entre ellos los huauzontles capeados en caldillo de jitomate (Figura 2). Este consumo se asocia con celebraciones religiosas como la Cuaresma y la Semana Santa (Figueredo-Urbina *et al.*, 2022). Además, la semilla pueden consumirse en la etapa de maduración, aunque su uso alimentario resulta menos extendido que el de las hojas y las inflorescencias.



Figura 2. Muestra culinaria de preparación de huauzontle (*Chenopodium berlandieri* subsp. *nuttalliae* Safford) en el festival del huauzontle Jojutla Morelos (Tomada por Montoya Omar).



Producción y distribución

El huauzontle se distribuye en zonas áridas y semiáridas de México. Se ha registrado en Baja California Norte, Sonora, Chihuahua, Durango, Nuevo León, Hidalgo, Ciudad de México, Veracruz, Oaxaca, Campeche y Puebla (CONABIO, 2020). Esta amplia distribución refleja su capacidad de adaptación a diferentes condiciones ambientales.

Los principales estados productores de huauzontle son Puebla, Tlaxcala, Guerrero y Morelos. En estos territorios, el cultivo mantiene importancia alimentaria y cultural, sobre todo en sistemas de producción de pequeña escala. Además, forma parte de huertos de traspatio y del sistema milpa, lo que evidencia su relación con la agricultura campesina y con prácticas locales de diversificación productiva (Cuevas-Bernardino *et al.*, 2022).

En el 2024 se reportó una producción de 679.44 toneladas, con rendimientos entre 2 y 11 t ha⁻¹ en sistemas de temporal y riego (SIAP, 2024). Estos datos muestran que el cultivo mantiene una superficie y una producción limitadas frente a otros alimentos de mayor demanda; sin embargo, su permanencia en sistemas locales sugiere un papel relevante en la conservación de recursos fitogenéticos y saberes alimentarios.

Propiedades nutricionales y usos alimentarios

El huauzontle se utiliza como hortaliza de hoja y como cultivo con semillas aprovechables, debido a la composición química y al contenido de nutrientes presentes en sus órganos comestibles (Bhargava *et al.*, 2007). Se ha reportado que contiene cerca de 17 % de proteínas y 60 % de carbohidratos, además de vitaminas A, B, C y D, minerales como calcio, fósforo y hierro, fibra, fenoles y flavonoides con actividad antioxidante y antiinflamatoria (Lazo-Vélez *et al.*, 2016; Román-Cortés *et al.*, 2018; López-Monterrubio *et al.*, 2020). Asimismo, se ha estimado que una porción comestible de 100 g puede aportar 6 g de proteína, cantidad superior a la registrada en los nopales (Morales de L. *et al.*, 2013). Estas características sustentan su potencial para diversificar la alimentación y favorecer el desarrollo de productos funcionales.

Las hojas constituyen una fuente de proteínas, carotenoides y vitamina C, así como de minerales como potasio, calcio, sodio, hierro y cobre (Prakash *et al.*, 1993; Bhargava *et al.*, 2007). Por su parte, las semillas de huauzontle se clasifican como pseudocereales debido a que presentan características estructurales y una composición rica en almidón semejante a la de cereales convencionales como maíz, arroz y trigo. No obstante, en México el consumo tradicional de

huauzontle se concentra principalmente en hojas tiernas e inflorescencias, por lo que el uso alimentario de la semilla requiere contextualizarse como una posibilidad tecnológica o de aprovechamiento específico.

Assad-Bustillos *et al.* (2014) caracterizaron el almidón de semillas de huauzontle mediante técnicas químicas y físicas. Los análisis mostraron 50 % de rendimiento de extracción, 72.5 % de pureza de almidón, 5.32 % de humedad, 1.09 % de cenizas, 0.083 % de grasa, 11.4 % de nitrógeno total y 4.13 % de fibra cruda con la extracción química. Hernández-Marín *et al.* (2019) observaron 15.9 % de proteína en semillas de huauzontle. Asimismo, Barrón-Yáñez *et al.* (2009) reportaron 17.8 % de proteína en germinados de huauzontle, 411.1 calorías y 5280.5 mg de saponinas.

Los pseudocereales presentan diferencias en su composición química, particularmente en el contenido de carbohidratos, proteínas y lípidos. Estas variaciones permiten identificar especies con características nutricionales específicas y apoyar su selección de acuerdo con distintos usos alimentarios (Tabla 1).

Además de su valor nutricional, los pseudocereales se han asociado con propiedades promotoras de la salud, entre ellas la reducción del riesgo de cáncer, diabetes mellitus, hipertensión, enfermedades cardiovasculares y estrés oxidativo. Estos efectos se relacionan con la presencia de compuestos fenólicos y otros metabolitos bioactivos (Mir *et al.*, 2018; Thakur *et al.*, 2021).

Tabla 1. Contenido de macronutrientes en semillas de pseudocereales valores en peso seco de huauzontle (Assad-Bustillos *et al.*, 2014; López-Monterrubio *et al.*, 2020), quinua (Elsohaimy *et al.*, 2015), amaranto (Corke *et al.*, 2016), chía (Ulian *et al.*, 2021)

Parámetro	Huauzontle	Quinua	Amaranto	Chía
Carbohidratos (%)	60	72	59	41
Proteínas (%)	17	14	16	20
Lípidos (%)	0.083	6.7	7.2	33



Aplicaciones biotecnológicas

Diversos estudios han documentado aplicaciones biotecnológicas del huauzontle. Las semillas se han utilizado como sustrato en procesos de fermentación con bacterias ácido-lácticas, lo que permite obtener productos con propiedades antioxidantes y antiinflamatorias (Santiago-López *et al.*, 2023). Este enfoque resulta relevante para el desarrollo de alimentos fermentados con valor agregado.

También se ha evaluado el potencial prebiótico de extractos de inflorescencias. Márquez-Nuñez *et al.* (2025) reportaron que estos extractos favorecen el crecimiento de bacterias benéficas, como *Lactiplantibacillus plantarum*, *Lacticaseibacillus casei* Shirota y *Bifidobacterium animalis*. Estos resultados sugieren que las inflorescencias pueden ser una fuente de compuestos con interés funcional.

Otra aplicación se relaciona con la fortificación de tortillas. La mezcla de harina de maíz con huauzontle incrementa el contenido proteico hasta 27 % y mejora el perfil de aminoácidos, en particular lisina y triptófano, sin modificar de forma importante el sabor ni la textura del producto (Sánchez-Villa *et al.*, 2020). Esta aplicación debe presentarse como una alternativa tecnológica basada en la incorporación de huauzontle a productos elaborados con maíz.

Usos agroecológicos y zootécnicos

El huauzontle también presenta aplicaciones potenciales en la agricultura y en la producción animal. Los extractos obtenidos de sus semillas, ricos en compuestos fenólicos y flavonoides, han mostrado actividad bioinsecticida frente a *Copitarsia decolora*, plaga que afecta cultivos de repollo (Vázquez-Covarrubias *et al.*, 2015). Este uso podría representar una alternativa para explorar estrategias de manejo de plagas con menor dependencia de plaguicidas sintéticos.

En la producción avícola, la incorporación de huauzontle en la alimentación de gallinas ponedoras ha mostrado efectos favorables sobre la calidad, el tamaño y la forma de los huevos (López-Ramírez *et al.*, 2016). Estos antecedentes amplían el interés del cultivo más allá del consumo humano y muestran posibles usos en sistemas productivos diversificados. No obstante, estas aplicaciones requieren interpretarse con cautela, ya que su adopción depende de disponibilidad de materia prima, costos, aceptación productiva y validación en diferentes condiciones de manejo.

Huauzontle bajo condiciones de salinidad

La tolerancia del huauzontle a condiciones salinas adquiere relevancia en un escenario de cambio climático, degradación del suelo y reducción de la productividad agrícola. La salinidad afecta la germinación, el crecimiento vegetal, la absorción de nutrimentos y la acumulación de biomasa; por ello, la identificación de especies con capacidad de adaptación a estos ambientes resulta importante para diversificar los sistemas productivos.

Hernández-Andrade *et al.* (2025) evaluaron la germinación y el crecimiento inicial de semillas procedentes de Ciudad de México, Puebla y Tlaxcala bajo concentraciones de NaCl de 0 a 300 mM. Los cultivares de Ciudad de México y Tlaxcala mostraron mejor desempeño en 75 y 150 mM, mientras que el material de Puebla presentó reducción a 225 mM. Estos resultados evidencian diferencias entre cultivares en la respuesta al estrés salino.

La variabilidad observada sugiere la existencia de materiales con mayor tolerancia a concentraciones moderadas de sales. Por ello, el huauzontle puede considerarse una especie de interés para investigaciones orientadas a la selección de cultivares adaptados a suelos con salinidad moderada. Sin embargo, el uso de este cultivo en ambientes salinos debe seguir con evaluaciones, ya que su desempeño puede depender del origen del material vegetal, la etapa fenológica, la concentración de sales y las condiciones de manejo agronómico (Figura 3).



Figura 3. a) Germinación de semilla y b) crecimiento inicial de huauzontle (*Chenopodium berlandieri* subsp. *nuttalliae* Safford) en un medio salino (Tomada por Hernández Andrade E.E).



Discusión académica

El huauzontle reúne atributos alimentarios, agroecológicos y agronómicos que justifican su análisis como cultivo tradicional de interés regional. En México, el consumo tradicional es principalmente hojas tiernas e inflorescencias, no con el uso de la semilla como grano.

Los estudios sobre semillas, harinas o fracciones proteicas de huauzontle aportan información útil para el desarrollo de productos alimentarios. En particular, la incorporación de proteínas aisladas o harina de huauzontle en productos elaborados con maíz puede incrementar el contenido proteico y mejorar el perfil de aminoácidos esenciales, como lisina y triptófano. Esta evidencia no implica que el huauzontle sustituya al maíz ni que se consuma de forma predominante como grano. Su importancia radica en la posibilidad de complementar alimentos de amplio consumo mediante ingredientes locales con valor nutrimental.

En el ámbito agroecológico, los extractos de huauzontle han mostrado actividad bioinsecticida contra *Copitarsia decolora* en cultivos de repollo. Este antecedente permite considerar a la especie como fuente de compuestos con posible aplicación en el manejo de plagas.

En producción animal, la inclusión de huauzontle en la alimentación de gallinas criollas se ha asociado con cambios favorables en características físicas del huevo, como tamaño, forma y calidad. Estos resultados sugieren un posible uso zootécnico en sistemas de traspatio o producción local.

La respuesta del huauzontle a condiciones de salinidad también aporta elementos para su valoración agronómica, destacando la variabilidad genética asociada con la respuesta a salinidad y respaldan la necesidad de seleccionar materiales con mejor desempeño en ambientes con restricciones edáficas.

En conjunto, el huauzontle puede contribuir a la diversificación de dietas locales, a la conservación de la agrobiodiversidad y al estudio de cultivos con tolerancia a factores de estrés abiótico. Su importancia no debe plantearse como una sustitución de cultivos básicos ni como una solución general frente a la malnutrición o el cambio climático. Su valor se ubica en sistemas agroalimentarios regionales, donde conserva presencia cultural, usos culinarios, disponibilidad local y posibilidades de aprovechamiento agronómico.

Perspectivas y consideraciones

La conservación y promoción del huauzontle deben plantearse bajo escenarios territoriales y graduales. A escala local, su fortalecimiento puede apoyarse en la documentación del conocimiento tradicional, la conservación de semillas, la transmisión de técnicas de preparación y la participación de productores, cocineras tradicionales, instituciones educativas y comunidades rurales. En este nivel, las ferias gastronómicas, como las realizadas en Jojutla, Morelos, pueden funcionar como espacios de divulgación, intercambio de recetas y reconocimiento de prácticas culinarias asociadas con la especie.

El impacto local de estas acciones podría reflejarse en la permanencia del consumo, la valorización del conocimiento comunitario y la generación de ingresos complementarios para pequeños productores. Sin embargo, estos efectos dependerían de la disponibilidad de producto, la organización de los actores locales, la continuidad de las actividades de divulgación y la existencia de mercados cercanos.

A escala regional, el huauzontle puede integrarse a estrategias de diversificación agrícola en zonas donde ya existe experiencia en su cultivo, comercialización o consumo. Este proceso requeriría la organización de productores, el registro de superficies cultivadas, la identificación de cultivares locales, la capacitación técnica y el análisis de la demanda real. En este escenario, el impacto esperado sería la consolidación de nichos productivos y comerciales, más que una expansión acelerada a mercados sin antecedentes de consumo.

En el ámbito nacional, la valorización del huauzontle podría vincularse con programas de conservación de la agrobiodiversidad, agricultura familiar, alimentación saludable, educación alimentaria y rescate de cultivos tradicionales. Para que esta integración tenga viabilidad, se requieren acciones concretas: conservación de germoplasma, validación agronómica de cultivares, generación de información estadística confiable, fortalecimiento de cadenas cortas de comercialización, capacitación en manejo postcosecha y promoción culinaria con base en evidencia.

También es necesario reconocer sus limitaciones. El huauzontle requiere conocimientos específicos para su selección, limpieza, preparación y consumo, especialmente cuando se aprovechan las inflorescencias. Esta característica restringe su adopción en regiones sin tradición



culinaria asociada con la especie. Además, las hojas tiernas y las inflorescencias presentan vida postcosecha limitada, por lo que su comercialización exige condiciones adecuadas de manejo, distribución y consumo cercano.

Por estas razones, su promoción no debe plantearse como una estrategia de exportación inmediata hacia regiones sin antecedentes culturales de consumo. Una ruta más viable consiste en fortalecer los territorios donde el huauzontle ya forma parte de la alimentación local, ampliar su reconocimiento mediante educación alimentaria y explorar productos derivados solo cuando exista evaluación técnica, sensorial y comercial.

Las investigaciones futuras pueden orientarse a cinco líneas principales: caracterizar con mayor precisión la composición nutrimental de hojas, inflorescencias y semillas; evaluar la aceptación sensorial de nuevos productos elaborados con huauzontle; identificar cultivares con tolerancia a salinidad y otros factores de estrés abiótico; analizar la rentabilidad del cultivo en sistemas de pequeña escala; y documentar las prácticas culinarias que sostienen su consumo regional. Estas líneas permitirían definir con mayor precisión el papel del huauzontle en sistemas agroalimentarios locales y regionales.

Agradecimientos

Se agradece al Programa Apoyo para Estancias de Investigaciones COMECYT – Cátedras CAT2025-0019.

Literatura citada

- Anshida, M., P.P. Murugan., M.Senthilkumar., M. Chandrakumar., G. Vanitha., A.Janaki.,G. Arvind.2026. *Impact of climate change on food security: A systematic literature review and bibliometric analysis*. Sustainable Futures.1(11):1:15
- Assad-Bustillos, M., M. Ramírez-Gilly., A. Tecante., L. Chaires-Martínez. 2014. *Caracterización reológica, térmica, funcional y fisicoquímica del almidón de semillas de huauzontle (Chenopodium berlandieri spp. nuttalliae)*. Agrociencia, 48(8):789-803.

- Barrón-Yáñez, M. R., C. Villanueva-Verduzco., M.R. García-Mateos., M.T. Colinas-León. 2009. *Valor nutricional y contenido de saponinas en germinados de Huauzontle (Chenopodium nuttalliae Saff.), calabacita (Cucurbita pepo L.), canola (Brassica napus L.) y amaranto (Amaranthus leucocarpus S. Watson syn. hypoch.* Revista Chapingo. Serie horticultura, 15(3):237-243
- Becerra-Chiron, I. M., y L. Becerril-Serna 2025. *Amaranto agroecológico: Resiliencia, eficiencia y potencial biotecnológico frente al cambio climático.* Acta Agrícola y Pecuaria, 1(12): 1-14. <https://doi.org/10.30973/aap/2026.12.0121001>
- Bhargava, A., S. Shukla., D. Ohri. 2007. *Evaluation of foliage yield and leaf quality traits in Chenopodium spp. in multiyear trials.* Euphytica.1 (153):199–213.
- CONABIO (Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad). 2020. Quelites. En: <https://www.biodiversidad.gob.mx/diversidad/alimentos/quelites> (Consultado 22 de abril 2026).
- Corke, H., Y.Z.,Cai., H.X. Wu. 2016. *Amaranth: Overview. Encyclopedia of Food Grains (Second Edition).* 1(1):287-296 <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100596-5.00032-9>
- Cuevas-Bernardino, J.C., J.Aguayo-Rojas., E.C.López-Vidaña., T. Ayora-Talavera., N. Pacheco. 2022. *Las plantas en nuestra alimentación diaria.*pp:17-32. En: Las plantas en la ciencia y nuestra vida: inspírate, anímate y descúbrelas. Centro de Investigación y Asistencia en Tecnología y Diseño del Estado de Jalisco AC. pp:159.
- DGSIAP,(Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural Coordinación General de Información, Inteligencia y Evaluación Dirección General del Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera).2025.Panorama Agroalimentario. Secretaria de Agricultura Ciudad de México, pp:211.
- Elsohaimy, S. A., T.M., Refaay., M.A.M., Zaytoun. 2015. *Physicochemical and functional properties of quinoa protein isolate.* Annals of Agricultural Sciences, 60(2), 297–305. <https://doi.org/10.1016/j.aos.2015.10.007>
- FAO (Organización de las Naciones Unidad para la Alimentación y la Agricultura).2013. *El estado de la inseguridad alimentaria en el mundo 2013.* El crecimiento económico es necesario pero no suficiente para acelerar la reducción del hambre y la malnutrición Roma: FAO, 2013. Disponible en: <http://www.fao.org/docrep/019/i3434s/i3434s00.htm>.Consultado:5 de junio de 2026.
- Figueredo-Urbina, C.J., G.D. Álvarez-Ríos., Z.L. Cortés. 2022. *Edible flowers commercialized in local markets of Pachuca de Soto, Hidalgo, Mexico.* Botanical Sciences 100(1): 120-138. <https://doi.org/10.17129/botsci.2831>



- Heiser, C. B., D. C. Nelson. 1974 *On the origin of the cultivated chenopods (Chenopodium)*. *Genetics* 78 (1): 503-505. <https://doi.org/10.1093/genetics/78.1.503>
- Hernández-Andrade, E. E., F.C. Gómez-Merino., V.M. Ordaz-Chaparro., M.G. Peralta-Sánchez., L.I. Trejo Téllez. 2025. *Sodium Chloride in the Germination and Initial Growth of Three Huauzontle (Chenopodium berlandieri subsp. nuttalliae) Cultivars*. *Agro Productividad*.18 (1): 1-9 <https://doi.org/10.32854/agrop.v18i1.3208>
- Hernández-Andrade, E. E., C.O.Montoya-García., F.C Gómez-Merino., L.I. Trejo-Téllez. 2026. *Salinity Tolerance, Plant Growth, and Nutrient Partitioning in Three Mexican Huauzontle (Chenopodium berlandieri subsp. nuttalliae) Genotypes Under NaCl Stress*. *Crops*, 6(43):1-22. <https://doi.org/10.3390/crops6020043>
- Hernández-Marín, C. R., P. C. Guadarrama-Mendoza., R. Valadez-Blanco., B.R. Chen., L. Diosady.2019. Alkaline Extraction and Purification of Huauzontle (*Chenopodium berlandieri* subsp. *Nuttalliae*) Seed Proteins by Ultrafiltration Membranes. In 2019 IEEE International Conference on Applied Science and Advanced Technology (iCASAT) (pp. 1-6). IEEE
- Lazo-Vélez, M. A., Guajardo-Flores, D., Mata-Ramírez, D., Gutiérrez-Urbe, J. A., & Serna-Saldivar, S. O. (2016). Characterization and Quantitation of Triterpenoid Saponins in Raw and Sprouted *Chenopodium berlandieri* spp. (Huauzontle) Grains Subjected to Germination with or without Selenium Stress Conditions. *Journal of Food Science*, 81(1), C19–C26. <https://doi.org/10.1111/1750-3841.13174>
- López-Monterrubio, D.I., C. Lobato-Calleros., J. Alvarez-Ramirez., E.J. Vernon-Carter. 2020. *Huauzontle (Chenopodium nuttalliae Saff.) protein: composition, structure, physicochemical and functional properties*. *Food Hydrocolloids*. 1(108): 1-12. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2020.106043>
- López-Monterrubio, D.I., C .Lobato-Calleros., E.J. Vernon-Carter., J. Alvarez-Ramirez . 2023. *In vitro digestibility and physicochemical properties of Huauzontle (Chenopodium nuttalliae) starch*. *Starch-Staerke* 5 (75):1-15 <https://doi.org/10.1002/star.202200206>
- López-Ramírez, I., M. Pérez-Salas., O. Clemente-Herrera., M. A. Vásquez-Dávila., D. López-Luis., A. Melchor-García. 2016. *Calidad de huevos de gallinas criollas alimentadas con plantas silvestres (quelites) en Oaxaca, México*. *Memorias del V Congreso Nacional sobre Conservación y Utilización de los Recursos Zoogenéticos* (pp. 78-80). *Revista Mexicana de Agroecosistemas*. Conkal, Yucatán, México.

- Marquez-Nuñez, L. F., L.Santiago-López., M. del C. Estrada-Montoya., A. González-Córdova., B. Vallejo-Cordoba., G. Ramos-Clamont., A. Hernández-Mendoza. 2025. *Potencial actividad prebiótica de la inflorescencia del huauzontle (Chenopodium berlandieri subsp. nuttalliae, Amaranthaceae).* Acta Botánica Mexicana, 1(132):1-10. <https://doi.org/10.21829/abm132.2025.2423>
- Mir, N. A., C. S., Riar., S. Singh. 2018. *Nutritional constituents of pseudo cereals and their potential use in food systems: A review.* In Trends in Food Science and Technology. 1(175):170-180. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2018.03.016>
- Morales de L., J. H, Bourges., N. Vázquez. 2013. *La composición nutrimental de los quelites.* Cuadernos de Nutrición, 36(1), 26-30.
- Mukuwapasi, B., S. Mavengahama., A.S. Gerrano. 2024. *Grain amaranth: A versatile untapped climate-smart crop for enhancing food and nutritional security.* Discover Agriculture. 44 (2):1-17. <https://doi.org/10.1007/s44279-024-00057-8>
- Nemecek, T., N. Jungbluth., L. I. Canals., R. Schenck. 2016. *Environmental impacts of food consumption and nutrition: where are we and what is next?* Int J Life Cycle Assessment. 1(21):607–620. <https://doi.org/10.1007/s11367-016-1071-3>
- Prakash, D., P. Nath., M. Pal. 1993. *Composition, variation of nutritional contents inleaves, seed protein, fat and fatty acid profile of Chenopodium species.* Journal of the Science of Food and Agriculture. 2 (62): 203–205.
- Quevedo-Bolívar, P. A. 2019. *La desnutrición: más allá de las deficiencias nutricionales.* Trabajo social, 21 (1):219-239.
- Román-Cortés, N.R., M.R. García-Mateos., A.M. Castillo-González., J. Sahagún-Castellanos., M.A. Jiménez-Arellanes. 2018. *Características nutricionales y nutraceuticas de hortalizas de uso ancestral en México.* Revista Fitotecnia Mexicana 41(3): 245-253. <https://doi.org/10.35196/rfm.2018.3.245-253>
- Sahagún, Fray B. 1979. *Historia general de las cosas de Nueva España (Códice florentino), 1577.* Disponible en el Códice Florentino Digital/Digital Florentine Codex, editado por Kim N. Richter, Alicia Maria Houtrouw, Kevin Terraciano, Jeanette Favrot Peterson, Diana Magaloni y Lisa Sousa, lib. 11, fol. 134r-138 v. Getty Research Institute, 2023. <https://florentinecodex.getty.edu/es/book/11/folio/ir> (Consultado el 26 abril 2026)



- Sánchez-Villa, C. E., R. Zepeda-Bautista., M.E. Ramírez-Ortiz., L.J. Corzo-Ríos. 2020. *Nixtamalized tortillas supplemented with proteins isolated from Phaseolus coccineus and huauzontle (Chenopodium berlandieri subsp. Nuttalliae) flour: Rheological, textural, and sensorial properties*. International Journal of Gastronomy and Food Science, 1 (22):1-7. <https://doi.org/10.1016/j.ijgfs.2020.100274>
- Santiago-López, L., S.H. García., A.F.González-Córdova., B. Vallejo-Cordoba., A. Hernández-Mendoza. 2023. *Propiedades antioxidantes y antiinflamatorias de huauzontle (Chenopodium berlandieri subsp. nuttalliae, Chenopodiaceae) fermentado por Lactiplantibacillus plantarum Lp22*. Acta Botanica Mexicana.130 (1): 1-11. <https://doi.org/10.21829/abm130.2023.2161>
- Shelef, O., P. Weisberg., J., F.D. Provenza. 2017. *The Value of Native Plants and Local Production in an Era of Global Agriculture*. Frontiers in plant science, 1 (8): 1-15. <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.02069>
- SIAP (Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera). 2024. *Anuario estadístico de la producción agrícola*. 2023. (Recuperado: septiembre 2025) at: nube.siap.gob.mx/cierreagriola
- Thakur, P., K. Kumar., H.S. Dhaliwal. 2021. *Nutritional facts, bio-active components and processing aspects of pseudocereals: A comprehensive review*. In Food Bioscience 1 (42):1-13. <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2021.101170>
- Ulian, T., H.W. Pritchard., A. Casas., E. Mattana., L. Udayangani.,E. Castillo-Lorenzo.,M. Way.,P.Dávila., R. Lira. 2021. *Neglected and underutilized species of Mexico*. pp:118-127. In P. Stefano, I. O. King, D. Hunter, M. S. Swaminathan, & R. S. (Eds.), Orphan crops for sustainable food and nutrition security. Routledge.New York. pp:471
- Vázquez-Covarrubias, D. A., A. Jiménez-Pérez., F. Castrejón-Ayala., R. Figueroa-Brito., R. Montes-Belmont. 2015. *Effects of five species of chenopodiaceae on the development and reproductive potential of Copitarsia decolora (Lepidoptera: Noctuidae)*. Florida Entomologist, 1(98):80-85 <https://doi.org/10.1653/024.098.0114>
- Wossen, T.,T. Berger., M.G. Haile., C. Troost. 2018. *Impacts of climate variability and food price volatility on household income and food security of farm households in east and west Africa*. Agricultural Systems,1(163): 7-15
- Xingú-López, A., A. Balbuena-Melgarejo., A. Laguna-Cerda., L. Iglesias-Andréu., V. Olivares-Cruz., E.de la Cruz-Torres. 2018. *Caracterización de huauzontle(Chenopodium berlandieri spp nuttalliae) del Estado de México mediante microsatélites*. Ciencia y Tecnología

Cita

Hernández-Andrade, E.E., L.I. Trejo-Téllez y Y.L. Fernández-Pavía. Huazontle: valor cultura, nutricional y agroecológico en México. Recursos Naturales y Sociedad, 2026. Vol. 12(1): 301-317. <https://doi.org/10.18846/renaysoc.2026.12.12.01.0019>.

Sometido: 15 de agosto de 2025

Aceptado: 22 de junio de 2026

Editora asociada: Dra. Crisalejandra Rivera Pérez.

Editora ejecutiva: Dr. Crisalejandra Rivera Pérez

Diseño gráfico editorial: Ing. Fca. Elizabeth Villegas Carrasco

Industrialization of the Ocean:
Innovation and Technology in Cages for Marine Farming

La industrialización del Océano: Innovación y Tecnología en jaulas para cultivos marinos

Carlos Humberto Hernández-López¹,
Christian Eduardo Guzmán-Román¹, Juan Antonio Hernández-Yau²

Resumen

La creciente demanda mundial de proteína de origen acuático ha impulsado la expansión de la maricultura en jaulas, posicionándola como una de las principales fuentes de producción alimentaria, nutrición, generación de empleos y desarrollo económico. En este contexto, la industrialización de los océanos emerge como un concepto clave para el desarrollo de estos sistemas de producción de pescados y mariscos, que se caracteriza por el uso de tecnologías avanzadas en sistemas de jaulas flotantes. Estas estructuras han evolucionado desde sistemas simples contruidos con materiales sencillos hasta plataformas altamente tecnificadas que integran sensores, automatización, inteligencia artificial y monitorización en tiempo real con alertas tempranas visibles en dispositivos móviles o plataformas de control electrónico. Este artículo aborda el desarrollo tecnológico de las jaulas flotantes y sus variedades actualizadas, su papel en la producción de pescados y mariscos, destacando innovaciones recientes en sistemas de jaulas sumergibles, maricultura de precisión e integración de componentes digitales. Se concluye que la industrialización tecnológica del océano puede contribuir a la producción acuícola, siempre que se implemente bajo criterios de selección de sitios, monitorización ambiental, gobernanza, normatividad, trazabilidad, esquemas de bioseguridad y responsabilidad social.

Palabras clave: Maricultura, jaulas, tecnología, innovación, alimento marino.

¹TecNM / Instituto Tecnológico de Mazatlán. Corsario 1, 203 Urías, CP 82'7'. Mazatlán, Sinaloa, México.

²Global Fish y Acuicultura. Mazatlán, Sinaloa, México.

* Autor de correspondencia: carlos.hl@mazatlan.tecnm.mx



Abstract

The growing global demand for aquatic protein has driven the expansion of cage aquaculture, positioning it as one of the main sources of food production, nutrition, job creation and economic development. In this context, the industrialization of the oceans emerges as a key concept for the development of these fish and seafood production systems, which are characterized by the use of advanced technologies in floating cage systems. These structures have evolved from simple systems built with basic materials to highly sophisticated platforms that integrate sensors, automation, artificial intelligence, and real-time monitoring with early warnings displayed on your cell phone or computer. This article addresses the technological development of floating cages and their role in fish and seafood production, highlighting recent innovations in submersible cage systems, precision aquaculture, and the integration of digital components. It is concluded that the technological industrialization of the ocean can contribute to aquaculture production, provided that it is implemented under criteria of site selection, environmental monitoring, governance, regulations, traceability, biosecurity schemes and social responsibility.

Keywords: Mariculture, cages aquaculture, technology, innovation, seafood.

Antecedentes

La acuicultura y pesca siguen siendo fuentes importantes de alimento, nutrición, ingresos y medios de vida para millones de personas en todo el mundo (Vázquez-Olivares, 2023). El consumo per cápita de pescado, es decir, la cantidad promedio de pescado que consume una sola persona en un tiempo determinado ha aumentado a 20.7 kg en 2024, gracias a un intenso crecimiento de la acuicultura, que en la actualidad proporciona cerca del 51% de todo el pescado destinado al consumo humano (FAO, 2024). Esto indica que la producción de organismos acuáticos ha dejado de basarse solo en las actividades de captura y la acuicultura sigue siendo el sector de producción de alimentos con mayor crecimiento que cualquier otro sector. Desde una perspectiva social y económica, la acuicultura tradicional ha mejorado las economías locales y regionales, convirtiéndose en un motor para la generación de autoempleos directos e indirectos especialmente en comunidades rurales, así como ha ofrecido alimento que contribuye significativamente a la mitigación de la pobreza, la seguridad alimentaria y la nutrición (FAO, 2026).

Sin embargo, en la acuicultura tradicional se han venido presentando inconvenientes que limitan su crecimiento, algunos de los principales son; i) limitados terrenos adecuados para desarrollar la acuicultura, ii) la calidad y cantidad de agua necesaria para la operación de las granjas acuícolas, iii) aumento de los costos de energía eléctrica o en casos no existe infraestructura eléctrica para operar y iv) aumento de los alimentos. Por lo anterior, los esfuerzos de investigación y desarrollo tecnológico deben de buscar nuevas alternativas de producción acuícolas, además, se agrega el crecimiento de la población global y la creciente demanda de proteína acuática, las cuales han impulsado el desarrollo de la acuicultura moderna conocida como maricultura en jaulas, como una de las principales fuentes de producción alimentaria actual (FAO, 2024). La maricultura en jaulas flotantes se ha consolidado como una nueva tecnología para aprovechar los espacios oceánicos sin depender exclusivamente de los sistemas tradicionales en tierra. En ese sentido, una jaula marina funciona como una estructura flotante instalado en el mar, diseñada para mantener peces cultivados en condiciones naturales.

Este sistema de producción no solo permite utilizar grandes espacios oceánicos con alta renovación de agua y condiciones ambientales relativamente favorables, lo cual reduce las limitaciones asociadas a sistemas de producción tradicional, sino que también pueden operar en ambientes expuestos o zonas offshore, lo cual amplía las áreas potenciales de cultivo. La expansión de este tipo de sistemas de producción ha sido notable, se estima que la producción mundial de cultivos en jaulas superó los 36 millones de toneladas en 2024, con un crecimiento estimado del 9% respecto al 2023, impulsado principalmente por el aumento de las instalaciones offshore, considerando también que cerca del 60% de las jaulas instaladas en el mundo se concentran en la región asiática (Market Growth Reports, 2026). A nivel mundial, los países líderes en el desarrollo tecnológico y productivo de la maricultura en jaulas son: China, Noruega, Chile, Japón, Escocia, Australia, Grecia y España (Industry Research, 2024).

Por su parte, en México se han realizado los primeros cultivos pilotos comerciales de especies con jaulas marinas como el pargo flamenco (*Lutjanus guttatus*) (Hernández-López *et al.*, 2016) donde se cosecharon 13 toneladas con peso final promedio de 450 g, la cobia (*Rachycentron canadum*), curvina (*Sciaenops ocellatus*) y pargo canane (*Ocyurus crysurus*) (Vázquez-Olivares, 2023). De manera comercial se están realizando cultivos en jaulas con camarón blanco (*Litopenaeus vannamei*), totoaba (*totoaba macdonaldi*) (Cáceres *et al.*, 2023) atún (IMIPAS, 2018) y tilapia spp sobre todo en el Estado de Chiapas y Oaxaca (Antonio *et al.*, 2023).



Respecto a los sistemas de monitorización y automatización de la alimentación, su uso se ha extendido principalmente para las granjas de camarón en sistemas tradicionales de cultivo; su implementación aún es limitada debido a que los costos de inversión inicial representan una barrera económica crítica para productores sobre todo de pequeña y mediana escala. A este factor financiero se suman una alta resistencia al cambio, falta de estructuras de políticas de apoyo y financiamientos adecuados; lo anterior ocurre de manera paradójica, aún cuando está demostrado que estas innovaciones mejoran rendimientos y generaran bienestar socioeconómico en el sector (Monsivais-Neira y León Balderrama, 2026). En el Instituto Tecnológico de Mazatlán, particularmente en la carrera de ingeniería en pesquerías y bajo un equipo liderado por el primer autor de este documento, se han desarrollado trabajos a escala experimental sobre automatización de alimentadores (bajo patente), sistemas inteligentes de monitorización con alertas en tiempo real, uso de videocámaras para conocer niveles de estrés en peces y estimaciones de biomasa. Si bien estos proyectos se han probado a escala experimental y escala piloto comercial en tanques de cultivo, el objetivo final es su implementación en jaulas flotantes, inicialmente contemplando la tilapia.

Bajo este nuevo esquema global, surge un paradigma, si bien no es nuevo, la revolución lo lleva a la industrialización de los océanos, caracterizada por la incorporación de tecnologías avanzadas, automatización, precisión, sistemas de monitorización en tiempo real que han transformado a las jaulas flotantes en verdaderas plataformas productivas altamente rentables y tecnificadas. Este proceso ha ido evolucionando progresivamente en los océanos, caracterizado por la implementación de sistemas automatizados de alimentación, sensores ambientales, monitoreo remoto y visión e inteligencia artificial. Bajo este escenario, los sistemas de jaulas flotantes han evolucionado pasando desde simples jaulas flotantes a verdaderas plataformas de producción altamente tecnificadas y rentables durante todo el año, considerando la oferta permanente de recursos acuáticos.

Maricultura en jaulas

¿Qué se entiende por maricultura en jaulas y por qué se ha convertido en una de las estrategias más prometedoras para la producción acuícola moderna global?

La maricultura en jaulas es un término traducido del inglés (Cage aquaculture), se refiere a un sistema de cultivo acuícola que consiste en el confinamiento controlado de organismos marinos como peces y crustáceos dentro de un bolso contenedor, que se suspende de una estructura

flotante o sumergible instalada en ambientes naturales como mares, bahías, presas o lagunas costeras. Las jaulas permiten el aprovechamiento de las condiciones naturales del sitio de cultivo tales como las corrientes de agua, la disponibilidad de oxígeno, temperatura y salinidad entre otras; lo cual mantiene condiciones naturales adecuadas para el crecimiento de los organismos cultivados (Hernández-López, 2016).

Este sistema representa, además, la secuencia lógica de la evolución de la producción acuícola tradicional en tierra. Debido a las restricciones de espacio para el desarrollo acuícola tradicional y el aumento de los productos acuícolas, los sistemas de producción emigraron hacia el mar. En este nuevo entorno, el cultivo se desarrolla de manera más natural para los organismos en cultivo, favoreciendo condiciones ambientales más cercanas a su hábitat original, lo que favorece su crecimiento (Vázquez-Olivares, 2023).

Modelos y componentes de las jaulas flotantes para cultivos

En el caso de jaulas flotantes para el cultivo de peces, se utilizan generalmente jaulas con una gran variedad de formas: cuadradas, rectangulares y circulares, siendo estas últimas las de mayor uso (Hernández-López, 2016). Los diferentes tipos de jaulas flotantes pueden ser construidos de diversas formas y tamaños, sin embargo, en términos generales presentan los componentes siguientes (Ver Figura 1).

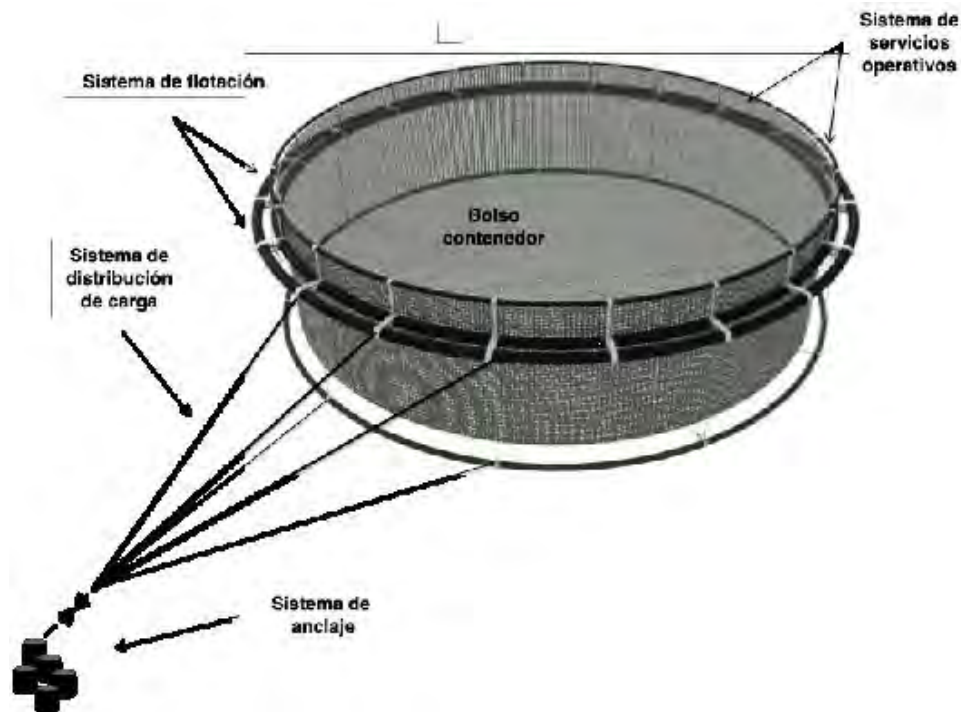


Figura 1. Componentes principales de una jaula flotante para cultivos marinos y dulceacuícolas.



Evolución de las jaulas flotantes

Los registros de las primeras jaulas marinas eran estructuras con diseños elementales iniciadas en Asia, sin embargo, las características y propósitos difieren de los actuales. Particularmente estos primeros sistemas de jaulas tenían el propósito de mantener peces para el mercadeo o carnada para la captura de otros recursos. Sin embargo, en las últimas décadas han evolucionado hacia sistemas más robustos, capaces de operar en mar abierto, donde las condiciones ambientales son más exigentes.

Actualmente, las jaulas marinas han evolucionado hacia sistemas mucho más complejos:

- i. Estructuras de polietileno de alta densidad (HDPE)
- ii. Jaulas sumergibles o semisumergibles
- iii. Sistemas diseñados para operar en zonas offshore
- iv. Estructuras capaces de resistir oleaje fuerte y corrientes intensas
- v. Jaulas inteligentes

Esta evolución ha permitido trasladar la producción hacia áreas más abiertas del océano, donde la mayor circulación de agua mejora las condiciones ambientales y reduce algunos impactos locales (Hernández-López, 2016; Vázquez-Olivares, 2023).

Evolución en el diseño de jaulas para cultivos acuáticos

La innovación estructural es otro componente clave de la industrialización de la maricultura en jaulas. Entre las tecnologías emergentes destacan:

Jaulas offshore (Ver Figura 2).

Diseñadas para operar en alta mar, lejos de zonas costeras sensibles. Desde el punto de vista de ingeniería, las jaulas offshore son sistemas de jaulas con alta ingeniería, las cuales han migrado hacia zonas del mar más lejanas y más expuestas a las condiciones ambientales marinas.

Ventajas:

- a. Mayor renovación de agua
- b. Menor acumulación de residuos
- c. Mayor disponibilidad de espacio y libre de interferencia con actividades como pesca y recreación acuática.

Jaulas sumergibles (Ver Figura 3).

Estas jaulas pueden descender varios metros bajo la superficie para:

- Evitar tormentas
- Reducir el impacto del oleaje
- Disminuir la interacción con depredadores y parásitos
- Jaulas oceánicas “generalmente para cultivo de salmón”.

Mega estructuras acuícolas (Ver Figuras 4 y 5).

En algunos países se están desarrollando plataformas de gran escala que integran:

- Producción de peces (salmón)
- Uso de IA
- Sistemas energéticos
- Centros de control automatizado.

Estas estructuras funcionan como verdaderas instalaciones industriales flotantes. La figura 4 presenta la jaula Shenlan 2 para el cultivo de salmón, impulsada por IA de 700 millones de dólares y puede llegar a cosechar hasta 1 millón de salmones. La figura 5 presenta un nuevo concepto de jaula semicerrada flotante y/o fija con forma de huevo, con 1,800 m³ de volumen de cultivo, 21 m de altura y 15 m de diámetro.



Figura 2. Jaula flotante de HDPE para cultivos marinos en zonas de alta mar. Tomada de STARAQ.

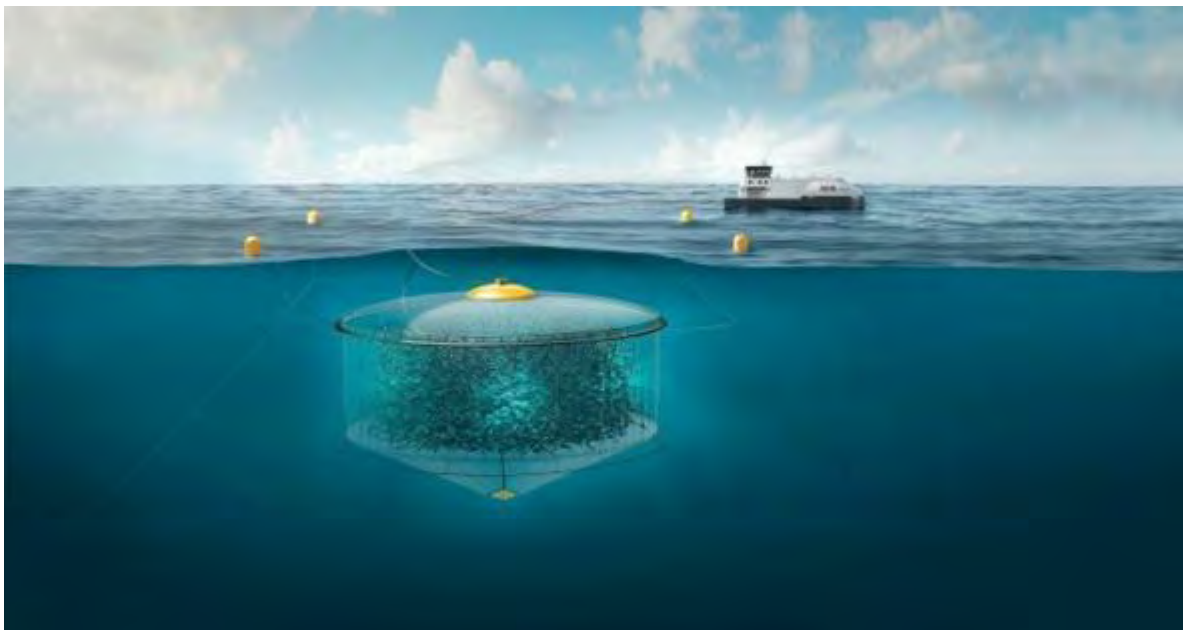


Figura 3. Jaula sumergible de Atlantis Subsea Farming. Tomada de salmonexpert.cl



Figura 4. Jaula de cultivo inteligente de salmón a gran escala para aguas profundas. Dimensiones: altura de 71.5 m, diámetro de 70 m, volumen de 90,000 m³. Tomada de infosalmon.cl

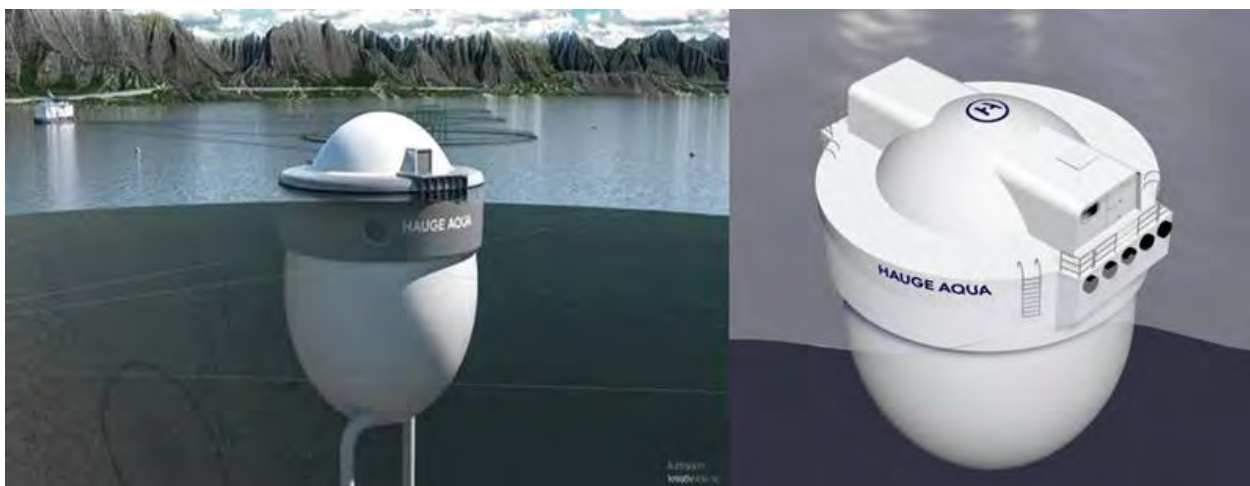


Figura 5. Jaula semicerrada para el cultivo de salmón. Tomada de salmonexpert.cl

Integración de la maricultura en jaulas con tecnologías digitales

El futuro de la maricultura en jaulas se orienta hacia sistemas altamente conectados, incluso no tripulados.

Los sistemas de jaulas modernas comienzan a incorporar:

- Internet de las cosas (IoT)
- Análisis de big data
- Inteligencia Artificial (IA)
- Drones y vehículos submarinos no tripulados.



Estas tecnologías permiten desarrollar sistemas de acuicultura inteligente, donde el manejo se basa en datos continuos y modelos predictivos. Pero, ¿Qué aporta la tecnología para una mejor producción de alimento de origen acuícola?:

Internet de las cosas (IoT):

Sistemas inteligentes de monitorización y control de peces, los cuales están equipados con diversos dispositivos IoT (Internet de las Cosas), interconectados de manera digital para permitir la recopilación de datos operativos en tiempo real (Wen-Tsai *et al.*, 2023). De esta forma se pueden monitorizar, evaluar y ajustar las condiciones operaciones del cultivo (FAO, 2020; Min-Chie *et al.*, 2022).

Análisis de big data

Esta parte de la tecnología permite recopilar y analizar grandes volúmenes de información en tiempo real como la temperatura, salinidad, oxígeno, crecimiento y alimentación. Esto ayuda a tomar decisiones más precisas, optimizar la producción y anticipar fallas críticas en el sistema de producción.

Inteligencia Artificial (IA)

Sistemas inteligentes de gestión para cultivos en jaulas, la información de las operaciones de cultivo en el mar transmite a una plataforma previamente seleccionada, todos los datos recopilados y los análisis como resultados pueden ser aplicados, como un ejemplo se considera la alimentación automatizada utilizando análisis biológico subacuático (Chung-Cheng *et al.*, 2021). Estos sistemas inteligentes permiten a los acuicultores reducir de manera importante los gastos y residuos derivados de la alimentación, además pueden controlar el crecimiento y sobrevivencia de los peces que se están cultivando.

Drones y vehículos submarinos

Se les conoce como ROV (Vehículo Operado Remotamente) que se controla a distancia desde un centro de mando. Estos dispositivos se han vuelto herramientas de ingeniería para la gestión y operación de los sistemas de cultivos en jaulas (Katsidoniotaki *et al.*, 2025); facilitan la inspección submarina de jaulas, monitorean el comportamiento de los peces, detectan daños en las estructuras y reducen riesgos de buzos en operaciones de profundidad.

Consideraciones finales y perspectivas

La producción de pescado ha dado un salto tecnológico sin precedente. Hoy, las jaulas marinas están conectadas a sistemas inteligentes que integran sensores IoT, ROV (vehículos submarinos), drones y plataformas flotantes con el objetivo de monitorear en tiempo real las condiciones operativas del cultivo. Desde un centro de control en tierra, el uso de big data e inteligencia artificial permiten optimizar la alimentación, anticipar riesgos y maximizar la producción (Ver Figura 6).



Figura 6. Maricultura en jaulas inteligentes: como el pescado nace en un mar digital. Imagen creada por IA con instrucciones de los autores.

Este modelo de sistemas de producción de alimentos marinos representa mucho más que innovación; es la industrialización del océano. Estamos viviendo una nueva era donde la tecnología redefine la forma de producir alimentos, llevando la maricultura en jaulas hacia sistemas automatizados, pero sobre todo capaces de alimentar a una población creciente. No obstante, la operación de estos sistemas de producción exige la sustitución de gestiones análogas para dar paso a la acuicultura inteligente (An-Qi *et al.*, 2025). Respecto a la seguridad alimentaria, el escalamiento de esta tecnología se consolida como un motor clave para la producción de proteína de origen marino, sin embargo, la implementación de estas tecnologías debe alinearse de manera estricta a los esquemas de regulaciones internacionales para mitigar posibles impactos ambientales acumulados, garantizando que la producción acuícola mantenga niveles de responsabilidad técnica y biológica en favor de la salud de los océanos, asegurando que la eficiencia técnica no comprometa la sustentabilidad biológica de los océanos.



Agradecimientos

Los autores agradecen al Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico de Mazatlán por las facilidades brindadas para la elaboración de este artículo.

Literatura citada

- An-Qi, W., Ke-Lei, L., Canción, Y., Xihua, L., Ping, F., Weijun, Y., y Rui-Feng, W. 2025. Deep Learning for Sustainable Aquaculture: Opportunities and Changes. *Sustainability*, 17(11), 5084. <https://doi.org/10.3390/su17115084>
- Antonio, C., Martínez, C., Sánchez, H., Sánchez, M., y García, I. 2023. Características distintivas del cultivo de tilapia del Nilo (*Oreochromis niloticus*) en la región del Papaloapan, Oaxaca, México. *Revista IPSUMTEC*, 6(5), 68-78. <https://doi.org/10.61117/ipsumtec.v6i5.220>
- Cáceres, J., Sánchez, S., y Vásques, R. Buenas prácticas de cultivo de *Totoaba macdonaldi* y Plan de Manejo Sanitario. 2023. Universidad Autónoma de Baja California. 146 pp.
- Chung-Chen, C., Jung-Hua, W., Jenq-Lang, W., Yi-Zeng, H., Tzong-Dar, W., Shyi-Chy, C., Chin-Chun, J., Jih-Gua, J., Chyng-Hwa, L., Te-Hua, H., Yii-Shing H., Cheng-Ting, H., Chen-Chou, L., Yan-Tsung, P., Ren-Jie, H., Jia-Yao, J., Yen-Hsiang, L., y Chin-Yang, L. 2021. *Applying artificial intelligence (AI) techniques to implement a practical smart cage aquaculture management system*. *Journal of Medical and Biological Engineering* 41: 652-658.
- FAO. 2026. Versión resumida de El estado mundial de la pesca y acuicultura 2026. Trnasformación azul: de la visión a la repercusión. Roma. <https://doi.org/10.4060/cd9841es>
- FAO. 2024. In Brief to The State of World Fisheries and Aquaculture 2024. Blue Transformation in action. Rome. <https://doi.org/10.4060/cd0690en>
- FAO. 2020. El estado mundial de la pesca y la acuicultura 2020. La sostenibilidad en acción. Roma. <https://doi.org/10.4060/ca9229es>.
- Hernández-López, C. H. 2016. *Estudio de factibilidad técnica y económica del cultivo piloto comercial de pargo *Lutjanus guttatus* en dos sistemas de jaulas flotantes*. Doctorado. Universidad Autónoma de Sinaloa, México. 135 p.

- Hernández-López, C.H., Hernández, C., Martínez- Cordero, F., Castañeda-Lomas, N., Rodríguez, G., Albert, J., y Aragón E. 2016. Effect of density at harvest on the growth performance and profitability of hatchery-reared Spotted rose Snapper (*Lutjanus guttatus*) cultured in floating net cages. Journal of the World Aquaculture Society, 47 (1): 51-60. <https://dx.doi.org/10.1111/jwas.12253>
- IMIPAS. 2018. Instituto Mexicano de Investigación en Pesca y Acuicultura Sustentable. Acuicultura, Jaula o corral para atún. www.gob.mx/imipas/acciones-y-programas/acuicultura-jaula-o-corral-para-atun (consultado el 11/06/2026).
- Katsidoniotaki, E., Biao, S., Kelasidi, E., y Themistoklis, P. 2025. Multifidelity digital twin for real-time, monitoring of structural dynamics in aquaculture net cages. Scientific reports 15, 44281. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-27812-1>
- Market Growth Reports. 2026. Aquaculture Cage Market Size, Share, Growth, and Industry Analysis, By Type (Mariculture, Coastal Aquaculture, Freshwater Aquaculture, By Application (Fish, Molluscs, Crustacean, Others), Regional Insights and Forecast to 2035. <https://www.marketgrowthreports.com/market-reports/aquaculture-cages-market-104954> (consultado el 01/04/2026).
- Min-Chie, C., Wei-Mon, Y., Showkat, B., y Nen-Fu, H. 2022. *Development of smart aquaculture farm management system using IoT and AI-based surrogate models*. Journal of Agriculture and Food Research 9: 100357.
- Monsivais-Neira, Y., y León Balderrama, J. 2026. Adopción de tecnologías acuícolas sostenibles: una revisión sistemática. *EPISTEMUS*, 20, e2012469. <https://doi.org/10.36790/v20.469>
- Industry Research. 2024. Global Aquaculture Cages Market Report. <https://www.industryresearch.biz/market-reports/aquaculture-cages-market-100241> (consultado el 01/04/2026).
- Vázquez-Olivares, A. 2023. Tecnología para la maricultura. Diseño y cálculos de jaulas flotantes para cultivos marinos y dulceacuícolas. Tecnológico Nacional de México. Instituto Tecnológico de Mazatlán. Reporte de año sabático. 204 p.
- Wen-Tsai, S., Indra, I., y Sung-Jung, H. 2023. *An IoT-Based Aquaculture Monitoring System Using Firebase*. Computer, Materials and Continua 76 (2): 2179-2200.



Datos de los autores

- **Carlos Humberto Hernández López**, doctor en ciencias en recursos acuáticos, miembro del Sistema Nacional de Investigadores, carlos.hl@mazatlan.tecnm.mx profesor del TecNM / Mazatlán. Especialidad de Tecnología para la maricultura. Experiencia en Países como Chile, Perú, Cuba y México.
- **Christian Eduardo Guzmán Román**, es maestro en ingeniería en mecatrónica, profesor de tiempo completo en el TecNM / Instituto Tecnológico de Mazatlán, adscrito al departamento de electrónica y cuenta con una especialidad en mecatrónica. christian.gr@mazatlan.tecnm.mx
- **Juan Antonio Hernández Yau**, Ingeniero en pesquerías por el Instituto Tecnológico de Mazatlán. Especialistas en operaciones de jaulas en México y diseñador de jaulas para cultivos marinos y dulce acuícolas. hyau83@gmail.com

Cita

Hernández-López, C.H., C. E. Guzmán-Román y J. A. Hernández-Yau. La industrialización del Océano: Innovación y Tecnología en jaulas para cultivos marinos. Recursos Naturales y Sociedad, 2026. Vol. 12(1): 319-332. <https://doi.org/10.18846/renaysoc.2026.12.12.01.0020>

Sometido: 7 de abril de 2026

Aceptado: 22 de junio de 2026

Editora asociada: Dra. Crisalejandra Rivera Pérez

Editora ejecutiva: Dr. Crisalejandra Rivera Pérez

Diseño gráfico editorial: Ing. Fca. Elizabeth Villegas Carrasco

Forest Management as an Effective Response to Environmental Degradation in the Maya Forest

El manejo forestal como respuesta eficaz a la degradación del ambiente en la Selva Maya

Mayra Vázquez-Luna¹, Wendy Deyanira Sánchez-Méndez², María Angelica Navarro-Martínez^{3*}

Resumen

La Selva Maya, una de las regiones selváticas más relevantes del continente americano, se enfrenta a un deterioro ambiental creciente debido a los cambios en el uso del suelo por actividades humanas que generan impactos significativos en el clima local y regional, con consecuencias directas tanto para los ecosistemas como para las poblaciones humanas que dependen de ellos. Frente a este escenario, existen estrategias que permiten a las comunidades locales beneficiarse del aprovechamiento forestal sin comprometer la integridad del ecosistema ni la conservación de sus especies. Un ejemplo destacado es el manejo forestal comunitario que, con el respaldo de políticas ambientales adecuadas, el apoyo de la sociedad, la participación de la comunidad científica y la cooperación de instituciones financieras a nivel nacional e internacional (incluyendo actores del sector privado y organizaciones no gubernamentales), se consolida como una herramienta viable y eficaz para reducir la deforestación y contribuir a la mitigación del cambio climático a escala regional.

Palabras clave: Bosque tropical, Cambio climático, Manejo forestal comunitario.

¹ El Colegio de la Frontera Sur (ECOSUR), Unidad Chetumal. Chetumal, Quintana Roo, México.
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2780-6410>. Correo: mayra.vazquez@guest.ecosur.mx.

² El Colegio de la Frontera Sur (ECOSUR), Unidad Chetumal. Chetumal, Quintana Roo, México.
ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-2689-087X>. Correo: wendy.sanchez@posgrado.ecosur.mx.

³ El Colegio de la Frontera Sur (ECOSUR), Unidad Chetumal. Chetumal, Quintana Roo, México.
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3603-5742>. Correo: manava@ecosur.mx.

* Autor de correspondencia: manava@ecosur.mx



Abstract

The Maya Forest, one of the most significant rainforest regions in the American continent, is facing increasing environmental degradation due to land-use changes driven by human activities, which generate substantial impacts on the local and regional climate, with direct consequences for both ecosystems and the human populations that depend on them. In response to this scenario, there are strategies that allow local communities to benefit from forest use without compromising the integrity of the ecosystem or the conservation of its species. A notable example is community-based forest management which, supported by appropriate environmental policies, societal backing, the participation of the scientific community, and the cooperation of national and international financial institutions (including private sector actors and non-governmental organizations), has been consolidated as a viable and effective tool to reduce deforestation and contribute to climate change mitigation at the regional scale.

Key words: Tropical Forest, Community Forest Management, Climatic change.

Antecedentes

1. La Selva Maya y su papel en el sistema climático

La Selva Maya (SM) es uno de los ecosistemas forestales más extensos y mejor conservados de Mesoamérica (Muñoz-López *et al.*, 2022). Se extiende desde el sur de México (en los estados de Campeche, Yucatán y Quintana Roo) hasta Centroamérica, abarcando territorios de Guatemala y Belice (Nahmad, 2000). Este vasto conjunto de selvas tropicales constituye una de las regiones forestales más importantes del continente, ya que alberga una extraordinaria diversidad de plantas y animales con un alto valor ecológico y económico para la región (Laako *et al.*, 2022). Más allá de su riqueza natural, la Selva Maya desempeña un papel fundamental para la vida y el bienestar humano, al proporcionar servicios ambientales esenciales que sostienen tanto a los ecosistemas como a las comunidades que dependen de ellos (Zamora-Crescencio *et al.*, 2024).

El cambio climático y las selvas tropicales mantienen una relación estrecha y de doble sentido: mientras que la deforestación y la quema de biomasa aceleran el calentamiento global al liberar grandes reservas de carbono (dos Anjos Xavier *et al.*, 2022) puede contrarrestar los beneficios del

secuestro de carbono, generando presiones negativas adicionales sobre los reservorios forestales a escala global (Sasidharan y Kavileveetil, 2022). A escala regional, el aumento del albedo en la selva tropical puede ayudar a reducir el calentamiento local gracias al enfriamiento evaporativo. Sin embargo, su efecto final depende de la interacción compleja entre el ciclo del agua y la composición de la atmósfera (Bonan, 2008) influyendo en la formación de nubes y en los flujos de energía que ayudan a regular la temperatura dentro del dosel forestal (Feng *et al.*, 2024).

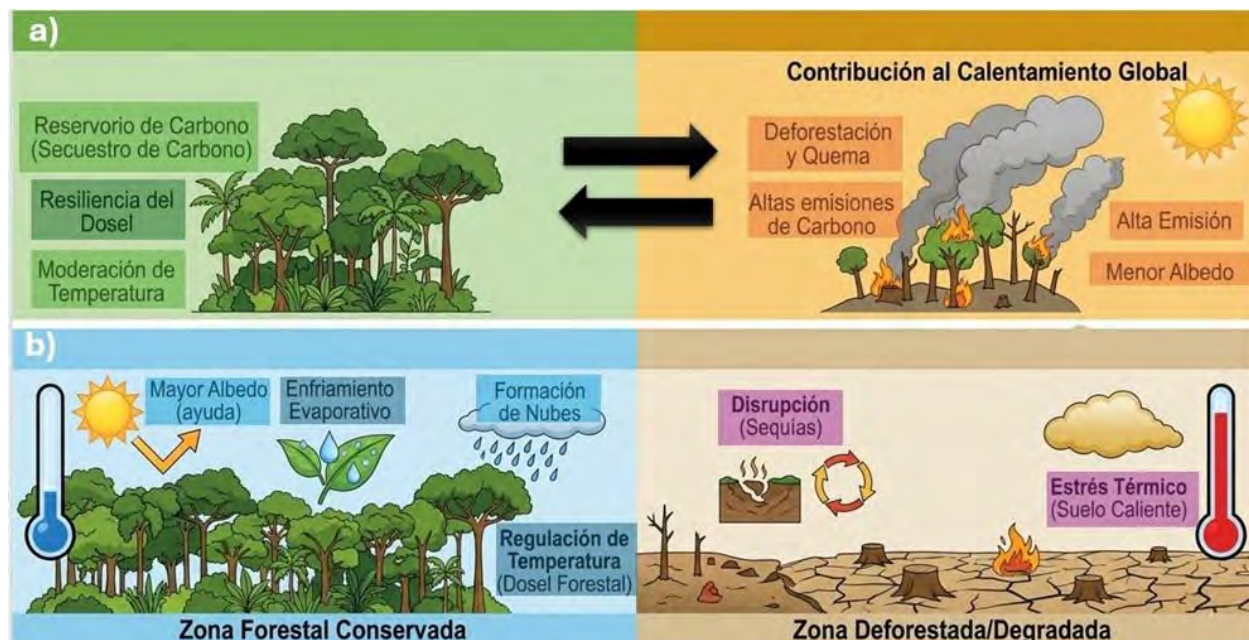


Figura 1. Relación selva-cambio climático a distintas escalas espaciales. a) Escala global: Mecanismos de regulación del sumidero de carbono y emisiones por quema de biomasa. b) Escala regional y local: comparación de los efectos del albedo, formación de nubes y estrés térmico entre zonas forestales conservadas y deforestadas. Imagen: Elaboración propia con ayuda de IA.

Uno de los principales aportes de la Selva Maya al sistema climático de la región es su capacidad para capturar y almacenar carbono en la vegetación y el suelo, un proceso fundamental para la regulación del clima regional (Campo *et al.*, 2016; Reyna *et al.*, 2022). A su vez, mediante la fotosíntesis, los árboles absorben dióxido de carbono de la atmósfera y lo convierten en biomasa, acción que permite disminuir la concentración de gases de efecto invernadero responsables del calentamiento global (Vargas-Mena A y Yáñez-Sandoval, 2004). Así que mientras que el bosque se mantiene en pie y conserva su integridad ecológica, el carbono almacenado no regresa a la atmósfera, y refuerza su papel clave en la mitigación del cambio climático (Esparza-Olguín y Martínez-Romero, 2021).

Además del almacenamiento de carbono, la Selva Maya, contribuye a la regulación del clima de la región tanto a escala local como regional, por su extensa cobertura (Ramírez-Martínez *et al.*, 2021).



Su densa vegetación influye en el control de la temperatura y la humedad; además de que, a través de la evapotranspiración, contribuye a la formación de nubes y con ello, a la llegada de la precipitación (Sánchez-Gutiérrez *et al.*, 2020). Estos procesos no solo benefician al ecosistema y a los organismos que habitan la selva, sino que también tienen efectos positivos en las actividades humanas, particularmente en la agricultura y el suministro de agua para consumo humano (Cortés-Gómez *et al.*, 2023). En la agricultura de temporal y la milpa maya, el efecto es directo en las comunidades locales, porque la siembra y producción de sus cultivos depende de la temporalidad de las lluvias.

2. Cambio climático y bosques tropicales: impactos y respuestas

Por un lado, los bosques influyen directamente en el clima del planeta; por otro, el clima determina la salud, estructura y funcionamiento de estos ecosistemas (Borma *et al.*, 2022). Las selvas tropicales, incluyendo la Selva Maya, son cruciales para la regulación climática global, al actuar como sumideros de carbono significativos y moderan los ciclos hidrológicos y biogeoquímicos (Artaxo *et al.*, 2022). Sin embargo, cuando los ecosistemas se deterioran o desaparecen a causa de la degradación y la deforestación, el carbono almacenado se libera nuevamente a la atmósfera (Jumbo-Salazar *et al.*, 2017), lo que incrementa la concentración de gases de efecto invernadero (Graciano-Ávila *et al.*, 2019).

El aumento de la temperatura y la disminución de las lluvias afectan directamente a las plantas y animales de la región (dos Anjos Xavier *et al.*, 2022), con el consecuente incremento de la temperatura y la reducción en la capacidad de almacenamiento de carbono en los bosques remanentes; así como la falta de regeneración, ya que el aumento térmico y las condiciones de sequía intensifican la mortalidad de los nuevos individuos y contrarrestan el efecto fertilizante del CO₂ atmosférico (George-Chacón *et al.*, 2023). Situación que puede modificar la distribución potencial de las especies, forzando su desplazamiento hacia elevaciones mayores y reduciendo la superficie de su hábitat (Santos-Hernández *et al.*, 2021). Además, se prevé que, de mantenerse estas condiciones, se registrará un deterioro de la salud forestal, en diversas regiones del mundo, a lo largo del siglo XXI (Estrada-Contreras *et al.*, 2016).

Asimismo, un clima más cálido y seco incrementa el riesgo de incendios forestales, favorece la presencia de plagas y enfermedades que dañan a la selva, y ocasiona escasez de agua (Larson *et al.*, 2010). De hecho, el aumento de la temperatura global está relacionado con incendios forestales cada vez más frecuentes e intensos, que liberan grandes cantidades de carbono a la atmósfera y

agravan el calentamiento del planeta, generando así un círculo vicioso que se refuerza a sí mismo (Álvarez-Vázquez *et al.*, 2023; López-Teloxa y Monterroso-Rivas, 2024), al propiciar condiciones que incrementan la frecuencia y severidad de las sequías, facilitan la propagación del fuego, elevan la mortalidad forestal y reducen la biomasa aérea viva, lo que, en consecuencia, favorece la degradación de los ecosistemas y aumenta su vulnerabilidad frente a futuras perturbaciones (Anderegg *et al.*, 2020; Brando *et al.*, 2014). Situación que se agrava por la ocurrencia de eventos climáticos extremos, como huracanes y las fluctuaciones asociadas al ENSO (fenómenos del Niño y la Niña), cuyos impactos pueden ser incluso mayores que los provocados por los cambios graduales en la temperatura y la precipitación anual (Kolb, 2013).

Las lluvias tienden a ser menos frecuentes, pero más intensas cuando ocurren, lo que puede provocar un aumento de la erosión del suelo y la pérdida de nutrientes (Amoroux *et al.*, 2018), lo que dificulta el crecimiento de la vegetación y afecta negativamente la composición de las selvas y los bosques; así como la capacidad de las especies arbóreas para adaptarse a un entorno que cambia rápidamente, con posibles alteraciones meso y micro climáticas que afectan severamente el ecosistema local (Dourojeanni, 2019; Fernández-Méndez *et al.*, 2016). Fenómenos que se manifiestan en una disminución de la disponibilidad de agua dulce (Guzmán-Santiago *et al.*, 2023; Zuluaga-Gómez *et al.*, 2021).

Estas afectaciones repercuten en actividades productivas esenciales de la Selva Maya, como la agricultura, la ganadería y la apicultura, impactando directamente la seguridad alimentaria y la economía local (Osorio-Osorio *et al.*, 2020). Alteraciones que, en conjunto, ponen en riesgo la capacidad de la selva para seguir ofreciendo servicios ambientales esenciales para el bienestar humano (Quesada-Román y Mora-Vega, 2017). Por lo anterior, proteger y manejar de manera sostenible la Selvas Maya no solo permite conservar su biodiversidad, sino mantenerla sana. Por ejemplo, a escala global, procesos similares evidencian la magnitud del problema como muestran Artaxo *et al.* (2022) para la Amazonía, en donde la región sur ha dejado de ser un sumidero de carbono para convertirse en una fuente neta entre 2010 y 2018 ($+0,11 \text{ PgC año}^{-1}$), debido a la combinación de incremento en la ocurrencia de incendios y la disminución de su capacidad de absorción. De forma comparable, en el Sudeste Asiático, la expansión agrícola y la conversión de turberas han transformado antiguos sumideros en fuentes emisoras, alterando significativamente el balance regional de carbono (Ameray *et al.*, 2021; Villa *et al.*, 2011).



3. El manejo forestal como estrategia de mitigación del cambio climático

Investigaciones como la realizada por Ellis *et al.* (2024) señalan que, en la Península de Yucatán, la pérdida y el deterioro de los bosques se deben principalmente a la expansión de la agricultura, ganadería y al crecimiento desordenado de las ciudades. Dichas actividades antropogénicas exacerban la vulnerabilidad de los ecosistemas forestales tropicales a los efectos del cambio climático, limitando su capacidad de respuesta a la ocurrencia de perturbaciones naturales extremas; así como a su frecuencia e intensidad (Reyna *et al.*, 2022). Por ello, resulta fundamental conservar la cobertura forestal, ya que los árboles desempeñan un papel clave en la salud de los ecosistemas, la regulación del clima y la provisión de servicios ecosistémicos de los que dependen las comunidades humanas. En este contexto, el manejo forestal se presenta como una estrategia adecuada para equilibrar la conservación del bosque con su aprovechamiento responsable y sustentable.

Aguirre-Calderón en el 2015, definen el manejo forestal como “el conjunto de acciones de planificación, gestión y uso responsable de los bosques, que busca satisfacer las necesidades humanas actuales (como la obtención de madera, productos no maderables y servicios ambientales), sin poner en riesgo la capacidad del bosque para regenerarse”. Enfoque que hace posible compatibilizar, al mismo tiempo, la producción maderable y la conservación del bosque, asegurando la provisión de diversos servicios ecosistémicos esenciales para el bienestar humano (Serrano-Ramírez *et al.*, 2019) que, además de proteger la biodiversidad y mantener la salud del bosque, permite un aprovechamiento económico responsable que asegure la disponibilidad de recursos para las generaciones futuras.

El manejo forestal debe considerar que las necesidades y expectativas de los distintos actores que dependen de los bienes y servicios de la selva cambian con el tiempo, lo que hace necesaria una gestión forestal integral y de acuerdo con los principios de sostenibilidad ecológica, económica y sobre todo social, siempre pensando en el bienestar de las comunidades (Franco-Moraes *et al.*, 2023). En la actualidad, la investigación forestal se centra cada vez más en garantizar la sostenibilidad de la producción maderable, al mismo tiempo que responde a una demanda creciente por integrar en la gestión forestal con los beneficios sociales y ambientales que ofrecen las selvas (Guerra-De la Cruz *et al.*, 2021). Debido a que, al mantener a los ecosistemas forestales en buen estado siguen capturando carbono, regulando el clima y brindando beneficios esenciales a las comunidades locales (López-Tobar *et al.*, 2024); a la vez que se fortalece su capacidad para

recuperarse frente a disturbios naturales extremos como son los incendios forestales, las sequías y los huracanes, favoreciendo su resiliencia a largo plazo.

Para que el manejo forestal sea efectivo, es crucial que se base en un profundo conocimiento de las funciones y procesos ecológicos de los ecosistemas, así como en una comprensión clara de los impactos de las intervenciones humanas (Günter *et al.*, 2012). Por ejemplo, para la SM, el tratamiento silvícola predominante es la corta de selección que consiste en cosechar solo algunos árboles que ya han alcanzado un tamaño determinado (diámetro mínimo de corta); además busca causar el menor daño a la selva remanente y permitir que los árboles más jóvenes continúen creciendo y desarrollándose (Dourojeanni, 2019). En este proceso se aprovechan principalmente los árboles más grandes (diámetro ≥ 55 cm) de especies emblemáticas como la caoba (*Swietenia macrophylla*) y el cedro (*Cedrela odorata*), buscando generar un impacto mínimo en la estructura del rodal¹ y, mantener la diversidad biológica y la vitalidad del ecosistema (Sánchez *et al.*, 2023). Cuando esta práctica se realiza siguiendo planes de manejo forestal bien regulados, no causa daños significativos al bosque y permite su conservación a largo plazo, a la vez que se obtienen beneficios económicos para las comunidades (Rayo, 2014).

4. Manejo forestal comunitario: retos y oportunidades para el futuro de la Selva Maya

En la Península de Yucatán, el aprovechamiento forestal (por ejemplo, para la producción de carbón y madera) representa una fuente importante de sustento, tanto económico como para el consumo local de las comunidades (Chávez-Acuña *et al.*, 2022). El aprovechamiento de madera en los ejidos forestales de la Selva Maya es un motor importante para la gestión forestal sostenible, a través de la implementación de prácticas de bajo impacto y estrategias para reducir la deforestación y la degradación. Es importante señalar que dichas prácticas favorecen la conservación de los ecosistemas al realizarse con criterios adecuados como planeación de las actividades de extracción incluido el mapeo de las áreas de corta anual, derribo direccional, uso de tractor agrícola y winch (cabrestante) para la extracción de las tozas del sitio de corta al camino de saca (Báez-Vargas, *et al.*, 2017; Ellis *et al.*, 2015; Ellis *et al.*, 2024; Tadeo-Noble *et al.*, 2019).

La vegetación de la Selva Maya está compuesta principalmente por una gran matriz de selvas medianas subperennifolias en la que se encuentran pequeños parches de selva mediana

¹ Unidad básica de referencia en la ordenación y manejo forestal. Se define como una porción continua de bosque que resulta homogénea en su composición, estructura, edad, calidad de suelo y exposición, lo que permite aplicarle un mismo tratamiento silvícola o plan de gestión (Del Rio, *et al.*, 2003).



subcaducifolia, selvas bajas caducifolias y perennifolias (Miranda-González y Hernández-Xolocotzi, 2014). En conjunto, estos tipos de selvas conforman un ecosistema altamente diverso que, bajo esquemas de manejo forestal comunitario, ha demostrado compatibilizar, de manera exitosa, el aprovechamiento maderable con la conservación del entorno natural (Aguirre-Calderón, 2015; Hernández-Velasco, *et al.*, 2024; Navarro- Martínez, *et al.*, 2020; Vester y Navarro, 2007). En este contexto, la gestión forestal en la región ha estado guiada principalmente por el modelo desarrollado por el Plan Piloto Forestal de Quintana Roo, una experiencia pionera que ha permitido que entre 1999 y 2018 se autorice el aprovechamiento de más de 754 mil hectáreas distribuidas en 141 predios del estado de Quintana Roo (Navarro-Martínez, *et al.* 2020; Navarro-Martínez, *et al.* 2021). No obstante, en los últimos cinco años, se ha propuesto el sistema patrimonial de manejo para selvas productivas de México, incorporando la gestión forestal una superficie de aproximadamente 200,000 has, no solo en los estados de Campeche y Quintanas Roo, sino también en Jalisco y que, entre sus criterios, considera un componente ecológico-silvícola. Contario a lo anterior, la extracción de productos forestales sin criterios técnicos ni ecológicos limita el crecimiento adecuado de los árboles y la selva, dificultando la conservación de la biodiversidad local (Bray *et al.*, 2008).

Así, el manejo forestal comunitario se reconoce como una herramienta efectiva para la conservación de la Selva Maya. Al respecto, el estudio realizado por Ellis y Porter-Bolland (2008) muestra que las zonas donde el manejo forestal comunitario se aplica de manera adecuada mantienen más del 80% de cobertura forestal y, en muchos casos, presentan una recuperación del bosque. Esta situación contrasta con algunas áreas protegidas como el norte de la Reserva de la Biosfera Calakmul (sin manejo forestal), ocasionando, en ciertos casos, el desarrollo de actividades ilegales y un aprovechamiento desordenado de los recursos forestales (Ellis y Porter-Bolland, 2008). De igual manera, otros estudios realizados en la región señalan la inexistencia de amenazas para la conservación de la riqueza de especies arbóreas (Vester y Navarro-Martínez, 2007), por lo que mientras el aprovechamiento se realice con planes de manejo autorizados por la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT), es compatible con la dinámica natural del ecosistema forestal en la Selva Maya.



Figura 2. Aprovechamiento forestal en el ejido Caobas, Quintana Roo Foto: María Angelica Navarro Martínez y Wendy Deyanira Sánchez Méndez

Conclusiones

El manejo forestal comunitario llevado a cabo en la Selva Maya-México, resulta una estrategia adecuada para enfrentar los efectos del cambio climático, especialmente en regiones de alta riqueza ecológica, debido a que mantiene en buen estado la cobertura forestal y contribuye a conservar la biodiversidad, con ello, se favorece la captura y almacenamiento de carbono, la regulación del clima y se asegura la provisión de recursos naturales útiles para las comunidades locales.

Frente a un escenario de cambio climático cada vez más intenso, el manejo forestal ofrece una alternativa que combina conservación y uso responsable del bosque. La evidencia muestra que, el aprovechamiento forestal basado en el conocimiento ecológico local y científico de las especies aprovechadas y de la selva, en su conjunto, no solo reduce la deforestación y la degradación, sino que fortalece la resiliencia de los ecosistemas ante sequías, incendios y otros disturbios, tanto naturales como antropogénicos.

Por lo tanto, fortalecer el manejo forestal comunitario es fundamental, ya que puede mejorar el acceso a mercados e incentivos nacionales e internacionales, así como impulsar políticas públicas que reconozcan el valor ambiental y social de los bosques. Además, dicha estrategia genera beneficios indirectos en otras actividades primarias, como la agricultura de temporal (milpa) y la producción apícola. Apostar por el manejo forestal sostenible implica, en última instancia, construir un futuro en el que la naturaleza se convierta en una aliada clave frente al cambio climático y para el bienestar de las generaciones presentes y futuras.



Agradecimientos

Los autores expresan su agradecimiento a El Colegio de la Frontera Sur (ECOSUR) Unidad Chetumal, por el apoyo institucional brindado para la realización de este documento. Asimismo, se agradece a la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI) por el financiamiento a través de una beca doctoral y una beca estancia posdoctoral.

Literatura citada

- Aguirre-Calderón, O. A. 2015. *Manejo forestal en el siglo XXI*. Madera y bosques 21(SPE): 17-28.
- Alfaro-Reyna, T., J. Delgado-Balbuena, F. Arellano-Martín, A. Maya-Martínez, X. García-Cuevas, Y. Aguilar-Duarte y C. A. Aguirre-Gutiérrez. 2022. *Vulnerabilidad de Especies Forestales de la Península de Yucatán Ante Factores Climáticos y Antropogénicos*. Tropical and Subtropical Agroecosystems 26(1): #015.
- Álvarez-Vázquez, J. L., G. Aguilar-Sánchez, R. Granados-Ramírez, J. Duch-Gary, J. Juárez-Méndez y I. Tamara-Pedron. 2023. *Análisis de indicadores extremos climáticos y la percepción local en dos comunidades de la Selva Lacandona*. Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas 14(7): 1-12.
- Ameray, A., Y. Bergeron, O. Valeria, M. M. Girona y X. Cavard. 2021. *Forest Carbon Management: A Review of Silvicultural Practices and Management Strategies Across Boreal, Temperate and Tropical Forests*. Current Forestry Reports, 7(4), 245–266.
- Amoroux, D., L. Gandois, D. Galop, G. Le Roux, L. Camarero, J. Catalán, J. M. Santamaria, D. Elustondo, S. Izquieta Rojano, A. de Diego. 2018. *Ecosistemas sensibles de alta montaña: lagos y turberas*. El cambio climático en los Pirineos: impactos, vulnerabilidades y adaptación. HAL (Le Centre Pour La Communication Scientifique Directe) 58-65.
- Anderegg, W. R. L., A. T. Trugman, G. Badgley, C. M. Anderson, A. Bartuska, P. Ciais, D. Cullenward, C. B. Field, J. Freeman, J. A. Hicke, D. Huntzinger, R. B. Jackson, J. Nickerson, S. Pacala y J. T. Randerson. 2020. *Climate-driven risks to the climate mitigation potential of forests*. Science, 368(6497): eaaz7005

- Artaxo, P., H. C. Hansson, L. A. T. Machado y L. V. Rizzo. 2022. *Tropical forests are crucial in regulating the climate on Earth*. PLOS Climate 1(8): e0000054.
- Báez-Vargas, A. M., L. Esparza-Olguín, E. Martínez-Romero, S. Ochoa-Gaona, N. Ramírez-Marcial y N. A. González-Valdivia. 2017. *Efecto del manejo sobre la diversidad de árboles en vegetación secundaria en la Reserva de la Biosfera de Calakmul, Campeche, México*. Revista de biología tropical 65 (1): 41-53.
- Bonan, G.B. 2008. *Forests and climate change: forcings, feedbacks, and the climate benefits of forests*. Science 320 (5882): 1444–1449.
- Borma L. S., M. H. Costa, H. R. da Rocha, J. Arieira, N. C.C. Nascimento, C. Jaramillo-Giraldo, G. Ambrósio, R. G. Carneiro, M. Venzon, A. F. Neto, R. Van der Hoff, B. F. A. Oliveira, R. Rajão y C. A. Nobre. 2022. *Beyond Carbon: The Contributions of South American Tropical Humid and Subhumid Forests to Ecosystem Services*. Reviews of Geophysics 60(4): e2021RG000766.
- Brando, P. M., J. K. Balch, D. C. Nepstad, D. C. Morton, F. E. Putz, M. T. Coe, D. Silvério, M. N. Macedo, E. A. Davidson, C. C. Nóbrega, A. Alencar, y B.S. Soares-Filho. 2014. *Abrupt increases in Amazonian tree mortality due to drought–fire interactions*. Proceedings of the National Academy of Sciences 111(17): 6347–6352.
- Bray, D. B., E. Durán, V. H. Ramos, J. F. Mas, A. Velázquez, R. B. McNab, D. Barry y J. Radachowsky. 2008. *Tropical Deforestation, Community Forests, and Protected Areas in the Maya Forest*. Ecology and Society 13(2): 56.
- Campo, J., F. García-Oliva, F. Navarrete- Segueda y C. Siebe. 2016. *Almacenes y dinámica del carbono orgánico en ecosistemas forestales tropicales de México*. Terra Latinoamericana 34 (1): 31-38.
- Chávez-Acuña, I. J., J. L. Flores-Flores, G. Domínguez-Cortinas y E. Chávez-García. 2022. *Percepción social del papel de la variabilidad y el cambio climático sobre los sistemas socio-ecológicos en comunidades indígenas y mestizas de la Huasteca Potosina en México*. Estudios Sociales Revista de Alimentación Contemporánea y Desarrollo Regional 32(59).
- Cortés-Gómez, C., A. Cervantes-Martínez y A. M. Arce-Ibarra. 2023. *Valoración sociocultural de los servicios ecosistémicos de la zona costera del Caribe mexicano*. Economía Sociedad y Territorio 23(73): 961-990.
- Del Río, M., F. Montes, I. Cañellas y G. Montero. 2003. *Revisión: Índices de diversidad estructural en masas forestales*. Investigación agraria: Sistemas y recursos forestales 12(1): 159-176.



- Dos Anjos Xavier, J., B. Rodrigues Bagnolin Muniz, M. R. Kanieski, C. Guimaraes Camargo Campos y J. A. Henkes. 2022. *Impactos das mudanças climáticas nas florestas tropicais*. Revista Gestão y Sustentabilidade Ambiental 11(2): 65-82.
- Dourojeanni, M. J. 2019. *Conservación de insectos en la amazonia*. Ecología Aplicada 18(2): 189.
- Ellis E., K. A. Kainer, J. A. Sierra-Huelsz, P. Negreros-Castillo, D. Rodríguez-Ward y M. DiGiano. 2015. *Endurance and adaptation of community forest management in Quintana Roo, Mexico*. Forests 6(11): 4295-4327.
- Ellis E.A., I. U. Hernández-Gómez, D. Chacón-Castillo y M. Vázquez-Luna. 2024. *Análisis de frentes de deforestación en la Península de Yucatán*. The Nature Conservancy – Universidad Veracruzana, Xalapa, México. 150pp.
- Ellis, E. A. y L. Porter-Bolland. 2008. *Is community-based forest management more effective than protected areas? A comparison of land use/land cover change in two neighboring study areas of the Central Yucatan Peninsula, Mexico*. Forest Ecology and Management 256(11): 1971-1983.
- Ellis, E. A., M. A. Navarro-Martínez, I. U. Hernández- Gómez y D. Chacón-Castillo. 2024. *Manual de buenas prácticas de aprovechamiento de impacto reducido para la mitigación de emisiones en las selvas de la península de Yucatán*. Xalapa, Veracruz, México: Universidad Veracruzana, Dirección Editorial. 209p.
- Esparza-Olguín, L. G. y E. Martínez-Romero. 2021. *Diversidad y estructura arbórea en afloramientos de carbonato de calcio en Calakmul, México*. Revista de Biología Tropical 69(3): 829-842.
- Estrada-Contreras, I., M. Equihua, J. Laborde, E. Martínez-Meyer y L. R. Sánchez-Velásquez. 2016. *Current and Future Distribution of the Tropical Tree Cedrela odorata L. in Mexico under Climate Change Scenarios Using MaxLike*. PLoS ONE 11(10): e0164178.
- Feng, Q., H. Yang, Y. Liu, Z. Liu, S. Xia, Z. Wu, y Y. Zhang. 2024. *Interdisciplinary perspectives on forest ecosystems and climate interplay: a review*. Environmental Reviews 33, 1–21.
- Fernández-Méndez, F., V. M. Velasco-Salcedo, J. Guerrero-Contecha, M. Galvis y A. V. Neri. 2016. *Recuperación ecológica de áreas afectadas por un incendio forestal en la microcuenca tintales (boyacá, colombia)*. Colombia Forestal 19(2): 143-160.
- Franco-Moraes, J., L. V. Braga y C. R. Clément. 2023. *The Zo'é perspective on what scientists call "forest management" and its implications for floristic diversity and biocultural conservation*. Ecology and Society 28(1): 37.

- George-Chacón, S. P., T. L. Smallman, J. M. Dupuy, J. L. Hernández-Stefanoni, D. T. Milodowski y M. Williams. 2023. *Isolating the effects of land use and functional variation on Yucatán's forest biomass under global change*. *Frontiers in Forests and Global Change* 6: 1204596.
- Graciano-Ávila, G., E. Alanís-Rodríguez, O. Aguirre- Calderón, M. A. González- Tagle, E. J. Treviño-Garza, A. Mora-Olivo y E. Buendía-Rodríguez. 2019. *Estimación de volumen, biomasa y contenido de carbono en un bosque de clima templado-frío de durango, México*. *Revista Fitotecnica Mexicana* 42(2): 119-127.
- Guerra-De la Cruz, V., E. Buendía-Rodríguez, J. Cerano-Paredes, F. Islas-Gutiérrez, J. C. Monárrez-González, E. Flores-Ayala, T. Pineda-Ojeda y M. Acosta-Mireles. 2021. *Investigaciones del INIFAP en manejo forestal y servicios ambientales de bosques templados mexicanos: evolución, logros y perspectivas*. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales* 12 (SPE1): 4-30.
- Günter, S., M. Weber, B. Stimm y R. Mosandl. 2012. *Lier la sylviculture tropicale à la gestion forestière durable*. *Bois & Forêts Des Tropiques* (314): 25-39.
- Guzmán-Santiago, J. C., H. M. Santos-Posadas, G. Ángeles-Pérez, B. Vargas-Larreta, M. Gómez-Cárdenas, G. Rodríguez-Ortiz y R. O. Corona-Núñez. 2023. *Efecto del cambio climático en la distribución de las especies de clima templado en Oaxaca, México*. *Botanical Sciences* 102(1): 39-53.
- Hernández-Velasco, Y. H., L. D. Hernández-Garza y M. F. Ghiso. 2024. *Eslabón de manejo forestal*. pp 41-65. En: Hernández Y. y Hernández L. (Eds). *Manejo forestal comunitario la Península de Yucatán: Guía de apoyo para videos educativos*. Rain Forest Alliance y W. K. Kellogg Foundation. Yucatán, México. 112 pp.
- Jumbo-Salazar, C. A., C. D. Arévalo-Delgado y L. J. Ramírez-Cando. 2017. *Medición de carbono del estrato arbóreo del bosque natural Tinajillas-Limón Indanza, Ecuador*. *La Granja: Revista de ciencias de la vida* 27(1): 2018: 51-63.
- Kolb, M. 2013. *Dynamics of land use and cover change and climate change in systematic conservation planning: a case study in the Grijalva-Usumacinta basin (Mexico)*. Tesis de doctorado. Université de Toulouse le Mirail-Toulouse II; y Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geografía. México 362pp.
- Laako, H., D. Ramos-Muñoz, E. Pliego-Alvarado y B. Marquez. 2022. *La construcción de un eco-frente en la región fronteriza de la Selva Maya*. *Estudios Fronterizos* (23): e105.
- Larson, A. M., D. Barry, G. R. Dahal y C. J. Colfer. 2010. *Forests for people: community rights and forest tenure reform*. Routledge: Londres, Reino Unido. 284 PP.



- López-Teloxa, L. C. y A. I. Monterroso-Rivas. 2024. *Soil Organic Carbon May Decline Under Climate Change: A Case Study in Mexican Forests*. Land 13(10): 1711.
- López-Tobar, R., R. J. Herrera-Feijoo, F. García-Robredo, R. G. Mateo Y B. Torres. 2024. *Timber harvesting and conservation status of forest species in the Ecuadorian Amazon*. Frontiers in Forests and Global Change (7): 1389852.
- Miranda-Gonzalez, F., y E. Hernández-Xolocotzi. 2014. *Los tipos de vegetación de México y su clasificación edición conmemorativa 1963-2013*. Sociedad Botánica de México. Facultad de Ciencias. Laboratorio de Ecología Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad Fondo de Cultura Económica. México. 179pp.
- Muñoz-López, E., R. Franco-Plata, L. G. Esparza-Olgún y E. Martínez-Romero. 2022. *Cartografía participativa en la evaluación de actividades productivas y cobertura forestal en ejidos de Calakmul, México*. Estudios Socioterritoriales 31(118):1-18.
- Nahmad-Sittón, S. 2000. *El Proyecto del Fondo Mundial para la Protección del Medio Ambiente (Gef) en Cuatro Áreas Naturales Protegidas de México y su Impacto Social*. Journal of Political Ecology 1(7): 19-42.
- Navarro-Martínez M. A. M. Mendoza- Briseño, P. Negreros- Castillo y D. Del Ángel Santos. 2021. *Sistema patrimonial de manejo forestal para selvas productivas de México*. Chetumal, Quintana Roo, México. El Colegio de la Frontera Sur. 198pp.
- Navarro-Martínez, M. A., M. Mendoza- Briseño, P. Negreros- Castillo y D. Del Ángel Santos. 2020. *Selvas productivas de México retrospectiva de su dasonomía*. Chetumal, Quintana Roo, México. San Cristobal de las Casas: El Colegio de la Frontera Sur. 205pp.
- Osorio-Osorio, J. A., C. C. Astudillo-Sánchez, J. Villanueva-Díaz, L. Soria-Díaz y V. Vargas-Tristán. 2020. *Reconstrucción histórica de la precipitación en la Reserva de la Biosfera El Cielo, México, mediante anillos de crecimiento en Taxodium mucronatum (Cupressaceae)*. Revista de Biología Tropical 68(3): 818-832.
- Quesada-Román, A., y A. Mora-Vega. 2017. *Impactos ambientales y variabilidad climática en el humedal de San Vito, Coto Brus, Costa Rica*. Revista de Ciencias Ambientales 51(1): 16-32.
- Ramírez-Martínez, A., M. D. J. González-Guillén, H. D. de los Santos-Posadas, G. Ángeles-Pérez y W. Santiago-García. 2021. *Forest management with carbon scenarios in the central region of Mexico*. iForest - Biogeosciences and Forestry 14(5): 413-420.

- Rayo, A. 2014. *Stakeholder dialogues for building joint public-private development strategies*. 105-146. En: Rayo A. *Strengthening Value Chains as an Industrial Policy Instrument*. United Nations, Santiago, Chile. 359pp.
- Sánchez-Gutiérrez, F., J. I. Valdez-Hernández, P. Hernandez de la Rosa, J. Sánchez-Escuero, A. S. Sánchez, C. Castillejos y A. I. Brindis-Santos. 2020. *Estructura y composición arbórea en un gradiente altitudinal del Área Natural Protegida Metzabok, Chiapas, México*. *Revista de Biología Tropical* 69(1): 12-22.
- Santos-Hernández, A. F., A. I. Monterroso-Rivas, D. Granados-Sánchez, A. Villanueva-Morales y M. Santacruz-Carrillo. 2021. *Projections for Mexico's Tropical Rainforests Considering Ecological Niche and Climate Change*. *Forests* 12(2): 119.
- Sasidharan, S. y S. Kavileveettil. 2022. *Capítulo de perspectiva: Degradación forestal en el contexto del cambio climático global*. 1-16pp. En Samec, P. (Ed.) *Degradación forestal en el contexto del cambio global, libros de desarrollo sostenible*. IntechOpen. Reino Unido, Londres. 162p.
- Serrano-Ramírez, E., J. R. Valdez-Lazalde, H. M. De los Santos-Posadas, R. A. Mora-Gutiérrez y G. Ángeles-Pérez. 2019. *Optimización de la producción forestal maderable y conservación del ecosistema en bosques comunitarios en el sur de México*. *Bosque (Valdivia)* 40(2): 195-204.
- Tadeo-Noble, A. E., J. I. Valdez-Hernández, L. Beltrán-Rodríguez, y E. García-Moya. 2019. *Efecto del aprovechamiento forestal sobre la estructura y diversidad arbórea en selvas tropicales de Quintana Roo, México*. *Bosque (Valdivia)* 40(2): 129-140.
- Vargas-Mena Amescua, A., y A. Yáñez-Sandoval. 2004. *La captura de carbono en bosques: ¿una herramienta para la gestión ambiental?* *Gaceta ecológica* (70): 5-56
- Vester, H. y M. A. Navarro-Martínez. 2007. *Fichas ecológicas: Árboles maderables de Quintana Roo, México*. El Colegio de la Frontera Sur, Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, Gobierno del estado de Quintana Roo, Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de Biodiversidad. Chetumal, Quintana Roo. 139pp.
- Villa, P. M., S. V. Martins, S. Nolasco de Oliveira Neto y A. C. Rodrigues. 2017. *Predictores antropogénicos y biofísicos de deforestación en la Amazonia: hacia la integración de actividades REDD+*. *Bosque (Valdivia)* 38(3): 433-446.
- Zamora-Crescencio, P., J. L. Aragón-Gastélum, J. A. Vargas-Contreras, R. C. Barrientos-Medina, F. J. Aguirre-Crespo, C. Gutiérrez-Báez y A. H. Plasencia-Vázquez, A. H. 2024. *Diversidad, composición y estructura de especies leñosas de la selva baja caducifolia en Lerma, Campeche*. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios* 11(2): e3819.



- Zamudio-Sánchez, F. J., A. A. Alvarado-Segura, A. A., K. De la Cruz- De la Cruz y M. Aguilar-Ávila M. 2023. *Procedimiento basado en análisis troncales para estimar a posteriori si el rendimiento maderable de un bosque ha sido sostenido a largo plazo*. Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y Del Ambiente 29(2): 3-24.
- Zuluaga-Gómez, O. A., J. E. Quinchía Y G. M. Valencia-Hernández. 2021. *Modelos implementados en el análisis de series de tiempo de temperatura superficial e índices de vegetación: Una propuesta taxonómica en el contexto de cambio climático global*. Revista de Geografía Norte Grande (78): 323-344.

Cita

- Vázquez-Luna, M., W.D. Sánchez-Méndez, M.A. Navarro-Martínez. El manejo forestal como respuesta eficaz a la degradación del ambiente en la Selva Maya. Recursos Naturales y Sociedad, 2026. Vol. 12(1): 334-349. <https://doi.org/10.18846/renaysoc.2026.12.12.01.0021>.

Sometido: 14 de abril de 2026

Aceptado: 22 de junio de 2026

Editora asociada: Dra. Crisalejandra Rivera Pérez

Editora ejecutiva: Dra. Crisalejandra Rivera Pérez

Diseño gráfico editorial: Ing. Fca. Elizabeth Villegas Carrazco

**Marine Detectives:
How We Discover What Pinnipeds Eat**

Detectives del mar: cómo descubrimos lo que comen los pinnípedos

**Brenda N. Mejía Guarnizo¹, Claudia J. Hernández Camacho^{2*},
Fernando R. Elorriaga Verplancken¹, Martha Patricia Rosas Hernández²**

Resumen

Los pinnípedos, como lobos marinos, focas y morsas, son depredadores clave en los ecosistemas marinos, pero conocer su dieta ha representado un reto para la ciencia. A lo largo del tiempo, los métodos para estudiarla han evolucionado desde técnicas invasivas, como el análisis de contenidos estomacales, hasta herramientas modernas y no invasivas como el análisis de excrementos, isótopos estables, ácidos grasos y metabarcoding de ADN (ácido desoxirribonucleico). Cada técnica ofrece información complementaria sobre qué comen, así como sobre las escalas temporales y espaciales en las que se alimentan. Este artículo explica de forma accesible cómo estas herramientas permiten reconstruir la dieta de los pinnípedos y por qué combinar métodos es la mejor estrategia para entender su papel ecológico y detectar cambios en los ecosistemas marinos.

Palabras clave: Lobos marinos, dieta, ADN ambiental, isótopos estables, metabarcoding.

¹ Centro Interdisciplinario de Ciencias Marinas, Instituto Politécnico Nacional. La Paz, Baja California Sur, México.

² Facultad de Ciencias Biológicas y Agropecuarias, región Poza-Rica-Tuxpan, Universidad Veracruzana, Tuxpan de Rodríguez Cano, Veracruz, México.

* Autor de correspondencia: jcamacho@ipn.mx



Abstract

Pinnipeds, such as sea lions, seals, and walruses, are key predators in marine ecosystems, but understanding their diet has long been a scientific challenge. Over time, the methods used to study their feeding habits have evolved from invasive techniques, such as stomach content analysis, to modern non-invasive tools like fecal analysis, stable isotopes, fatty acids, and DNA metabarcoding. Each method provides complementary information about what they eat, as well as the temporal and spatial scales. This article explains in an accessible way how these tools help reconstruct pinniped diets and why combining methods is the best strategy to understand their ecological role and detect changes in marine ecosystems.

Keywords: Sea lions, Diet, Environmental DNA, Stable isotopes, Metabarcoding.

Introducción

Al observar una colonia de lobos marinos en plena temporada de reproducción, la escena recuerda a un documental de naturaleza: hembras que amamantan a sus crías recién nacidas, machos que se enfrentan por dominar un territorio lleno de hembras, y cachorros que exploran con torpeza los alrededores de la colonia (Figura 1). En tierra, el espectáculo resulta fascinante e incluso enternecedor. Sin embargo, cuando los animales se sumergen en el mar comienza el verdadero enigma: ¿qué secretos esconden bajo el agua y de qué se alimentan durante sus inmersiones?



Figura 1. Así se vive la temporada reproductiva en tierra: a la izquierda, una hembra de lobo marino de California amamanta a su cría en Los Islotes, Golfo de California; a la derecha, dos machos se batan a duelo por un territorio lleno de hembras. *Fotógrafo: Luis Miguel Burciaga.*

Los pinnípedos —lobos marinos, focas y morsas— son hábiles buceadores. Se sumergen con destreza en la columna de agua, y algunas especies pueden superar los mil metros de profundidad durante sus inmersiones más extremas (Debey y Pyenson, 2013). Además, especies como el lobo fino de Guadalupe (Figura 2) o los elefantes marinos del norte y del sur, realizan extensas travesías de cientos de kilómetros en busca de alimento (Elorriaga-Verplancken *et al.*, 2016). Otros, como el lobo marino de California, se alimentan generalmente cerca de sus colonias. Su menú es muy diverso: peces óseos, calamares y, en algunos casos, presas blandas difíciles de detectar como invertebrados o peces con cartílago (tiburones y rayas). Descubrir qué comen los pinnípedos ha sido un desafío que ha convertido a los científicos en verdaderos detectives del mar, capaces de reconstruir sus dietas a partir de huellas biológicas ocultas en sus estómagos, excrementos y recientemente, en sus tejidos.



Figura 2. El viaje incansable del lobo fino de Guadalupe. Las hembras de esta especie pueden recorrer entre 400 y poco más de 1,000 km para alimentarse durante semanas en mar abierto, antes de regresar a tierra para amamantar a sus crías. *Fotógrafo: Fernando R. Elorriaga Verplancken.*

Primero los estómagos, después los excrementos

A finales del siglo XIX, la curiosidad científica llevó a los investigadores a recurrir a métodos muy invasivos: desde lavados de estómagos en animales vivos hasta la revisión de los contenidos estomacales en animales varados o atrapados en redes de pesca (Figura 3) (Antonelis *et al.*, 1987). Si bien, estos métodos aportaron información valiosa y fueron fundamentales para el desarrollo de la ecología trófica, su carácter invasivo impulsó el desarrollo de alternativas menos invasivas y más compatibles con el bienestar animal.

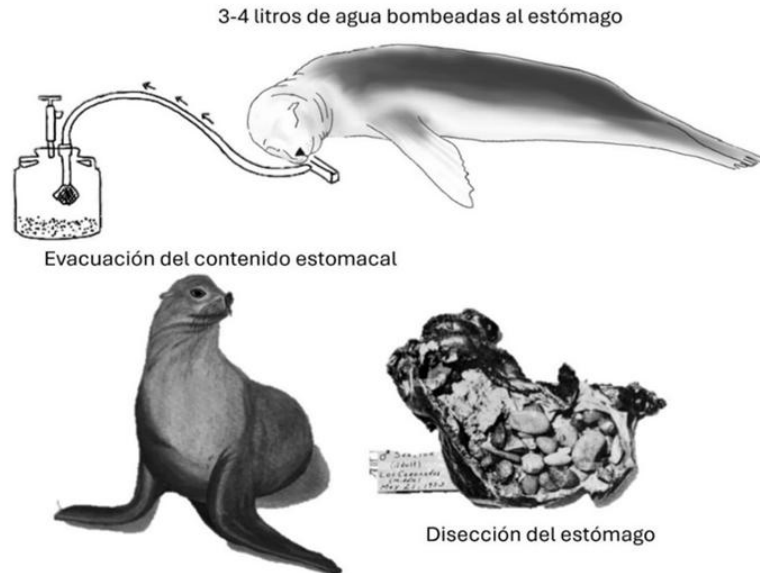


Figura 3. Estudios del siglo XIX. El lavado de estómagos y la revisión de contenidos estomacales fueron los primeros métodos usados para descifrar qué comían los elefantes marinos del sur. Hoy ya no los utilizamos, pero en su momento abrieron el apetito científico por conocer sus dietas. *Elaborado por: Yutzin Aimeé Jiménez García.*

Con el tiempo, el análisis de excrementos se convirtió en una herramienta clave para estudiar la dieta de los pinnípedos. En ellos, entre los restos parcialmente digeridos, los investigadores “desentierran” otolitos de peces, picos de calamares y otras estructuras duras que resisten la digestión (Figura 4) (Riemer y Mikus, 2006). Sin embargo, este método no es perfecto, los restos encontrados suelen hallarse rotos o erosionados (Tollit *et al.*, 2003), y en experimentos en cautiverio han demostrado que la forma en que se suministra el alimento puede influir en lo que finalmente se recupera (Grellier y Hammond, 2005). Además, la información que aporta se limita a lo consumido en los días más recientes, correspondientes al último viaje de alimentación, por lo que deja fuera un panorama más amplio.

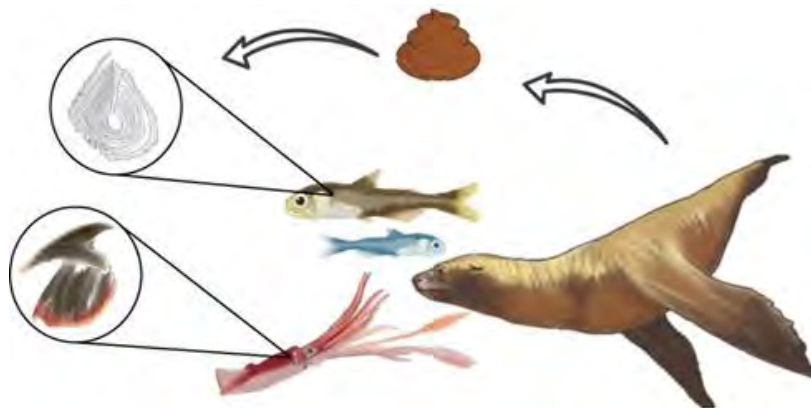


Figura 4. Detectives del excremento. Otolitos de peces y picos de calamares se convierten en pistas escondidas en los excrementos de los pinnípedos. Una técnica menos invasiva, aunque con limitaciones, que revela el menú de los días anteriores a la recolecta. *Elaborado por: Yutzin Aimeé Jiménez García.*

Pelos, grasa y algo más

Con el avance de la ciencia, los investigadores aprendieron a leer otras huellas invisibles. En el pelo, los bigotes y la sangre de los pinnípedos se esconden firmas químicas que narran su dieta y las características de las áreas donde se alimentan a través del tiempo (Hirons *et al.*, 2001). Una de las herramientas más utilizadas para descifrar estas historias es el análisis de isótopos estables. Esta técnica se basa en que los alimentos dejan señales químicas que se incorporan y quedan registradas en los tejidos animales. Los isótopos estables de carbono revelan si las presas provenían de aguas costeras o de mar abierto, mientras que los de nitrógeno indican el nivel que ocupan en la cadena alimenticia (Post, 2002).

Otra pista se esconde en la grasa: muchos ácidos grasos de las presas son incorporados y almacenados en los tejidos de los pinnípedos (Iverson *et al.*, 2004), y con ellos surge la técnica de “análisis de perfiles de ácidos grasos”, capaz de reconstruir no solo lo que comieron sino la persistencia y variedad en su dieta a lo largo de semanas, meses o incluso años (Figura 5) (Stewart *et al.*, 2014). Es como revisar el historial alimenticio de un animal: no dice qué comió ayer, pero sí cuenta la historia de su menú en escalas de tiempo mayores e incluso de toda su vida.

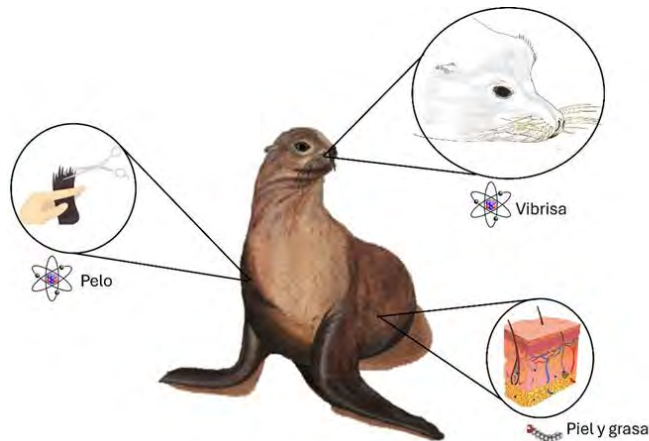


Figura 5. Las huellas químicas de la dieta. Pelo, bigotes, piel y grasa guardan señales invisibles: isótopos estables y ácidos grasos que permiten reconstruir dónde y en qué niveles de la cadena alimenticia comen los pinnípedos. *Elaborado por: Yutzin Aimeé Jiménez García.*

El turno del ADN (ácido desoxirribonucleico)

En los últimos años, la ciencia llevó la investigación de la dieta a un nivel molecular: el metabarcoding de ADN (un anglicismo que puede traducirse como “código de barras genético”, basado en el análisis del material genético que hay dentro de las células). Gracias a técnicas de secuenciación, los excrementos se transformaron en bibliotecas genéticas que revelan qué presas consumieron los pinnípedos. Esta técnica identifica fragmentos de ADN de múltiples especies



presentes en una sola muestra, incluso aquellas presas blandas que no dejan restos duros como evidencia. El metabarcoding funciona como un lector de barras biológico que toma fragmentos de ADN de los excrementos y los compara con bases de datos genéticas para descifrar el menú oculto (Figura 6) (Pompanon *et al.*, 2012). Sin embargo, la precisión de las identificaciones taxonómicas depende de la calidad y cobertura de las bases de datos genéticas disponibles (Keck *et al.*, 2023), por lo que una representación incompleta de las especies puede limitar la identificación de presas. Esta técnica ya ha sido aplicada con éxito en lobos finos australianos, lobos marinos de Nueva Zelanda, lobos marinos australianos y en focas comunes, permitiendo detectar una mayor diversidad de presas que la observada mediante el análisis convencional de restos duros (Brassea-Pérez *et al.*, 2019).

Actualmente se dice que la técnica es semicuantitativa, ya que al igual que los métodos basados en excremento, solo permite asomarse a los últimos días de su dieta (Bowen y Iverson, 2013). Pese a ello, la precisión de la técnica la ha convertido en una de las herramientas más prometedoras y en plena expansión, abriendo nuevas rutas para descifrar los secretos del mar.

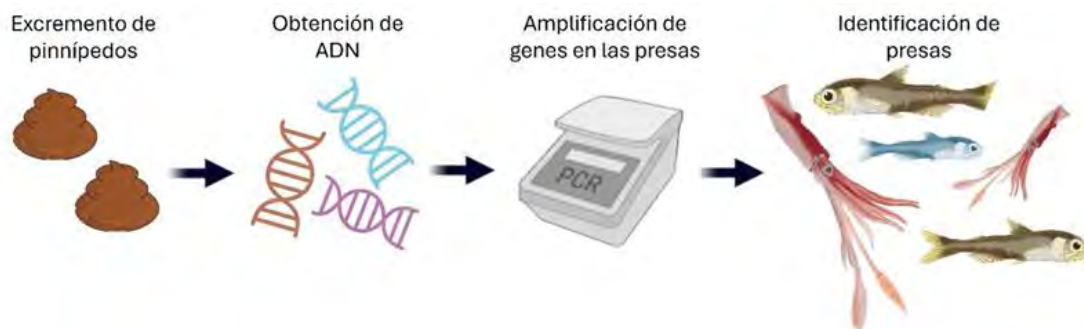


Figura 6. El ADN de las presas. En el metabarcoding de ADN, los fragmentos genéticos de las presas revelan con sorprendente detalle qué especies forman parte del banquete invisible de los pinnípedos. *Elaborado por: Yutzin Aimeé Jiménez García.*

Conclusión

¿Cuál es la técnica ganadora?

La respuesta es sencilla: ninguna por sí sola. No existe una técnica que resuelva por completo el rompecabezas. Los restos duros y el ADN permiten identificar presas específicas, aunque en una ventana temporal corta. En cambio, los análisis de isótopos estables y perfiles de ácidos grasos ofrecen panoramas más amplios, capaces de abarcar semanas, meses o años, pero sin aportar, en

la mayoría de los casos, la identidad exacta de la presa. Así, cada método captura una pieza distinta de la historia alimentaria de los pinnípedos y opera en una escala temporal diferente.

El verdadero secreto está en combinarlas. Porque, más allá de la curiosidad científica, conocer qué comen estos animales es esencial para vigilar la salud de los ecosistemas marinos, detectar cambios en la disponibilidad de recursos y medir el pulso del cambio climático en el océano.

Los menús submarinos de los pinnípedos no son simples listas de presas: son reflejos de la vida marina. Descifrarlos es, en el fondo, una forma de escuchar cómo respira y se transforma nuestro planeta azul.

Literatura citada

- Antonelis, G.A., M.S. Lowry, D.P. DeMaster y C.H. Fiscus. 1987. *Assessing northern elephant seal feeding habits by stomach lavage*. Marine Mammal Science 3 (4): 308-322.
- Bowen, W.D. y S.J. Iverson. 2013. *Methods of estimating marine mammal diets: A review of validation experiments and sources of bias and uncertainty*. Marine Mammal Science 29 (4): 719-754.
- Brassea-Pérez, E., Y. Schramm, G. Heckel, J. Chong-Robles y A. Lago-Lestón. 2019. *Metabarcoding analysis of the Pacific harbor seal diet in Mexico*. Marine Biology 166 (8).
- Debey, L.B. y N.D. Pyenson. 2013. *Osteological correlates and phylogenetic analysis of deep diving in living and extinct pinnipeds: What good are big eyes?* Marine Mammal Science 29 (1): 48-83.
- Elorriaga-Verplancken, F.R., G.E. Sierra-Rodríguez, H. Rosales-Nanduca, K. Acevedo-Whitehouse y J. Sandoval-Sierra. 2016. *Impact of the 2015 El Niño-Southern Oscillation on the abundance and foraging habits of Guadalupe fur seals and California sea lions from the San Benito Archipelago, Mexico*. PLoS ONE 11 (5).
- Grellier, K. y P. Hammond. 2005. *Feeding method affects otolith digestion in captive gray seals: Implications for diet composition estimation*. Marine Mammal Science 21 (2): 296-306.
- Hirons, A.C., D.M. Schell y B.P. Finney. 2001. *Temporal records of $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{15}\text{N}$ in North Pacific pinnipeds: Inferences regarding environmental change and diet*. Oecologia 129 (4): 591-601.
- Iverson, S.J., C. Field, W.D. Bowen y W. Blanchard. 2004. *Quantitative fatty acid signature analysis: A new method of estimating predator diets*. Ecological Monographs 74 (2): 211-235.



- Keck, F., Couton, M., & Altermatt, F. (2023). Navigating the seven challenges of taxonomic reference databases in metabarcoding analyses. *Molecular Ecology Resources*, 23, 742–755. <https://doi.org/10.1111/1755-0998.13746>
- Pompanon, F., B.E. Deagle, W.O.C. Symondson, D.S. Brown, S.N. Jarman y P. Taberlet. 2012. *Who is eating what: Diet assessment using next generation sequencing*. *Molecular Ecology* 21 (8): 1931-1950.
- Post, D.M. 2002. *Using stable isotopes to estimate trophic position: Models, methods and assumptions*. *Ecology* 83 (3): 703-718.
- Riemer, S. y R. Mikus. 2006. *Aging fish otoliths recovered from Pacific harbor seal (Phoca vitulina) fecal samples*. *Fishery Bulletin*.
- Tollit, D., M. Wong, A.J. Winship, D.A.S. Rosen y A.W. Trites. 2003. *Quantifying errors associated with using prey skeletal structures from fecal samples to determine the diet of Steller's sea lion (Eumetopias jubatus)*. *Marine Mammal Science* 19 (4): 724-744.
- Stewart, C., S. Iverson y C. Field. 2014. *Testing for a change in diet using fatty acid signatures*. *Environmental and Ecological Statistics* 21 (4): 775-792.

Cita

Mejía Guarnizo, B.N., C. J. Hernández Camacho, F.R. Elorriaga Verplancken y M.P. Rosas Hernández. Detectives del mar: cómo descubrimos lo que comen los pinnípedos. *Recursos Naturales y Sociedad*, 2026. Vol. 12(1): 351-358. <https://doi.org/10.18846/renaysoc.2026.12.12.01.0022>.

Sometido: 4 de febrero de 2026

Aceptado: 22 de junio de 2026

Editora asociada: Dra. Wendy Beatriz Espinosa de Aquino

Editora ejecutiva: Dra. Crisalejandra Rivera Pérez

Diseño gráfico editorial: Ing. Fca. Elizabeth Villegas Carrazco

Desert virus: masterpieces of resilience

Virus del desierto: obras maestras de la resiliencia

Tania Lizbeth Enríquez Espinoza¹, José Fernando Mendoza Cano¹,
Trinidad Encinas García¹, Arturo Sánchez Paz^{1*}

Resumen

Los desiertos representan el tipo de ecosistema más grande de la Tierra, cubriendo alrededor del 35 % de la superficie terrestre y actualmente se les considera como uno de los biomas con mayor expansión en el planeta. Se caracterizan por radiación solar extrema, escasez de agua, fluctuaciones extremas de temperatura y altos niveles de radiación ultravioleta, por lo que estas condiciones extremas dan lugar a adaptaciones únicas. En los desiertos, las bacterias y los virus pudieran tener un papel más significativo en los ciclos biogeoquímicos que en otros ecosistemas. Los virus son las entidades biológicas más abundantes en el planeta y pueden afectar muchos procesos ecológicos a través de su influencia en la composición de la comunidad microbiana, ya sea por inducir mortalidad bacteriana o intercambio genético. Este artículo tiene como objetivo presentar un panorama sobre la presencia de los virus en los desiertos y así tener un mejor entendimiento del papel que desempeñan en el modelado de las comunidades microbianas en estos ambientes extremos.

Palabras clave: desierto, virus, hiperárido, bacteriófago.

¹ Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste, S.C. (CIBNOR). Laboratorio de Virología. Calle Hermosa 101. Col. Los Ángeles. CP 83106. Hermosillo, Sonora. México.



* Autor de correspondencia: asanchez04@cibnor.mx Teléfono: +52 (662) 213-15-93

Abstract

Deserts represent the largest ecosystem type on Earth, covering approximately 35% of the Earth's surface and are currently considered one of the most widespread biomes on the planet. They are characterized by extreme solar radiation, water scarcity, extreme temperature fluctuations, and high levels of ultraviolet radiation, and these extreme conditions give rise to unique adaptations. In deserts, bacteria and viruses may play a more significant role in biogeochemical cycles than in other ecosystems. Viruses are the most abundant biological entities on the planet and can affect many ecological processes through their influence on the composition of the microbial community, either by inducing bacterial mortality or genetic exchange. This article aims to provide an overview of the presence of viruses in deserts and thus gain a better understanding of the role they play in shaping microbial communities in these extreme environments.

Keywords: desert, virus, hyperarid, bacteriophage.

El desierto, un mar de arena

La superficie total de nuestro planeta supera sutilmente los 500 millones de km², de esta los océanos representan alrededor del 70 % y el resto corresponde a la extensión terrestre (149 millones de km²). A inicios de nuestra educación básica, nos enseñaron que los ambientes terrestres naturales, son aquellos que se localizan sobre tierra firme y que además se catalogan según el clima y vegetación en praderas, bosques, selvas, tundras, montañas y desiertos. Los desiertos representan el tipo de ecosistema más grande de la Tierra, cubriendo alrededor del 35 % de la superficie terrestre. Específicamente en México, los ambientes áridos y semiáridos ocupan aproximadamente el 63 % del territorio (Díaz-Padilla et al., 2011). Por otro lado, es importante mencionar que las actividades antropogénicas y el cambio climático contribuyen, desafortunadamente, a la expansión de la cobertura de estos ecosistemas, de tal forma que actualmente se les considera uno de los biomas¹ con mayor expansión en el planeta.

¹ Región extensa de la Tierra que comparte un clima característico, así como tipos de flora y fauna específicos, que se adaptan a esas condiciones ambientales.

Un criterio ampliamente utilizado para definir a los desiertos es el índice de aridez (IA), mismo que refleja el déficit de humedad y se expresa como la relación entre la precipitación y la evapotranspiración² potencial. De esta forma, los desiertos son clasificados en cuatro categorías: *seco-semiárido o subhúmedo* (IA = 0.5-0.65), *semiárido* (0.2-0.5), *árido* (0.05-0.2) e *hiperárido* (< 0.05) (Cherlet *et al.*, 2018). Los principales o más grandes desiertos de México (Desierto de Sonora, Desierto de Chihuahua y Altiplano Mexicano) se clasifican principalmente dentro de las categorías hiperárido a árido, árido a semiárido y semiárido a seco-subhúmedo respectivamente, aunque también existen zonas semiáridas y seco-subhúmedas en sus periferias o regiones de transición.

Quizá uno de los factores más determinante en la formación de los desiertos es la latitud, ya que ésta condiciona la cantidad de radiación solar recibida, de hecho, los principales desiertos del mundo (Sahara y Kalahari en África, Sonora, Chihuahua y Atacama en América y el Gran Desierto de Arena en Oceanía) se encuentran situados en zonas próximas a los 30° de latitud (norte o sur). Así, México al estar localizado en la franja latitudinal de los 15° a los 35°, posee bastos ecosistemas áridos y semiáridos (Fig. 1).

Los desiertos son nichos ecológicos que se caracterizan por radiación solar intensa y extrema, así como escasez de agua. Además, también presentan fluctuaciones extremas de temperatura, altos niveles de radiación ultravioleta (UV) incidente y fuertes vientos. Por lo anterior, estos ambientes son considerados como poliextremos. Así, estas condiciones extremas dan lugar a adaptaciones únicas en las especies desérticas.

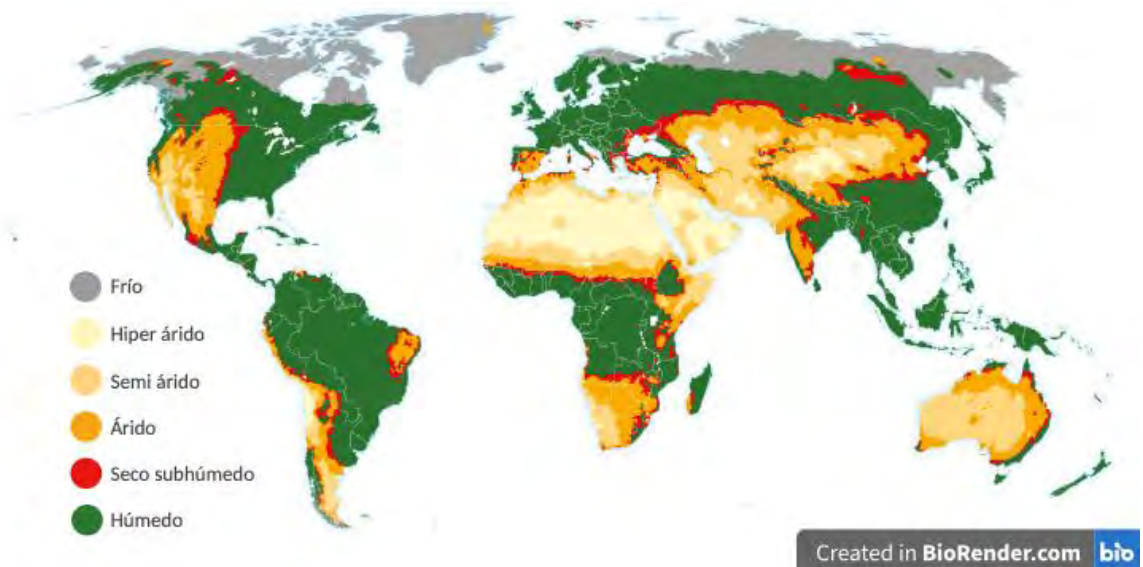


Figura 1. Distribución global de los subtipos de tierras secas basados en el índice de aridez. Tomado de World Atlas of Desertification (WAD3-JRC, 2018).

² Suma de la evaporación del agua desde el suelo y las superficies de agua, y la transpiración de las plantas a la atmósfera.



En el silencio del desierto

Solitario, deshabitado, vacío y desolado, son términos que se asocian al desierto, sin embargo, son áreas con extraordinarias flora y fauna. Sobrevivir en ambientes poliextremos, ha generado diferentes estrategias de vida (germinar en periodos de lluvia, absorción de agua profunda, almacenamiento de agua, regulación de temperatura, hábitos nocturnos y reabsorción de agua). Por este motivo, la mayoría de los estudios ecológicos de los desiertos se han enfocado principalmente en su macrofauna y macroflora (organismos visibles a simple vista) y en sus estrategias adaptativas a este tipo de ambientes extremos. Sin embargo, como consecuencia de las condiciones extremas del entorno desértico la diversidad de la macrofauna suele ser limitada, y los microorganismos pueden desempeñar un papel más influyente en la regulación de bioprocesos clave en estos sistemas. Por ejemplo, las bacterias intervienen en la fijación del nitrógeno, también ayudan a mantener la estructura física del suelo desértico previniendo la erosión; los virus controlan la mortalidad microbiana mediante la lisis de sus hospederos liberando materia orgánica al ecosistema, contribuyendo así al reciclaje de nutrientes en ambientes donde estos son escasos. Por ello, en los ecosistemas desérticos, las bacterias y los virus desempeñan un papel fundamental en los ciclos biogeoquímicos y en la regulación de las dinámicas poblacionales microbianas (Makhalanyane et al., 2015; Zablocki et al., 2016).

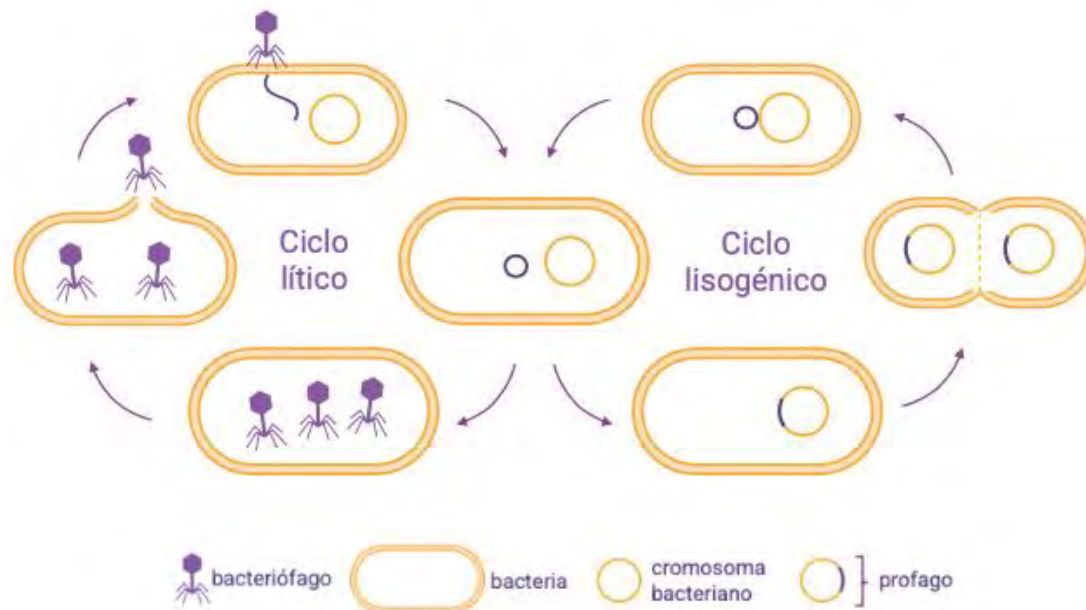
Lo invisible en lo inhóspito

¿Por qué estudiar a los virus de los desiertos? Diversos autores definen a los virus como entes biológicos acelulares, agentes infecciosos extremadamente pequeños o elementos genéticos móviles (EGM), que contienen material genético (ADN o ARN) el cual es envuelto en una capa proteica llamada cápside, presentan una gran diversidad genética y su inmensa abundancia está asociada a la de sus hospederos (Moelling y Broecker, 2019; Wigington et al., 2016). Un virus no puede “vivir” ni replicarse por sí mismo y, de hecho, se les conocen como “parásitos” intracelulares obligados ya que solo pueden hacerlo dentro de una célula huésped, donde utilizan la maquinaria celular para replicarse y propagarse.

Como mencionamos anteriormente, los virus dependen de un hospedero celular para su replicación, de esta forma, las interacciones de los bacteriófagos (virus que infectan bacterias) con sus hospederos pueden afectar muchos procesos ecológicos a través de su influencia en la composición de la comunidad microbiana, ya sea por inducir mortalidad bacteriana o intercambio genético, afectando así la diversidad microbiana y las dinámicas de sus poblaciones. Asimismo, pueden influir

en la evolución microbiana al ceder algunos genes a sus hospederos (lo que se conoce como transferencia horizontal de genes).

Los bacteriófagos (o fagos) se pueden presentar en diferentes estados: como partículas libres o viriones (forma extracelular completa e infecciosa); como profagos (el genoma del bacteriófago integrado en el genoma de su hospedero); o en pseudolisogenia (el genoma del fago se encuentra inactivo en el hospedero). De esta forma, existen bacteriófagos que pueden tener dos estrategias replicativas: el ciclo lítico (el fago inserta su material genético en la célula, produce nuevas partículas virales utilizando la maquinaria celular y destruye la célula para liberarlas) y el ciclo lisogénico (el fago inserta su material genético en la célula, el genoma viral se integra en el cromosoma bacteriano en forma de profago, el cual se puede replicar junto con el genoma bacteriano) (Fig. 2). A estos fagos se les conoce como virus atemperados, y la estrategia infectiva viral dependerá de muchos factores, incluyendo las condiciones ambientales. Los virus pueden utilizar diversas estrategias para sobrevivir en condiciones extremas de temperatura, radiación solar, escasez de agua y nutrientes. Algunos virus pueden encontrar refugio intracelular entrando en un ciclo lisogénico, lo que los protege del ambiente exterior.



Created in BioRender.com

Figura 2. Representación de los ciclos lítico y lisogénico de un bacteriófago. Ilustración creada en BioRender.com



Virus en suelos desérticos

Los ecosistemas edáficos (de suelo) son sistemas heterogéneos y complejos. Las comunidades edáficas son susceptibles a diversos estresores abióticos, y las presiones ecológicas son aún mayores en suelos extremadamente áridos, en donde están expuestos a los efectos del estrés oxidativo por la desecación, los solutos y la radiación UV (Zablocki *et al.*, 2016).

La arena superficial, extremadamente seca, de un desierto presenta un desafío único para la vida. Prigent *et al.* (2005) reportaron la presencia de bacteriófagos en arena superficial del desierto de Sahara de Marruecos y Túnez a pesar de las condiciones extremas del lugar, como la alta radiación UV, desecación y variaciones de temperatura. A su vez, Prestel *et al.* (2008) reportaron bacteriófagos en el desierto del Namib, el cual se localiza en el extremo suroeste de África, en donde sus regiones internas son extremadamente secas.

Por su parte, Prestel *et al.* (2013) reportaron bacteriófagos y sus bacterias hospederas en arena superficial del desierto del Valle de la Muerte (Death Valley desert) en California. En este desierto las temperaturas pueden alcanzar hasta los 54 °C en el día durante el verano y hasta bajo cero durante las noches en el invierno, además recibe menos de 50 mm de lluvia al año, de hecho, se ha registrado que han pasado años sin recibir lluvia.

Por otro lado, un estudio en el desierto de Atacama, en Chile, en donde se analizaron muestras de suelo, arrojó una diversidad de virus sorprendente, considerando que los suelos de esa zona presentan una muy baja biodiversidad y biomasa de microorganismos (Hwang *et al.*, 2021). Característicamente, se ha observado que los virus buscan protección en las células de su hospedero. Una estrategia de supervivencia de los virus es protegerse en las células de su hospedero como lisógenos (donde el material genético del virus se integra al del hospedero) o pseudolisógenos (como partículas virales en el citoplasma del hospedero). De esta manera, se ha evidenciado que en suelos desérticos hiperáridos, los fagos en lisogenia o pseudolisogenia son más prevalentes que los líticos (Prigent *et al.*, 2005; Prestel *et al.*, 2008).

Por el contrario, algunos estudios han reportado que las entidades virales más abundantes en condiciones ambientales un poco más favorables, como en eventos de lluvias o protegidas en las rocas de los desiertos, son aquellas que poseen ciclos replicativos líticos; mientras que las que se encuentran desprotegidas o expuestas son principalmente lisogénicas (Hwang *et al.*, 2021) (Fig. 3). Así, se ha sugerido que los estresores ambientales ejercen una presión selectiva sobre los virus para que busquen refugio dentro de las células hospederas (Busse *et al.*, 2022).

Hwang *et al.* (2021) proponen un modelo mutualista específico de interacción entre virus y hospederos en ambientes desérticos extremos. El modelo consiste en que los virus lisogénicos codifican genes de extremotolerancia que incrementan la resistencia al estrés que generan las condiciones ambientales de los desiertos, pudiendo así mantener la supervivencia microbiana a cambio de refugio en el citoplasma o en el genoma microbiano. Estos genes se seleccionan para asegurar la supervivencia tanto del hospedero como del virus, y de esta forma estos genes se propagan entre los microorganismos, lo que resulta en una mayor aptitud de los hospederos contra el estrés ambiental a largo plazo.

Tradicionalmente, los desiertos son percibidos como ambientes “casi sin vida”, sin embargo, la evidencia de estudios en desiertos como el Atacama, el Sahara y el Namib han revelado una riqueza viral asombrosa y se ha mostrado que estas comunidades virales son dinámicas y activas.

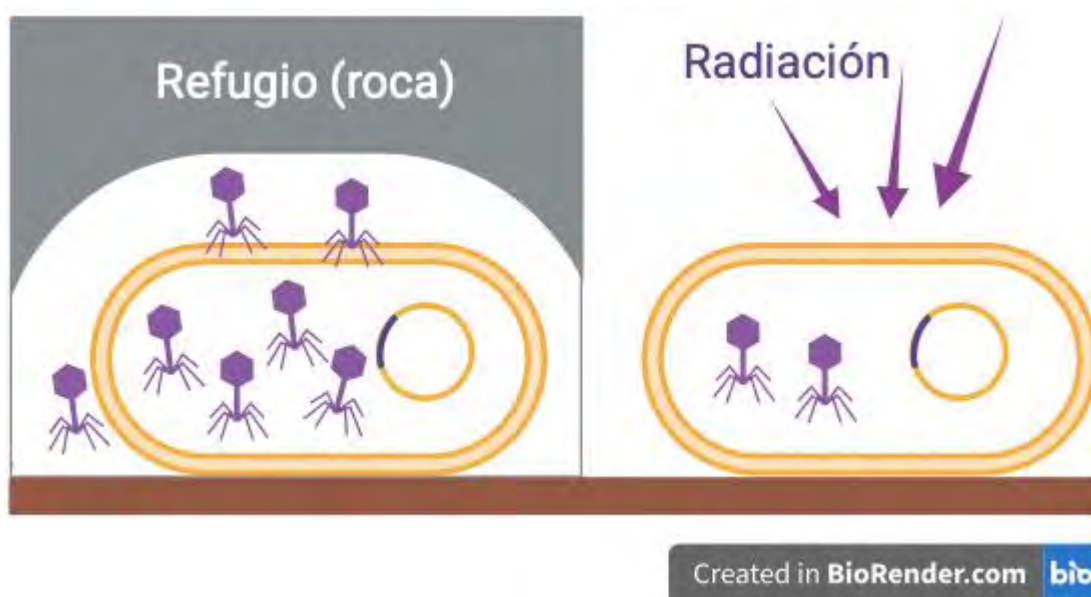


Figura 3. Representación del modelo propuesto por Hwang *et al.* (2021) de interacción entre virus y hospederos en el desierto. Ilustración creada en BioRender.com

Virus en comunidades endolíticas

En los desiertos más áridos, los microorganismos encuentran refugio en los sustratos rocosos como una estrategia de supervivencia a las condiciones extremas como la escasez de agua. A las comunidades de microorganismos que se encuentran en este tipo de habitats se le llama comunidades endolíticas.

En algunas áreas del desierto de Atacama, donde la precipitación anual es menor a 1 mm, existen comunidades microbianas que habitan dentro de nódulos de halita evaporíticos (rocas de sal) bajo



condiciones hipersalinas, alta radiación UV y ciclos de desecación y rehidratación. Recientemente, Uritskiy *et al.* (2020) reportaron virus en estos ecosistemas, los cuales mostraban altos valores de expresión génica, sugiriendo que estos virus pueden tener un papel significativo en la conformación y la estructura de las comunidades de halita. Así, la mayoría de los virus encontrados eran líticos, en lugar de lisogénicos como los observados en los suelos en altas temperaturas.

Por su parte, Busse *et al.* (2022) analizaron comunidades endolíticas de calcita, yeso e ignimbrita del desierto de Atacama y reportaron que los viromas encontrados en estas comunidades de rocas eran nuevos y diversos. Resulta interesante que en estas comunidades no existen diferencias en la abundancia de virus con ciclos líticos o lisogénicos, lo que sugiere que los hábitats endolíticos resulten más favorables para la infección viral que las de los suelos desérticos, ya que los sustratos rocosos representan protección contra la desecación, radiación solar, vientos y fluctuaciones de temperatura.

De esta forma, el análisis de las estrategias infecciosas virales puede proporcionar información sobre el papel de los virus en la estructura y funcionamiento de las comunidades microbianas.

Diversidad y abundancia de los virus del desierto

En los ambientes marinos se estima que hay alrededor de 10 partículas virales por cada célula bacteriana, sin embargo en los sistemas edáficos, esto no puede ser extrapolado debido a las condiciones heteogéneas del ecosistema, en donde las dinámicas microbianas son muy diferentes comparadas con los sistemas acuáticos ya que muestran mucha más variabilidad y están fuertemente influenciadas por los factores físico-químicos del ecosistema y disponibilidad de nutrientes. Sin embargo, algunos estudios, como los de Griffin (2007) y Gonzalez-Martin *et al.* (2013) sugieren que un gramo de suelo del desierto puede contener entre 10 y 100 millones de virus. Esto es importante porque tiene implicaciones para la salud humana y animal. Cada año se mueven millones de toneladas de polvos del desierto a través de la atmósfera (Perkins, 2001). Estas partículas de polvo pueden contener altas concentraciones de microorganismos, algunos de los cuales pudieran representar un riesgo para la salud humana. Esto recalca la importancia del estudio de la diversidad y abundancia de los virus del desierto.

Los grupos virales predominantes en los desiertos pertenecen al orden *Caudovirales* (fagos con cola), este orden domina ampliamente los viromas de desiertos representado por las familias *Siphoviridae*, *Myoviridae* y *Podoviridae*. También se han encontrado virus de arqueas en nichos

específicos como nódulos de hialita pertenecientes a las familias *Pleolipoviridae* y *Sphaerolipoviridae* (Busse *et al.*, 2022; Uritskiy *et al.*, 2020).

Existen reportes en transectos desérticos donde se muestra una mayor diversidad viral en muestras de regiones de baja precipitación comparado con sitios más secos. Diversos estudios han mostrado cómo el metabolismo microbiano y la tasa de producción viral son dependientes de la disponibilidad de agua en estos ambientes extremos. De esta forma, la abundancia viral parece fluctuar en los ecosistemas de desiertos cálidos en función de factores como las precipitaciones. Así, los patrones climáticos locales, junto con las propiedades físico-químicas del suelo, influyen fuertemente la diversidad viral y la de sus hospederos, así como la dinámica entre ellos (Van Zyl *et al.*, 2022).

Consideraciones finales y perspectivas

Los virus son las entidades biológicas más abundantes del planeta. Las bacterias y bacteriófagos han sido encontrados en todos los nichos estudiados en la Tierra. Cabe mencionar que diversos estudios sugieren que algunos bacteriófagos y sus hospederos han desarrollado estrategias para sobrevivir en ambientes que antes se creían inhóspitos.

Algunos de estas estrategias comprenden habitar refugios como nichos endolíticos e hipolíticos utilizándolos como escudo contra la radiación UV y ayudando a retener la humedad. Algunos virus emplean ciclos de vida lisogénicos, esto les permite permanecer en estado latente hasta que haya condiciones más favorables. Otra estrategia son los genes metabólicos auxiliares (AMGs) que refuerzan el metabolismo del hospedero para asegurar la producción viral. Además, estos virus actúan como reguladores del tamaño y la diversidad de las poblaciones bacterianas, evitando que una sola población monopolice los recursos limitados, resultando en una mayor diversidad microbiana. Aunado a esto, su dispersión mediante el viento y tormentas de arena permiten interacciones genéticas entre poblaciones separadas por cientos de kilómetros. Así, los virus del desierto no sólo son agentes infecciosos que soportan el rigor ambiental, sino entes biológicos que a través del intercambio de genes y la regulación poblacional, moldean la resiliencia y la trayectoria evolutiva de la vida extremófila.

Las zonas ecológicas extremas como los desiertos representan áreas poco exploradas sobre el papel de los virus en la conformación de las comunidades microbianas desérticas. Se ha sugerido una rápida coevolución bacteria-fago para explicar la estructura y la dinámica poblacional microbiana en



donde se han ido perfeccionando estrategias extraordinarias para sobrevivir. Así, el uso de herramientas metagenómicas y diversos enfoques para conocer más acerca de las interacciones virus-hospedero en estos ecosistemas puede generar información muy valiosa, no sólo sobre el papel de los virus en el moldeado de las comunidades microbianas en ambientes extremos, sino también para inspirar innovaciones biotecnológicas basadas en mecanismos de adaptación desarrollados durante millones de años.

Literatura citada

- Busse, L., M. Tisza y J. DiRuggiero. 2022. *Viruses ubiquity and diversity in Atacama Desert endolithic communities*. *Viruses* 14: 1933.
- Cherlet, M., C. Hutchinson, J. Reynolds, J. Hill, S. Sommer y G. Von Maltitz. (Eds.) *World Atlas of Desertification*, Publication Office of the European Union, Luxembourg, 2018.
- Díaz-Padilla, G., I. Sánchez-Cohen, R.A. Guajardo-Panes, A.L. Del Ángel-Pérez, A. Ruíz-Corral, G. Medina-García y D. Ibarra-Castillo. 2011. *Mapeo del índice de aridez y su distribución poblacional en México*. *Revista Chapingo serie ciencias forestales y del ambiente* 17: 267-275.
- Gonzalez-Martin, C., N. Teigell-Perez, M. Lyles, B. Valladares y D.W. Griffin. 2013. *Epifluorescent direct counts of bacteria and viruses from topsoil of various desert dust storm regions*. *Research in Microbiology* 164(1): 17-21.
- Griffin, D.W. 2007. *Atmospheric movement of microorganisms in clouds of desert dust and implications for human health*. *Clinical Microbiology Reviews* 20(3): 459-477.
- Hwang, Y., J. Rahlff, D. Schulze-Makuch, M. Schlöter y A.J. Probst. 2021. *Diverse viruses carrying genes for microbial extremotolerance in the Atacama Desert hyperarid soil*. *mSystems* 6: e00385-21.
- Makhalanyane, T.P., A. Valverde, E. Gunnigle, A. Frossard, J.B. Ramond y D.A. Cowan. 2015. *Microbial ecology of hot desert edaphic systems*. *FEMS Microbiology Reviews* 39(2): 203-221.
- Moelling K. y F. Broecker. 2019. *Viruses and Evolution - Viruses First? A Personal Perspective*. *Frontiers in Microbiology* 10: 523.

- Perkins, S. 2001. *Dust, the thermostat: How tiny airborne particles manipulate global climate*. Science News 160(13): 200-202.
- Prestel, E, C. Regeard, S. Salameitou, J. Neveu y M.S. Dubow. 2013. *The bacteria and bacteriophages from a Mesquite Flats site of the Death Valley desert*. Antonie Van Leeuwenhoek 103(6): 1329-41.
- Prestel, E., S. Salameitou y M.S. DuBow. 2008. *An examination of the bacteriophages and bacteria of the Namib desert*. The Journal of Microbiology 46(4): 364-72.
- Prigent, M., M. Leroy, F. Confalonieri, M. Dutertre y M.S. DuBow. 2005. *A diversity of bacteriophage forms and genomes can be isolated from the surface sands of the Sahara Desert*. Extremophiles 9(4): 289-96.
- Uritskiy, G, M.J. Tisza, D.R. Gelsinger, A. Munn, J. Taylor y J. DiRuggiero. 2021. *Cellular life from the three domains and viruses are transcriptionally active in a hypersaline desert community*. Environmental Microbiology 23(7): 3401-3417.
- Van Zyl, L.J., L.M. Alvarez y M. Trindade. 2022. *Journey of a Thousand Miles: The Evolution of Our Understanding of Viruses in Hot Deserts*. In: Ramond, J.B., Cowan, D.A. (eds) Microbiology of Hot Deserts. Ecological Studies, vol 244. Springer, Cham.
- Wigington, C.H., D. Sonderegger, C.P.D. Brussaard, A. Buchan, J.F. Finke, J.A. Fuhrman, J.T. Lennon, M. Middelboe, C.A. Suttle, C. Stock, W.H. Wilson, K.E. Wommack, S.W. Wilhelm y J.S. Weitz. 2016. *Re-examination of the relationship between marine virus and microbial cell abundances*. Nature Microbiology 1(3): 15024.
- Zablocki, O, E. M. Adriaenssens y D. Cowan. 2016. *Diversity and Ecology of Viruses in Hyperarid Desert Soils*. Applied Environmental Microbiology 82: 770-777.

**Cita**

Enríquez Espinoza, T., G. Mendoza Cano, T. Encinas García y A. Sánchez Paz. Virus del desierto: obras maestras de la resiliencia. Recursos Naturales y Sociedad, 2026. Vol. 12(1): 360-371. <https://doi.org/10.18846/renaysoc.2026.12.12.01.0023>.

Sometido: 24 de noviembre de 2026

Aceptado: 25 de junio de 2026

Editora asociada: Dra. Crisalejandra Rivera Pérez

Editora ejecutiva: Dra. Crisalejandra Rivera Pérez

Diseño gráfico editorial: Ing. Fca Elizabeth Villegas Carrazco