

Año 11

Número 3

Agosto – Diciembre 2025



RECURSOS NATURALES Y SOCIEDAD



REVISTA DIGITAL DE DIVULGACIÓN CIENTÍFICA

Ciencia y
Tecnología



CIB

CENTRO DE INVESTIGACIONES
BIOLÓGICAS DEL NOROESTE 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 Fischer Dorantes en la elaboración y actualización de la página WEB.

Editorial

Recursos Naturales y Sociedad
2025. Vol. 11(3): V-VIII.
<https://doi.org/10.18846/renaysoc.2025.11.11.03.0000>

Parte de la cultura tradicional que hemos heredado tiene una perspectiva claramente centrada en el ser humano. De este modo, la explotación ilimitada de los recursos naturales o la liberación de contaminantes al ambiente suele justificarse bajo argumentos favorables para el ser humano. Así, en el capítulo III del Libro Primero de la obra “*Política*” del filósofo griego Aristóteles, se menciona que “*...Si la naturaleza nada hace incompleto, si nada hace en vano, es de necesidad que haya creado todo esto para el hombre.*” Esta afirmación constituye una clara alusión al uso irrestricto de todo lo que existe en nuestro mundo, sin cuidado, sin límites y sin sensatez.

De igual forma, entre los versículos 27 y 31 del Primer Libro del Antiguo Testamento, el *Génesis*, se narra la creación del ser humano (hombre y mujer) y, tras otorgarles su bendición para multiplicarse, Dios les da el mandato de “*sojuzgar*” la Tierra y les concede autoridad para usar los peces, las aves, todos los seres vivos que se mueven sobre la Tierra y los vegetales. Sojuzgar significa, según el Diccionario de la Real Academia de la Lengua Española, sujetar o dominar con violencia algo o a alguien. De este modo, hemos pasado siglos creyendo que somos dueños absolutos de lo que nos rodea y seguimos comportándonos de manera terriblemente egoísta y violenta con nuestro planeta.

No hay duda. Están en todas partes. Han alcanzado los lugares más remotos del planeta e incluso se han encontrado en nuestro cuerpo. En un estudio reciente realizado en Barcelona, se detectaron en el 52 % de las muestras de orina y de excremento de los individuos participantes. Este hallazgo implica, de forma evidente,



que los ingerimos de manera frecuente y abundante a través de nuestros alimentos. De hecho, diversos estudios sugieren que la cantidad anual que consumimos de estos compuestos oscila entre 11 y 60 gramos. ¿A qué hacemos referencia? Por supuesto, hablamos de los cada vez más abundantes microplásticos.

Tan solo en 2022 se produjeron más de 400 millones de toneladas de plástico. Una cantidad importante de ellos (268 millones de toneladas) se gestiona de forma inadecuada, anualmente menos del 10 % se recicla, el 38.5 % se canaliza a vertederos de basura y el 11 % termina en lagos, ríos y mares. Con el tiempo, los plásticos se degradan hasta convertirse en partículas microscópicas capaces de dispersarse a enormes distancias por la acción del viento y las corrientes.

La cantidad de microplásticos en nuestros mares es tal que se ha sugerido que actualmente existen más de estas partículas en el mar que peces. Poco a poco, pero constantemente, estamos cubriendo nuestro planeta con una capa invisible de plástico. Pero ¿cuánto tiempo más permanecerá imperceptible?

La bioacumulación de plásticos en el cuerpo humano puede provocar diversos problemas de salud. En humanos, se ha reportado su asociación con trastornos respiratorios, como el asma; síntomas neurológicos, como fatiga y mareos; o inflamación intestinal y alteraciones de la microbiota intestinal. En los animales marinos, pueden causar obstrucción física, desnutrición, alteraciones hormonales e incluso la muerte.

No se trata de ser alarmistas, pero la investigación sobre los microplásticos es fundamental y necesaria. Estas partículas contaminan ecosistemas globales, desde el fondo marino hasta las cumbres de las más elevadas montañas, y su ingesta representa un riesgo emergente significativo para la salud humana, ya que han sido detectadas en órganos vitales como el cerebro, el hígado y la sangre, según estudios recientes.

En este contexto, los artículos publicados en **Recursos Naturales y Sociedad** desde hace una década han sido fundamentales no solo para entender el valor ecológico y económico de los recursos naturales que nos rodean, sino también para visibilizar su estado actual y proponer estrategias efectivas para su manejo y preservación.

Esperamos que este número de nuestra revista contribuya a crear conciencia en nuestros lectores sobre la enorme responsabilidad que tenemos de cuidar celosamente el único hogar que tenemos como especie y de proteger (no sojuzgar) a los maravillosos vecinos (virales, bacterianos, animales y vegetales) con los que coexistimos en espacio y tiempo.

Sinceramente,

Dra. Crisalejandra Rivera Pérez

Editor Ejecutiva

Dr. José Arturo Sánchez Paz

Editor Ejecutivo

Dr. Alfredo Ortega-Rubio

Editor en Jefe

Invierno 2025

Editorial

Recursos Naturales y Sociedad
2025. Vol. 11(3): V-VIII.
<https://doi.org/10.18846/renaysoc.2025.11.11.03.0000>

Part of the traditional culture we have inherited has a clearly human-centered perspective. Thus, the unlimited exploitation of natural resources or the release of pollutants into the environment is often justified on grounds of arguments that favor humans. Thus, in Chapter III of Book One of the Greek philosopher Aristotle's work "Politics," it is mentioned that *"...If nature does nothing incomplete, if it does nothing in vain, it is necessary that it has created all this for man."* This statement is a clear allusion to the unrestricted use of everything that exists in our world, without care, without limits, and without reason.

Similarly, verses 27 to 31 of the First Book of the Old Testament, Genesis, narrate the creation of human beings (man and woman) and, after giving them his blessing to multiply, God gives them the command to *"subdue"* the Earth and grants them authority to use the fish, the birds, all living creatures that move on the Earth, and the plants.

According to the Diccionario de la Real Academia de la Lengua Española, to subdue means to subject or dominate something or someone with violence. Thus, we have spent centuries believing that we are the absolute owners of our surroundings and continue to behave in a terribly selfish and violent manner toward our planet.

There is no doubt about it. They are everywhere. They have reached the most remote places on the planet and have even been found in our bodies. In a recent study conducted in Barcelona, they were detected in 52% of urine and stool samples from participating individuals.

This finding clearly implies that we ingest them frequently and in large quantities through our food. In fact, various studies suggest that the annual amount we consume of these compounds ranges from 11 to 60 grams. What are we referring to? Of course, we are talking about the increasingly abundant microplastics.

In 2022 alone, more than 400 million tons of plastic were produced. A significant amount of this (268 million tons) was managed improperly; less than 10% was recycled annually, 38.5% was sent to landfills, and 11% ended up in lakes, rivers, and seas. Over time, plastics degrade into microscopic particles that can be dispersed over enormous distances by wind and currents.

The amount of microplastics in our seas is such that it has been suggested that there are currently more of these particles than fish in the sea. Slowly but surely, we are covering our planet with an invisible layer of plastic. However, how much longer will it remain imperceptible?

The bioaccumulation of plastics in the human body can cause various health problems. In humans, it has been reported to be associated with respiratory disorders, such as asthma; neurological symptoms, such as fatigue and dizziness; or intestinal inflammation and alterations in the intestinal microbiota. In marine animals, it can cause physical obstruction, malnutrition, hormonal disturbances, and even death.

It is not about being alarmist; research on microplastics is essential. These particles pollute global ecosystems, from the seabed to the peaks of the highest mountains, and their ingestion poses a significant emerging risk to human health, as they have been detected in vital organs such as the brain, liver, and blood, according to recent studies.

In this context, the articles published in **Recursos Naturales y Sociedad** over the past decade have been fundamental not only in understanding the ecological and economic value of the natural resources that surround us, but also in highlighting their current state and proposing practical strategies for their management and preservation. We hope this issue raises awareness among our readers of the enormous responsibility we must zealously care for the only home we have as a species and to protect (not subjugate) the wonderful neighbors (viral, bacterial, animal, and plant) with whom we coexist in space and time.



Yours sincerely,

Dra. Crisalejandra Rivera Pérez

Executive Editor

Dr. José Arturo Sánchez Paz

Executive Editor

Dr. Alfredo Ortega-Rubio

Editor in Chief

Winter 2025

	Año 11	Número 3	Agosto - Diciembre de 2025
Dr. Alfredo Ortega Rubio Director General			
Dr. Bernardo Murillo Amador Director de Gestión y Desarrollo Institucional			
Dra. Alejandra Nieto Garibay Directora de Estudios de Posgrado y Formación de Recursos Humanos			
Coordinadores Programas Académicos			
Dra. Danitzia Adriana Guerrero Tortolero Acuicultura			
Dra. Crisalejandra Rivera Pérez Ecología Pesquera			
Dra. Patricia Cortés Calva Planeación Ambiental y Conservación			
Dr. Luis Guillermo Hernández Montiel Agricultura Zonas Áridas			
Coordinaciones			
MC. Jesús Alfredo De la Peña Morales Vinculación, Innovación y Transferencia de Conocimiento a la Sociedad (COVITECS)			
Dra. Paola Magallón Servín Programa de Acercamiento de la Ciencia a la Educación (PACE)			
MC. Tizoc Atenedoro Moctezuma Cano Coordinación de Atención Interna Especializada (CATIE)			
Ing. Edgar Yuen Sánchez Unidad de Tecnología de la Información y Comunicaciones			
Unidades Foráneas			
Dra. Claudia Adriana Ramírez Valdespino Unidad Guerrero Negro			
Dr. Ricardo García Morales Unidad Nayarit			
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			
MC. Rafael Palomeque Morales Subdirector de Recursos Materiales y de Servicios			
CP. Juan Carlos González Cota Subdirector de Recursos Humanos			
CP. Liz Aleida Cota Almázán Subdirectora de Contabilidad			
MC. Luis Gómez Castro Subdirector de Planeación			
Lic. Carlos Félix Subdirector Jurídico			
Dra. Martha Candelaria Reyes Becerril Jefa del Departamento de Extensión y Divulgación Científica			
Lic. Dalia Villavicencio Siqueiros Jefa del Departamento de Eventos			
	Editorial.....		VII
	Artículos		
	¿Por qué es importante el estudio de la arena para llamarlas playas limpias? <i>María Guadalupe Gutiérrez-Quevedo, Rocío Guadalupe Bernal-Ramírez, Fabiola Lango-Reynoso.....</i>		1
	Explorando aspectos ecológicos de una laguna costera. <i>Julio Medina Galván, Carmen Cristina Osuna Martínez, Martín Gabriel Frías Espericueta, Jesús Armando León Cañedo.....</i>		14
	Liraglutida, más que un medicamento de control de la diabetes. <i>Roxana Berger Ochoa, Ramón Gaxiola-Robles, Andrea Socorro Álvarez Villaseñor, Jesús Manuel Salazar Cabanillas, Tania Zenteno-Savín.....</i>		37
	What do we know about microplastics? <i>Stephanie Hernández-Carreón, Judith Virginia Ríos-Arana.....</i>		56
	El papel de las ciencias auxiliares en la biología marina: herramientas para entender la vida en el océano. <i>Carlos Francisco Rodríguez-Gómez, Vicencio de la Cruz-Francisco, Agustín de Jesús Basáñez-Muñoz, Ivette A. Chamorro-Florescano, Karla C. Garcés-García.....</i>		89
	Avances en la determinación sexual, reversión sexual, y control sexual en el camarón blanco del Pacífico <i>Litopenaeus vannamei.</i> <i>Rafael Campos-Ramos, Danitzia A. Guerrero-Tortolero.....</i>		103
	La vejiga natatoria de los peces: ¿producto de alto valor nutricional? <i>Honorario Cruz-López, Luis M. López.....</i>		124
	Microplásticos: La contaminación silente que amenaza al Golfo de California. <i>T. Enríquez Espinoza, Arturo Sánchez Paz, T. Encinas García, José Fernando Mendoza Cano.....</i>		133
	Cáscaras y cabeza de camarón: Fuente de quitosano con uso potencial en la industria alimentaria. <i>Cynthia Esmeralda Lizárraga Velázquez, Amada Yerén Escobedo-Lozano, Jazmín Crucita Hernández Ruíz, José Reyes Valdés Díaz.....</i>		150
	Yaaxché y chuun: dos especies arbóreas nativas de la Península de Yucatán y su potencial como fuente de fibras naturales. <i>Luis C. Gutiérrez-Pacheco y Fulgencio Alatorre-Cobos.....</i>		166
	Campylobacter jejuni: La batalla silenciosa de la ciencia para el diseño de nuevas vacunas. <i>Víctor Hernández, Carlos Angulo, Elizabeth Monreal-Escalante, Bernardo Bañuelos-Hernández, Reyna Romero.....</i>		179

Biocompositos: Una nueva forma de estabilización de enzimas derivadas de fagos. <i>Metzli G. Valencia-Zavala, Jorge A. Sánchez-Burgos, César S. Cardona-Félix, María Z. Juárez-Cortés.....</i>	205
Chayote (<i>Sechium edule</i>): un recurso genético con gran riqueza metabólica y valor biomédico. <i>Jorge David Cadena-Zamudio, Marco Antonio Ramírez-Mosqueda, José Luis Aguirre-Noyola, Alma Armenta-Medina, María Isabel Iñiguez-Luna.....</i>	221
Genes en movimiento: la migración y el flujo génico como motores de diversidad genética. <i>Marlen Sabina Alvarado-Cárdenas, Juan Pablo Enríquez-Ruíz, Jesús Hirma Otero-Campa, Jonathan Hirma Pallanes-Dávila, Andrea Estefanía Vázquez-Puebla, Alejandro Varela-Romero, Nohelia Guadalupe Pacheco-Hoyos, José Manuel Grijalva-Chon.....</i>	240
Microalgas: Aliadas potenciales contra el calentamiento global. <i>Carlos Alejandro Pérez Rojas, María Concepción Lora Vilchis.....</i>	254
Bienestar animal en la fauna silvestre: un desafío complejo. <i>Gustavo Arnaud-Franco, Amaury Cordero-Tapia.....</i>	276
Nanopartículas de selenio en sistemas hidropónicos como estrategia para la fortificación vegetal. <i>Alejandra Jarero Hernández, Luis Hernández Adame, Paola Magallón Servín, Luis Guillermo Hernández Montiel.....</i>	297
Efectos de dosis masivas y homeopáticas de cafeína en organismos vivos, y su nivel de conocimientos social en La Paz, México. <i>Alexander Lopeztegui-Castillo, Guadalupe Fabiola Arcos-Ortega, Elizabeth M. Zavala-García, José Manuel Mazón-Suástegui.....</i>	309
Las frutas, aliadas de personas con diabetes en el combate del estrés oxidativo. <i>Cinthya Esmeralda Lizárraga Velázquez, Irma Lorena Sánchez Humarán, Amada Yerén Escobedo-Lozano, Sara Gabriela Reyna Andrade.....</i>	350
Los moluscos como hábitats vivos: la importancia de la epibiosis sobre la diversidad en los ambientes marinos. <i>Luis Gabriel Aguilar-Estrada, Nataly Quiroz-González, Elisa Serviere-Zaragoza.....</i>	363



Why is the study of sand important in order to call them clean beaches?

¿Por qué es importante el estudio de la arena para llamarlas playas limpias?

María Guadalupe Gutiérrez-Quevedo¹,
Rocío de Guadalupe Bernal-Ramírez¹, Fabiola Lango-Reynoso^{1*}

Resumen

Las zonas de playas incluyen parte de las interacciones socioculturales, ecológicas y económicas en zonas costeras. Debido a que son sistemas frágiles y complejos sus procesos de deterioro y contaminación son preocupantes, considerando su importancia su conservación. Con el paso de los años se han creado programas para el cuidado, mantenimiento y reconocimiento de éstas, que pueden ser de carácter internacional o nacional, denominados certificaciones de playa. Estas certificaciones toman en consideración varios indicadores sociales (accesibilidad, servicios, etc.) y ambientales incluyendo la calidad de las aguas; sin embargo, la calidad de las arenas de playa no es considerado en las evaluaciones ambientales para la certificación de playas. Los estudios que se han realizado de forma puntual para arenas de playa han reportado contaminantes de importancia sanitaria, estableciendo una oportunidad de estudiar en conjunto agua-arena, ya que es en las arenas donde las personas pasan la mayor parte del tiempo de estancia, realizando diversas actividades como acostarse, comer, caminar, jugar o solo tomar el sol. Así, las personas que asisten a las playas buscan que estos lugares sean agradables y limpios, pero, esto no siempre se cumple.

Palabras clave: arena de playa, calidad sanitaria de arena, playas turísticas.

¹Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Boca del Río. Veracruz, México

*Autor de correspondencia: d24990017@g.bdelrio.tecnm.mx



Abstract

Beach include parts of sociocultural, ecological, and economic interactions in coastal zones. Because they are fragile and complex systems, their deterioration and pollution are worrisome, considering their importance for conservation. Over the years, programs for their care, maintenance, and recognition have been created, which can be international or national, known as beach certifications. These certifications consider several social indicators (accessibility, services, etc.) and environmental factors, including water quality; however, beach sand quality is not typically included in environmental assessments for beach certification. Studies conducted specifically on beach sands have reported contaminants of health significance, establishing an opportunity to study water-sand set, , since it is on the sands where people spend most of their time, engaging in activities such as lying down, eating, walking, playing, or sunbathing. Thus, beachgoers seek pleasant and clean places, but this is not always the case.

Key words: beach sand, sanitary sand quality, tourist beaches.

Antecedentes

Cuando hablamos y pensamos en playas nos transportamos mentalmente a lugares paradisíacos con arena suave y aguas cristalinas, pero detrás de esta imagen ideal, las playas son ecosistemas frágiles y complejos. Una playa de arena es una franja de sedimento de una extensión variada que se extiende desde la orilla del agua de mar hasta donde encontramos tierra y vegetación terrestre, compuesta por la acumulación de arena de diferentes tamaños (finas y gruesas) de origen biológico o mineralógico, siendo el cuarzo el componente más frecuente (Zaitsev, 2012).

Las playas son sitios importantes para la sociedad, que se han convertido en centros de desarrollo cultural, donde se desarrollan celebraciones y reuniones con fines religiosos, espirituales y de bienestar emocional. Son utilizadas como inspiración y fuente de publicidad, creando una atracción para el sector inmobiliario y turístico de sol y playa, además de un sinnúmero de actividades recreativas y de ocio. Marín (2009), menciona que las playas son verdaderos espacios de servicios que cambian en las distintas etapas históricas, señalando la importancia de su conservación para el estudio del desarrollo de la sociedad y de la urbanización en las zonas costeras a lo largo del tiempo.

Ecológicamente las playas proveen hábitats únicos para gran variedad de microorganismos, plantas y animales, así como de protección para los residentes que viven cerca de ellas, por ser un amortiguador natural a los fuertes vientos y al oleaje de tormentas (Cervantes, 2019).

Las playas también tienen un papel importante en el sector económico, representado por los diversos prestadores de servicios como, por ejemplo: de hotelería y turismo, gastronomía, viajes y bienes raíces costeros. Este valor económico se ve reflejado a su vez en el ámbito laboral, de ingresos y de bienestar social en las comunidades aledañas a las playas (Cervantes, 2019).

La contaminación de las costas limita la posibilidad de utilizar las playas con fines económicos, recreativos y estéticos, degradando y destruyendo además los hábitats. Esta contaminación puede proceder de descargas directas, residuos líquidos y sólidos urbanos u otras fuentes puntuales de basura que son transportados hacia la playa por el viento y el transporte fluvial de ríos y arroyos (EPA, 2024).

¿Cómo saber cuándo una playa puede considerarse limpia?

Se han desarrollado varias herramientas de gestión cuyo objetivo es tener un control y un desarrollo sostenible de las costas. Los esquemas de certificación de playas están considerados como herramientas para el manejo sostenible de playas y su conservación (Nelson y Botterill, 2002; Marin, 2006; Zielinski y Diaz, 2014). Así, en la escala individual, local o gubernamental se pueden adoptar prácticas más adecuadas contribuyendo a la mejora del ambiente costero. En los últimos años, se han logrado avances significativos en la gestión de las playas recreativas en México. La importancia de las playas de arena como sitios turísticos ha sido reconocida oficialmente desde 2003, cuando se implementó el Programa Playas Limpias (PROPLAYAS) por parte de la Comisión Nacional del Agua, cuyo propósito principal es promover el saneamiento de las playas recreativas y llevar a cabo acciones orientadas a proteger la salud de los usuarios, mejorar la calidad ambiental e incrementar la competitividad de los destinos turísticos de sol y playa. Como parte de las acciones de este programa se crean los comités de playas limpias (CPL), los cuales promueven el saneamiento de las playas, cuencas, subcuencas, barrancas, acuíferos y cuerpos receptores de aguas asociadas a estas (Figura 1), así como contribuyen a prevenir y mitigar o corregir la contaminación para proteger y preservar las playas mexicanas (Vargas y Martínez, 2019).



Figura 1. Evaluaciones de la calidad del agua (Vargas y Martínez, 2019).

Otra certificación importante de categoría internacional es el distintivo *Blue Flag*, establecida por la FEE (Fundación Europea de Educación Ambiental), la cual opera con sede en Dinamarca desde 1981 y lo hace en el resto del mundo a través de una red de organizaciones sin fines de lucro. En México, desde el 2012, el operador de esta organización es Pronatura, una organización ambiental que tiene como misión conservar ecosistemas, flora y fauna, y promover el desarrollo de la sociedad en armonía con la naturaleza.

Uno de los objetivos del distintivo Blue Flag es conectar al público con su entorno y alentarlos a aprender más sobre él. Por ello, se deben ofrecer y promover actividades de educación ambiental, además de brindar información relevante para el sitio en términos de biodiversidad, ecosistemas y fenómenos ambientales.

La certificación “Blue Flag” se implementó en México a partir del 2012 y a la fecha hay 77 playas con esta certificación en 9 estados (Figura 2), las cuales se renuevan cada año. México se encuentra en el primer lugar en el continente americano y el 10º a nivel mundial para la temporada 2023-2024 en obtener este galardón (Blue Flag, 2024).

Como parte también del Instituto Mexicano de Normalización y Certificación, A.C. (IMEEC), se crea la certificación Playa Platino, que es un programa de desarrollo para aquellas playas que quieren impulsar la certificación y el involucramiento de la iniciativa privada, comunidades y entidades gubernamentales (IMEEC, 2024), en 2020 da comienzo con su certificación en playas del Caribe Mexicano.

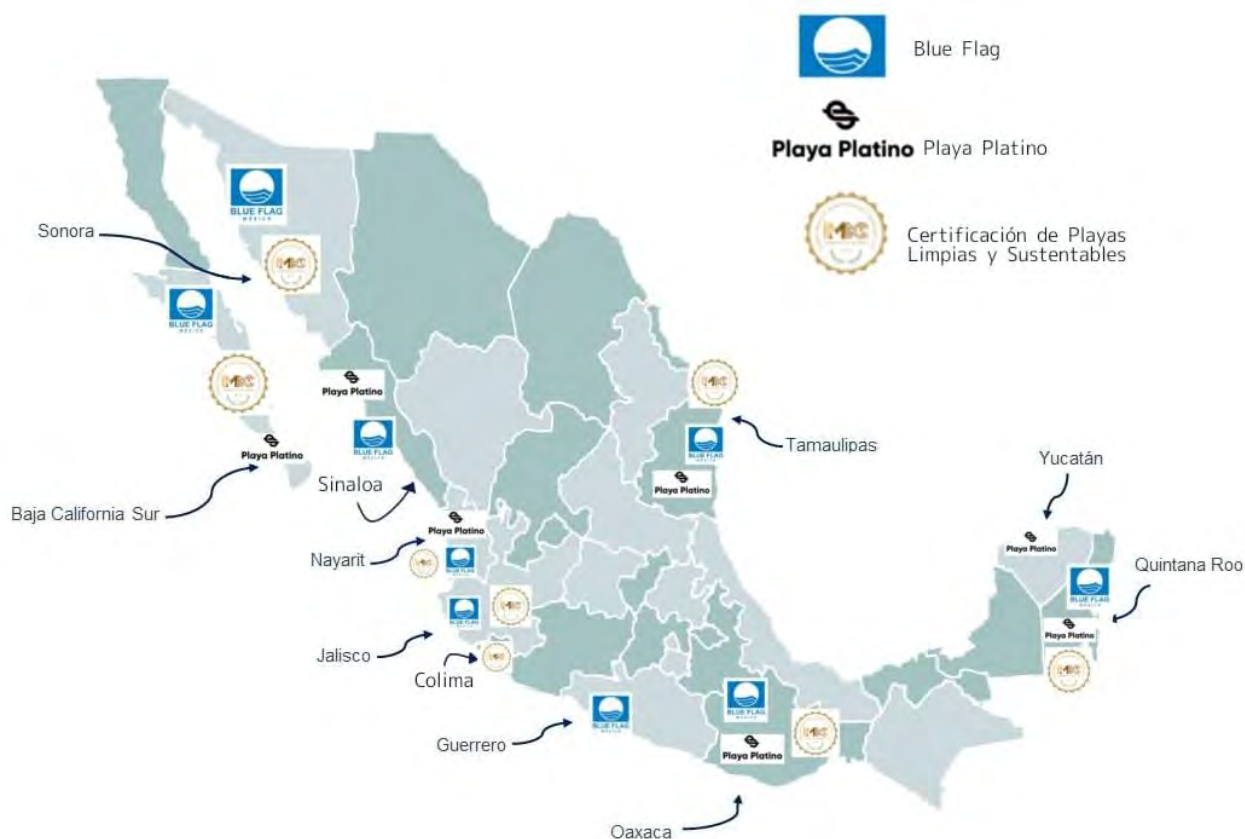


Figura 2. Representación de los estados de la república mexicana que cuentan con certificaciones de playa.

En cuanto a la normativa mexicana, la SEMARNAT (2006) elaboró y publicó la Norma Mexicana NMX-AA-120-SCFI-2006, que establece los requisitos y especificaciones de sustentabilidad de calidad de playas, esta fue modificada en 2016 (SEMARNAT, 2016). Su cumplimiento es de carácter voluntario, y la evaluación del cumplimiento de esta es realizada por el IMEEC, Instituto Mexicano de Normalización y Certificación, A.C. (Vargas y Martínez, 2019). La primera playa certificada en México fue con base en los criterios de la norma mexicana de playas limpias NMX-AA-120-SCFI-2016 el año 2008, posteriormente se han certificado 27 playas en 17 municipios (Figura 2), con una vigencia de esta certificación por 2 años (CONAGUA, 2024; IMEEC, 2024).



Tanto la norma mexicana, como la certificación “Blue Flag” y Playa Platino consideran diversos indicadores (Tabla 1):

Blue Flag	Platino	NMX-AA-120-SCFI-2016
Ambientales		
Calidad de agua	Calidad de agua	Calidad de agua
Información y educación ambiental	Educación ambiental	Educación ambiental
	Sustentabilidad	Biodiversidad
	Limpieza	Residuos sólidos
		Contaminación por ruido
Sociales		
Programa de gestión y manejo ambiental	Apropiación	
Servicios		
Seguridad y servicios		Seguridad y servicios
		Infraestructura costera

Tabla 1. Comparación de indicadores entre certificaciones

Estos tres instrumentos de certificación, así como PROPLAYAS y los Comités de Playas Limpias (CPL) conforman la estructura de gobernanza en la que opera la gestión de playas en México (García-Morales y Sternberg-Rodríguez, 2024).

Sin embargo, aunque el principal interés de estas certificaciones es el de mantener las condiciones óptimas sanitarias y ambientales de las playas turísticas (Hurtado, 2009 y Manjarrez *et al.* 2019), se considera que existe un sesgo significativo en los procesos de certificación, pues se habla de la evaluación de la calidad ambiental en playas, donde únicamente se consideran aspectos de salud a través del análisis microbiológico del agua, sin considerar otros parámetros como es el estado de la arena que conforma a las playas.

La importancia de la arena de playa

El término Playa es empleado para llamar a esa acumulación de arena que queda expuesta en la zona litoral por la acción del oleaje. La mayoría de los estudios asociados a la calidad sanitaria en playas recreativas se encuentran enfocados al riesgo por exposición al agua, sin tomar en consideración que los usuarios también mantienen un contacto prolongado con la arena (Whitman, *et al.* 2014; Villanueva, *et al.* 2024). Es en la playa donde la gran multitud de visitantes se conjunta para disfrutar del agua marina, sin embargo, es en la arena donde se realizan la mayor cantidad de actividades como cavar hoyos, enterrarse, construir castillos, comer, acostarse, caminar descalzos, remover la arena al estar parados en la orilla del mar. Estas acciones permiten que todo lo que este asociado a la arena, como son, contaminantes o microorganismos, este en contacto directo con la piel, nariz y boca, por lo cual es importante su estudio y no solo la buena calidad del agua de mar.

Actualmente, existe la preocupación de que la arena pueda ser una vía de riesgo para la salud pública, debido a que sus propiedades, como la porosidad y el área superficial (la presencia de espacios pequeños y una gran superficie interna, pueden actuar como "refugios" para las bacterias), pueden proteger a las bacterias de factores ambientales, permitiendo la supervivencia de éstas por periodos prolongados (Fernández-Rendón y Barrera-Escorcía, 2014; Whitman, *et al.* 2014; Villanueva, *et al.* 2024).

La legislación mexicana no contempla pruebas ni exige la evaluación de las bacterias coliformes en arena, al que se le considera un ambiente protector (Davies *et al.*, 1995), permitiendo que algunas especies, como *Escherichia coli*, pueda adaptarse parcialmente a condiciones salinas (Munro *et al.*, 1987; Barrera-Escorcía y Namihira-Santillan, 2024).

La presencia de formas parasitarias patógenas en la muestra de arenas es un indicio de contaminación fecal que pone en riesgo la calidad sanitaria y ambiental de las playas arenosas, y podría catalogarse como el principal riesgo microbiológico para la salud humana por el contacto con la orina, excretas humanas y excremento animal (Hurtado, 2009; Salcedo-Garduño, *et al.* 2022).

Los residuos sólidos orgánicos e inorgánicos de aguas pluviales y/ o residenciales en las playas arenosas, también son factores que deterioran la calidad sanitaria y ambiental de la zona costera, poniendo en riesgo la salud y pudiendo convertirse en un problema potencial de salud pública (Manjarrez, *et al.* 2019).



En cuanto a la contaminación por metales pesados, es una de las formas más peligrosas de contaminación para el ambiente. Un metal pesado puede describirse como un elemento químico metálico (Plomo, Cadmio, Mercurio, Cobre) o metaloide (Arsénico, Berilio), el cual es tóxico para el medio ambiente y para el ser humano proveniente de actividades antrópicas como la petrolera, agrícola, industrial, urbana y sanitaria que pueden aumentar las concentraciones de estos contaminantes a niveles tóxicos y son su principal entrada a la zona costera (Vélez y Botello, 1992). Cuando uno de estos elementos entra en contacto con nuestro cuerpo, en dependencia de la cantidad de acumulación, desde pequeñas dosis que causan malestar e irritaciones hasta grandes dosis, pueden ocurrir afectaciones más severas y desencadenar enfermedades, destacando afectaciones en órganos vitales, cáncer y finalmente la muerte (Sánchez- Santamaria, *et al.* 2022).

Una vez que se han ingresado a la zona marina, es posible que se acumulen principalmente en los sedimentos, el agua intersticial, el material suspendido y el agua superficial (Campos, 1990; Zamudio-Alemán, *et al.* 2014). Los sedimentos marinos que forman parte de las playas, actúan como integradores y concentradores de metales pesados. Dependiendo de la forma química y física de cada metal, estos pueden movilizarse y ser atrapados a través de las membranas biológicas de las diferentes especies marinas (Zamudio-Alemán, *et al.* 2014).

La contaminación de la arena de playa, así como del agua de mar, puede afectar a los usuarios causando que se enfermen o incluso que estos sitios sean cerrados temporalmente, afectando a la economía local. Los asistentes a las playas al nadar o estar en contacto directo en la arena se exponen a agentes patógenos de transmisión hídrica cuando tragan el agua, juegan con ella, presentan alguna herida o entran en contacto con ojos y nariz. Mostrando infecciones o fuertes irritaciones, la enfermedad más común que contraen es la Gastroenteritis, la cual presenta síntomas como náuseas, vómitos, dolor de estómago, diarrea, dolor de cabeza o fiebre. Los niños, los ancianos y las personas con sistemas inmunitarios débiles son los más propensos a enfermarse o contraer infecciones por entrar en contacto con agua o arena contaminada (EPA, 2024).

Discusión académica

Todd y Bowa (2016), mencionan en la propuesta de su índice de salud de playas que se requiere de un análisis más completo, y enfatiza la importancia de conocer aspectos más relevantes para los usuarios y la región a evaluar.

El estudio de las arenas de la playa puede considerarse como un complemento a los estudios ya existentes sobre la calidad del agua de mar. Se propondría establecer una relación agua-arena para determinar los parámetros que permiten tener un rango de aceptación para que una playa pueda ser considerada libre de contaminantes y saludables para que los usuarios que pasan mayor tiempo de exposición y recreación en esta área de arena.

El índice de Semeoshenkova *et al.* (2017), indica que el componente de salud y bienestar humano en las playas urbanas es de mayor importancia y el objetivo de gestión en estas debería basarse en optimizar su función para los usuarios en su bienestar.

El bienestar para los usuarios es importante, ellos buscan un lugar de recreación y esparcimiento que sea seguro, limpio y confiable, los problemas de salud que se pueden acarrear después de estar expuestos a contaminantes pueden ser perjudiciales, que podrían ser desde una parasitosis, o una irritación por exposición a metales pesados, hasta una infección en lesiones existentes.

Conocer el estado actual de la calidad de las playas públicas es fundamental para el manejo o gestión adecuada de las mismas (Arcos-Aguilar *et al.* 2021).

Una playa limpia, con un estudio previo indicador de relación agua-arena que demuestre que mantiene niveles permitidos y se encuentre libre de contaminantes, puede participar en una certificación de playa, que además genera en los turistas la confianza y seguridad de visitarlas ya que cumplen con estándares de limpieza, creando en el usuario una percepción de buena calidad y salud y no solo eso, sino que también se beneficia la economía local.



Consideraciones finales y perspectivas

Las playas son de gran importancia social y turístico, permitiendo a los que viven cerca de las zonas costeras un desarrollo económico y a los que buscan descanso el poder disfrutar de un majestuoso paisaje. Ante los fenómenos antropogénicos que cada vez son más frecuentes en las zonas costeras, persiste la preocupación de mantener estas playas saludables. Se busca por ello tener servicios de calidad, que ayuden a mantener las playas en buenas condiciones, implementando acciones de protección, el manejo de agua y arena limpias para su regulación. Por lo cual es necesario desarrollar un listado de indicadores funcionales para una evaluación de la calidad de las arenas que puedan ser integrados en los estudios científicos de las certificaciones de calidad ambiental, por ser un sitio de interés social donde se realizan la gran mayoría de actividades recreativas, así aunado a la calidad del agua de mar se implemente una visión final y complementaria de su condición.

Agradecimientos

Se agradece al Instituto Tecnológico de Boca del Río por permitir la oportunidad de estudiar un programa de Doctorado y a la SECIHTI por la beca de estudiante otorgada.

Literatura citada

- Arcos-Aguilar, R. F. Favoretto, J.A. Kumagai, V. Jimenez-Esqivel, A.L. Martinez-Ruz y O. Aburto-Oropeza. 2021. *Diving tourism in Mexico: economic and conservation importance*. Marine Policy 126 (abril): 1-2.
- Barrera-Escorcia, G. y E.P. Namihira-Santillan. 2004. *Contaminación microbiológica en la zona costera de Akumal, Quintana Roo, México*. Hidrobiológica 14 (1): 27-35.
- Blue Flag. 2018. *Criterios del Distintivo Blue Flag Playas*. En <https://www.blueflag.global/> (consultado el 18/01/2025).
- Cervantes, O. 2019. *Las playas mexicanas: retos y desafíos*. Colegio de México. Tepoztlán, México. 16 pp.

- CONABIO. (2022). *Playas de arena y rocas*. En <https://www.biodiversidad.gob.mx/ecosistemas/playas> (consultado el 15/12/2024).
- EPA (Agencia de protección Ambiental del Estados Unidos). 2024. *La importancia de la protección de las playas*. En <https://espanol.epa.gov/espanol/la-importancia-de-la-proteccion-de-las-playas> (consultado el 15/12/2024).
- García-Morales, G., y P. Sternberg-Rodríguez. 2024. *Las playas recreativas de México como sistemas socio ecológicos: importancia y gestión*. Recursos Naturales y Sociedad, Vol. 10 (Especial): 21-38.
- Hurtado-García, Y.P., C. Botero-Saltaren y E. Herrera-Zambrano. 2009. *Selección y propuesta de parámetros para la determinación de la calidad ambiental en playas turísticas del Caribe Colombiano*. Ciencia en su PC. 4: 42-53.
- IMEEC (Instituto Mexicano de Normalización y Certificación, A.C.). 2024. *Certificación de playas*. En <https://imeec.org.mx/certificaciones/playa-platino/semarnat> (consultado el 10/12/2024).
- Marín-Hernández, F. 2009. *Cultura de la playa: Sociabilización, ocio y territorio en los balnearios de la costa atlántica bonaerense, Argentina*. Argos 26(51): 48-66.
- Manjarrez, G., J. Blanco, B. González, C.M. Botero y C. Díaz-Mendoza. 2019. *Parásitos en playas turísticas: propuesta de inclusión como indicadores de calidad sanitaria. Revisión para América Latina*. Ecología Aplicada 18(1): 91-100.
- Playa platino. 2024. *Entorno limpio y sostenible*. En <https://playaplatino.com/> (consultado el 10/12/2024).
- Salcedo-Garduño, M.G., C. Reyes-Velázquez, I. Galaviz-Villa, M.D.R. Castañeda-Chávez, F. Lango-Reynoso y C.A. Dávila Camacho. 2023. *Presencia de formas parasitarias de importancia zoonótica en arena de playas que inciden en el Parque Nacional Sistema Arrecifal Veracruzano*. Hidrobiológica 33(2): 223-230.
- Sánchez-Santamaría, S.I., J.L. Servín-González y C.F. Villalpando-Durán. 2022. *Metales pesados: los enemigos invisibles que están por todas partes*. Ciencia UNAM. En: <https://ciencia.unam.mx/leer/1261/metales-pesados-los-enemigos-invisibles-que-están-por-todas-partes> (consultado el 10/12/2024).
- Semeoshenkova, V., A. Newton, A. Contin y N. Greggio. 2017. *Development and application of an integrated Beach Quality Index (BQI)*. Ocean and Coastal Management 143 (August):74-86.
- Todd, D.J. y K. Bowa. 2016. *Development of beach health index for the Gold Coast, Australia*. Journal of Coastal Research 1(75): 710-714.



- Vargas, M.A., y C. Martínez, C. 2019. *Programa de playas limpias*. En: Pinilla-Herrera, M.C., y A. Cruz-Angón (Eds). Sexto informe Nacional de México ante el Consejo Nacional de Biodiversidad. CONABIO. México D.F. 640-645 pp.
- Villanueva-Vargas D.D., C.L. Fernández-Rendón y P. Ramírez-Romero. 2024. *Estudio de calidad sanitario de agua y arena de playas recreativas en Acapulco, Guerrero*. Revista MIX-TEC 4 (7): 27-45.
- Zaitsev, Y. 2012. *A key role of sandy beaches in the marine environment*. Journal Black Sea/ Mediterranean Environment 18 (2): 114-127.
- Zamudio-Alemán, R.E., M.D.R. Castañeda-Chávez, F. Lango-Reynoso, I. Galaviz-Villa, I.A. Amaro-Espejo y L. Romero-González. 2014. *Metales pesados en sedimento marino del Parque Nacional Sistema Arrecifal Veracruzano*. Revista Iberoamericana Ciencia 1(4): 159-168.
- Zielinski, S., y C. Díaz. 2014. *Los esquemas de certificación de playa turísticas en América Latina*. Evaluación del componente socio-cultural y el nivel participativo Estudios y Perspectivas en Turismo 23(1): 156-175.

Cita

Gutiérrez-Quevedo, M.G., R. de G. Bernal-Ramírez y F. Lango-Reynoso. ¿Por qué es importante el estudio de la arena para llamarlas playas limpias?. Recursos Naturales y Sociedad, 2025. Vol. 11 (3): 01-12. <https://doi.org/10.18846/renaysoc.2025.11.11.03.0001>

Sometido: 4 de abril de 2025

Aceptado: 4 de junio de 2025

Editora asociada: M.C. María Ruth Ochoa Díaz

Editora ejecutiva: Dra. Crisalejandra Rivera-Pérez

Diseño gráfico editorial: Ing. Francisca Elizabeth Villegas Carrasco

Exploring ecological aspects of a coastal lagoon

Explorando aspectos ecológicos de una laguna costera

Julio Medina Galván^{1*}, Carmen Cristina Osuna Martínez¹,
Martín Gabriel Frías Espericueta¹ y Jesús Armando León Cañedo¹

Resumen

Los sitios Ramsar son ecosistemas de agua dulce o marinos muy productivos, diversos y de gran valor ecológico. Sin embargo, son muy frágiles y vulnerables ante los impactos de los fenómenos naturales y de origen humano. Por ello, en el presente estudio, se indagaron aspectos ecológicos del ecosistema lagunar Huizache-Caimanero (LHC), con la finalidad de conocer su salud ambiental y apoyar acciones de manejo para su conservación. El sistema lagunar se encuentra en la costa sur de Sinaloa (sureste del Golfo de California). Se implementaron criterios propuestos por la Comisión para la Cooperación Ambiental para la elaboración de una ficha ecológica, mediante la cual se mostraron el estado y la tendencia ambiental de la LHC. El análisis de la información indicó que el ecosistema tiene un estado crítico y una tendencia en deterioro. La información obtenida reveló que la LHC ha sido afectada en relevancia ecológica, al exponer un elevado daño ambiental con la degradación de hábitats desde décadas anteriores, por lo que se recomienda considerar pausar el crecimiento de las actividades humanas e implementar programas de rehabilitación. En este sentido, la investigación científica debe aumentar los esfuerzos sobre estudios de calidad del agua y de biodiversidad. Además, es urgente establecer y mantener programas de monitoreo a mediano y largo plazo para mejorar las condiciones ambientales.

Palabras clave: Sitios Ramsar, ficha ecológica, actividades humanas, salud ambiental.

¹Facultad de Ciencias del Mar, Universidad Autónoma de Sinaloa. Paseo Clausen S/N Col. Los Pinos, C.P. 80000, Mazatlán, Sinaloa, México

*Autor de correspondencia: jmedinag.facimar@uas.edu.mx



Abstract

Ramsar sites are freshwater or marine ecosystems that are highly productive, diverse and of great ecological value. However, they are very fragile and vulnerable to the impacts of natural and human-caused phenomena. Therefore, in the present study, ecological aspects of the Huizache-Caimanero lagoon ecosystem (LHC) were investigated, with the aim of understanding its environmental health and supporting management actions for its conservation. The lagoon system is located on the southern coast of Sinaloa (southeast of the Gulf of California). Criteria proposed by the Commission for Environmental Cooperation were implemented for the preparation of an ecological record, through which the state and environmental trend of the LHC were shown. The analysis of the information indicated that the ecosystem is in a critical state and is trending downwards. The information obtained revealed that the LHC has been affected in ecological relevance, by exposing high environmental damage with the degradation of habitats from previous decades, so it is recommended to consider pausing the growth of human activities and implementing rehabilitation programs. In this regard, scientific research should increase efforts on water quality and biodiversity studies. In addition, it is urgent to establish and maintain medium- and long-term monitoring programs to improve environmental conditions.

Key words: Ramsar sites, ecological data sheet, human activities, environmental health.

Introducción

Los humedales o sitios Ramsar, como señala la Convención de Ramsar en 1971, son “aquellas extensiones de marismas, pantanos, turberas o aguas de régimen natural o artificial, permanente o temporal, estancado o corriente, dulce, salobre o salado, incluyendo las extensiones de agua marina cuya profundidad en marea baja no exceda de seis metros” (Ramsar, 2022). Estos ecosistemas son de gran importancia ecológica, puesto que brindan funciones vitales como la conservación de la biodiversidad; son refugio ecológico para una gran variedad de aves, además, son zonas de reproducción, alimentación y crecimiento de fauna acuática (Ignatyeva *et al.*, 2022). Sin embargo, las actividades humanas como la industria, agricultura, acuicultura, turismo y la pesca afectan la salud de estos ecosistemas (Medina-Galvan *et al.*, 2021), debido al cambio de uso del suelo, la explotación de recursos naturales y la contaminación por aguas residuales (Reyes-Velarde

et al., 2023). Los daños ocasionados también son un riesgo para la salud humana, específicamente cuando los asentamientos humanos y sus actividades invaden el espacio de estos hábitats (Moreno-Sánchez, 2022). Lamentablemente, el mal manejo de los sitios Ramsar conlleva a su degradación y pérdida (Ruiz-Santillán *et al.*, 2019). Por tal motivo, es importante evaluar los daños generados por las actividades humanas para conservar sus servicios ecosistémicos y socioeconómicos (estético, cultural y recreativo) que contribuyen al bienestar humano (Martínez-García y Lara Domínguez, 2023). En este sentido, las fichas ecológicas son un instrumento que nos permiten conocer la condición de los bienes y servicios ambientales que brindan los ecosistemas costeros y nos permiten establecer estrategias de planificación para su protección, conservación y mejor aprovechamiento (Arreola-Lizárraga *et al.*, 2019).

México se adhirió a la Convención de Ramsar el 4 de noviembre de 1986 y reconoce actualmente 144 humedales que constituyen un recurso de gran valor económico, cultural, científico y recreativo (CONANP, 2023). El sistema lagunar Huizache-Caimanero, Sinaloa, México, fue inscrito en la lista de Humedales de Importancia Internacional el 2 de febrero de 2007, por su importancia ecológica, mediante la designación de sitio Ramsar denominado: “Laguna Huizache-Caimanero” (LHC, en adelante) (Ramsar, 2008). Un ecosistema que por muchos años fue considerado el más productivo en cuanto a recursos pesqueros comerciales de la región, además, ostentando un extenso bosque de manglares. El objetivo del presente estudio fue conocer la salud ambiental de la LHC, analizando aspectos ecológicos elementales para apoyar acciones que ayuden a su conservación.

Antecedentes

En el mundo, los problemas que llaman el interés son los relacionados con el daño al ambiente, por las consecuencias que derivan a la destrucción de hábitats y extinción de especies. Aunque las actividades humanas son de gran importancia económica, su manejo inadecuado afecta la salud de los ecosistemas costeros (Vásquez *et al.*, 2023). En la LHC se han realizado diversos estudios, los cuales han exhibido las afectaciones en el ecosistema, por ejemplo, la mala calidad del agua, la presencia de organismos patógenos se ha perdido bastante biodiversidad marina y también ha disminuido el área de manglar; esto como consecuencia de la transformación del suelo a áreas agrícolas y acuícolas (CONANP, 2016; Millán-Aguilar *et al.*, 2020). Cabe señalar que las contribuciones que se exponen en el presente trabajo cuentan con más de 10 años de antigüedad (Tabla 1).

**Tabla 1.** Contribuciones de los trabajos realizados en el sistema lagunar Huizache-Caimanero.

Estudio	Año	Fuente
Generalidades ictiológicas del sistema lagunar costero.	1975-76	Amezcuca-Linares (1977)
Estado ambiental y de contaminación.	1994-95	Galindo-Reyes et al. (1997)
Modificaciones en los patrones de cobertura y uso de suelo.	1997	Ruiz-Luna y Berlanga-Robles (1999)
Brote de gastroenteritis por la pandemia <i>Vibrio parahaemolyticus</i> O3 : K6 en México.	2003-04	Cabañillas-Beltrán et al. (2006)
La contaminación por nitrógeno y fósforo en Sinaloa.	2002	Páez-Osuna et al. (2007)
Ficha Informativa de los Humedales de Ramsar.	2005	Ramsar (2008)
Evaluación de la presencia de <i>V. parahaemolyticus</i> en camarón blanco (<i>Litopenaeus vannamei</i>).	2012	Rodríguez-Camacho et al. (2014)
Fichas técnicas de las lagunas costeras del estado de Sinaloa, México.	2013-14	Romero-Beltrán et al. (2014)
Fichas de evaluación ecológicas del noroeste de México.	2012	CONANP (2016)
Producción de hojarasca en manglares.	2012-13	Flores-Cárdenas et al. (2016)
Métricas del paisaje y estado de conservación.	1990-2011	Millán-Aguilar et al. (2020)
Poblaciones reproductivas de aves playeras en humedales del noroeste mexicano.	2017	Carmona et al. (2020)

Ubicación del sitio Ramsar (LHC)

La LHC está ubicada en la costa sur de Sinaloa (sureste del Golfo de California), entre los 22°55'-23°05' de latitud norte y los 105°55'-106°17' de longitud oeste (Fig. 1). Cuenta con una superficie promedio total de 175 km², con una profundidad media de 0.65 m y con un volumen total de 113,750,000 m³ (Romero-Beltrán *et al.*, 2014). Su clima es cálido subhúmedo con los mayores registros de lluvia en verano, durante esta época la temperatura es mayor a 22 °C y en invierno menor a 18 °C (García, 1973). Las principales actividades humanas que se desarrollan en la zona son: (1) cultivo de camarón (165 ha de cultivo); abastecen los estanques de agua de la laguna y el agua utilizada la regresan directamente a la misma; (2) la agricultura de riego (5,584 ha) y de temporal (22,738 ha). La población aledaña al sistema lagunar cuenta con aproximadamente 38,706 habitantes (INE, 2023).



Figura 1. Localización del sistema lagunar Huizache-Caimanero en el sur del estado de Sinaloa.



Elaboración de la ficha técnica de evaluación ecológica

La elaboración de este material se enfocó en evaluar los criterios de la Comisión para la Cooperación Ambiental, para hacer una ficha de evaluación ecológica y mostrar el estado y tendencia del sitio RAMSAR (Arreola-Lizárraga *et al.*, 2019), la cual, es un recurso visual donde se resumen las condiciones de tres componentes fundamentales del ecosistema: agua, hábitat y biota (Tabla 2), a partir de preguntas estandarizadas que, para su respuesta, se usan dos tipos de calificación referentes al **estado** y a la **tendencia**. El estado se describe mediante cinco colores, cuya escala va desde crítico (lo peor) hasta superior (lo mejor), pasando por aceptable; o sin determinar, cuando no es posible emitir un dictamen (Fig. 2). La tendencia es descrita mediante cinco símbolos, cuya escala va desde en rápido deterioro hasta en rápida mejoría (extremos que suponen que probablemente se alcance un estado distinto en un plazo de cinco años), pasando por estable (se considera poco probable que sufra cambios más allá de la variación normal); o sin determinar, cuando no hay suficiente información para evaluar (Fig. 2). Tanto para la calificación de **estado** como de **tendencia**, se anota No Aplicable (NA) cuando se trata de una variable que no se presenta en el sitio de estudio correspondiente.

La información que se utilizó en el presente trabajo para realizar la evaluación ecológica proviene de artículos científicos, capítulos de libro, memorias en extenso, tesis e informes técnicos, exclusivamente.

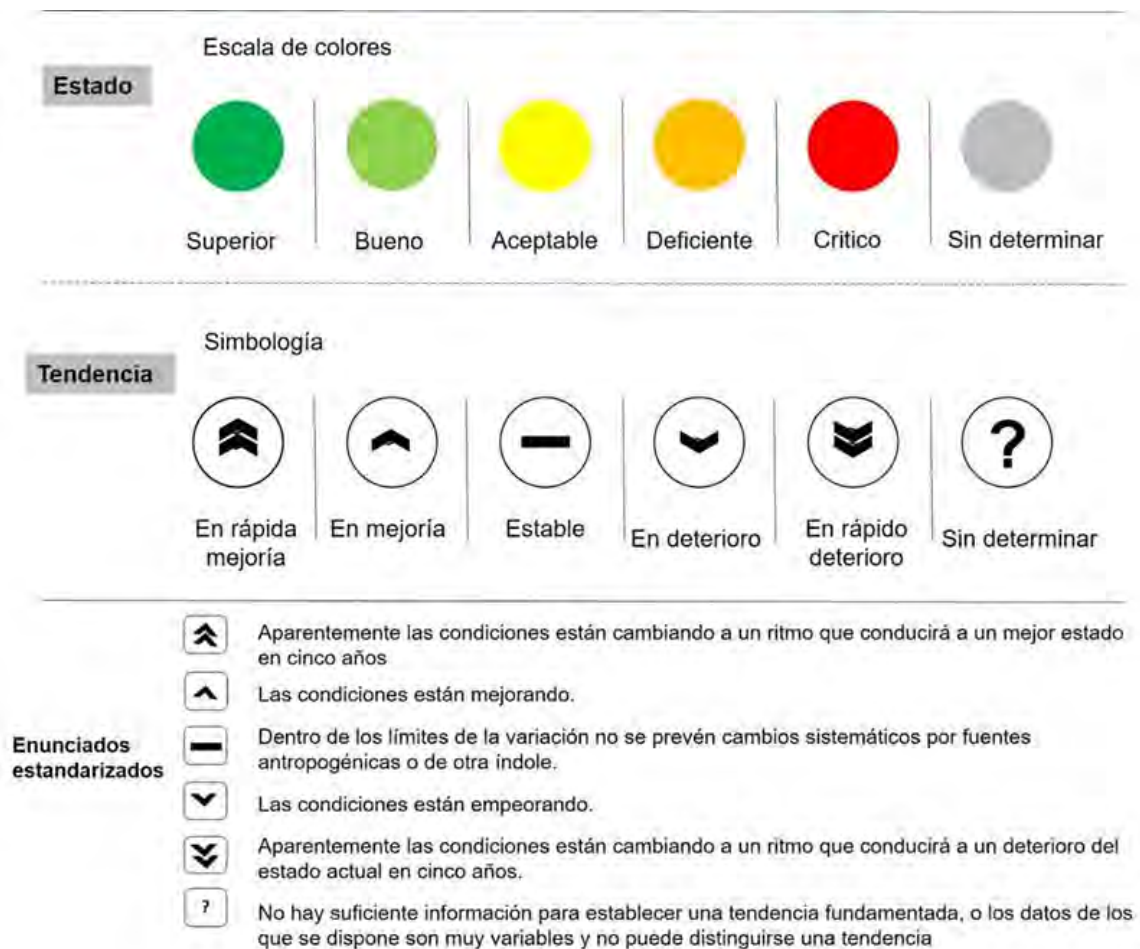


Figura 2. Colores y símbolos para determinar el estado y la tendencia del sitio Ramsar (en relación con las 12 preguntas estandarizadas).

**Tabla 2.** Preguntas guía para la elaboración de la ficha de evaluación ecológica (Minjares et al., 2019).

Elemento		Preguntas
Agua	1	¿En qué medida influyen las actividades humanas en la calidad y los flujos del agua, y cuáles son los cambios que se observan?
	2	¿Hasta qué punto las alteraciones en las cargas de nutrientes afectan la salud de los ecosistemas, y cómo están cambiando tales cargas?
	3	¿En qué medida las condiciones del agua suponen un riesgo para la salud humana, y qué cambios se registran?
Hábitat	4	¿En qué medida influyen las actividades humanas en la extensión y calidad del hábitat, y cuáles son los cambios que se observan?
	5	¿Hasta qué punto los contaminantes presentes en el hábitat o en la red trófica afectan a los recursos vivos o la calidad del agua, y qué cambios presentan estos?
	6	¿En qué medida la alteración de hábitats-incluidas modificaciones en la extensión y distribución de los principales tipos de hábitat-afecta la salud de los ecosistemas, y qué cambio se registran en tal alteración?
Recursos vivos	7	¿En qué medida influyen las actividades humanas en la calidad de los recursos biológicos, y cuáles son los cambios que se observan?
	8	¿Cuál es el estado que guarda la biodiversidad y como está cambiando?
	9	¿Cuál es el estado que guardan las especies explotadas y cómo está cambiando?
	10	¿Cuáles son el estado y las condiciones de las especies clave, y qué cambios presentan?
	11	¿Cuál es el estado y las condiciones de las especies en riesgo, y qué cambios presentan?
	12	¿Cuál es el estado que guardan las especies exóticas y que cambios presentan?

Análisis y discusión













Agua

1. Influencia de las actividades humanas en la calidad y los flujos del agua

Los principales aportes de agua dulce a la LHC provienen del Río Presidio y del Río Baluarte, con un promedio anual de 962 y 1,639 Mm³ (millones de metros cúbicos) respectivamente (CONAGUA, 2015; 2020). Sin embargo, en los últimos años este aporte de agua ha decrecido drásticamente, como consecuencia del represamiento artificial (construcción de la represa Picachos en 2009) (Millán-Aguilar et al., 2020). Respecto a la contribución de agua dulce (aguas residuales) por parte de las actividades humanas; la actividad agrícola aporta 509,589 m³/día, uso urbano 1,479 m³/día, granjas camaronícolas 47,250 m³/día y (Romero-Beltrán et al., 2014).

Una práctica común que llama la atención de las granjas que cultivan camarón, es que toman el agua de la laguna para el llenado de los estanques y la vuelven a descargar a la misma sin un tratamiento previo. Los estudios sobre calidad del agua muestran que las aguas residuales han provocado contaminación bacteriana que ponen en riesgo la salud pública por el consumo de pescados y mariscos (CONANP, 2016). De acuerdo con la información generada, se considera a la LHC como un ecosistema en estado crítico y con tendencia en deterioro (Tabla 3).

Tabla 3. Estado y tendencia del sitio Ramsar: Sistema lagunar Huizache-Caimanero.

Elemento	Pregunta	Evaluación
Agua	1. Actividades humanas	
	2. Nutrientes y salud de los ecosistemas	
	3. Salud humana	
Hábitat	4. Actividades humanas	
	5. Contaminantes	
	6. Extensión y distribución	
Recursos biológicos	7. Actividades humanas	
	8. Biodiversidad	
	9. Extracción de especies	
	10. Especies clave	
	11. Especies en riesgo	
	12. Especies exóticas	

Fuente: Elaboración propia



2. Efectos por aporte de nutrientes en los cuerpos de agua costeros

La LHC recibe 151 ton/año (toneladas por año) de nitrógeno (N) y 18 ton/año de fósforo (P) provenientes de las aguas residuales del cultivo de camarón y de la escorrentía pluvial (Romero-Beltrán *et al.*, 2014), dichos nutrientes superan las concentraciones límites permisibles establecidas por la Norma Oficial Mexicana (NOM-001-SEMARNAT-1996). Sobre los efectos, las constantes descargas de aguas residuales han provocado cambios en la calidad del agua alterando los parámetros físicos, químicos y biológicos (CONANP, 2016). El índice de estado trófico TRIX (Tropic Index; TRIX, por sus siglas en inglés) empleado por Romero-Beltrán *et al.*, 2014 para determinar la calidad de agua mostró valores elevados de floraciones algales y muy baja transparencia de la columna de agua que ponen en riesgo la vida acuática. De acuerdo con la información generada, se considera a la LHC como un ecosistema en estado crítico y con tendencia en deterioro (Tabla 3).

3. Condiciones del agua como riesgo para la salud humana

La LHC recibe altas cantidades de sedimento y materia orgánica por parte de las aguas residuales y la escorrentía pluvial del valle agrícola (Galindo-Reyes *et al.*, 1997; CONANP, 2016). En un análisis de muestras de agua y sedimento, se registró la presencia de pesticidas, como el lindano, considerado altamente tóxico, pero sus concentraciones no superaron los límites permitidos (Informe del Comité de Criterios de Calidad del Agua, 1972); no obstante, se consideran un riesgo para la salud pública debido a que se puede acumular en los tejidos de peces y mariscos e incorporarse a través de la pirámide alimenticia (Serrano, 2015). Otros estudios han registrado la presencia de organismos patógenos, como, por ejemplo, en verano de 2004 la bacteria *V. parahaemolyticus* O3:K6 en camarón blanco (*L. vannamei*), que afectó a más de 1,250 personas, asociado con el primer brote de gastroenteritis que ocurrió en El Rosario y Mazatlán, Sinaloa (Cabanillas *et al.*, 2006). Además, se han encontrado virus como el de hepatitis A y norovirus, relacionados con contaminación fecal por la falta de sistemas de drenaje en las poblaciones cercanas (Hernández-Morga, 2007). En el año 2009, se presentó nuevamente una emergencia sanitaria, puesto que ocurrió una intoxicación de personas por el consumo de camarones, lo que causó una pausa en la comercialización en restaurantes de la zona (CONANP, 2016). En el verano de 2012, se volvió a observar *V. parahaemolyticus* en camarón blanco (Rodríguez-Camacho *et al.*, 2014). La transmisión de estos patógenos es por el consumo de agua contaminada, pescados y mariscos crudos (Du *et al.*, 2024). Con base en lo anterior, la LHC se considera en estado crítico y con tendencia en deterioro (Tabla 3).

Hábitat

4. Influencia de actividades humanas en la extensión y calidad del hábitat

Se ha estimado que la cobertura del agua de la LHC ha tenido una reducción de 160 has/año y ha aumentado el área pantanosa a una tasa de 225 has/año. La deforestación es otra actividad ha causado daño en el ecosistema, se han calculado pérdidas de bosque de manglar de 47 has/año y de bosque seco 519 has/año, contrario a esto, la agricultura se crece a una tasa de 450 has/año (Ruiz-Luna y Berlanga-Robles, 1999; Páez-Osuna *et al.*, 2007). Por otra parte, durante el periodo 1993-2011 se observó una expansión del cultivo de camarón con crecimiento intermitente durante la década de 1990–2000 y un aumento paulatino después de la década del 2000, en la actualidad, se señala que en la LHC se ha perdido considerablemente la cobertura de manglar (Millán-Aguilar *et al.*, 2020). Además, el crecimiento constante de la agricultura, la ganadería y en especial el cultivo de camarón que abarcan parte de la zona de inundación han reducido el espejo de agua de la LHC con afectaciones en el funcionamiento natural de las mareas (Fig. 3), lo que ha dañado al ecosistema de la selva baja donde se observaban algunos mamíferos y reptiles (CONANP, 2016). Dado el grado de alteración de la LHC, su estado es crítico y con tendencia en deterioro (Tabla 3).

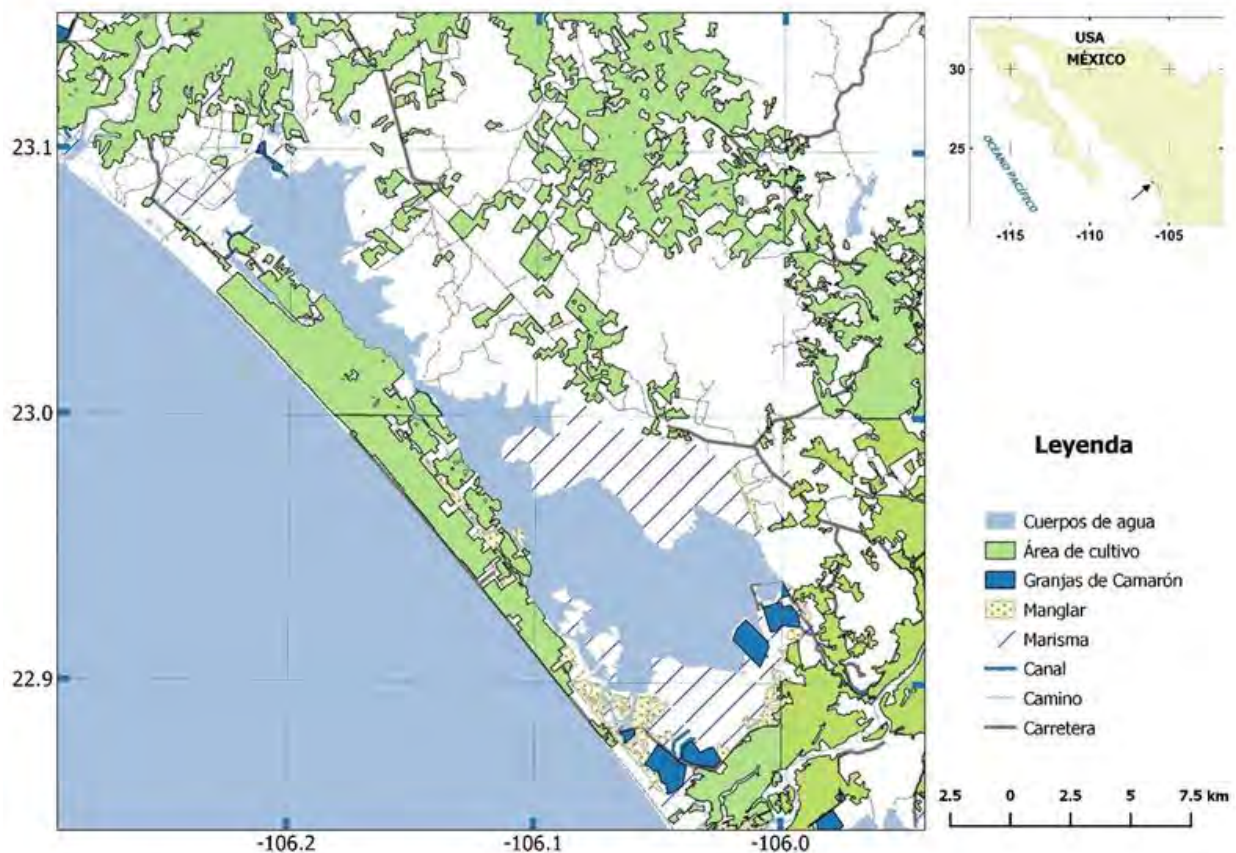




Figura 3. Sistema lagunar Huizache-Caimanero, cobertura del área de manglar, marismas, canales y las actividades humanas desarrolladas en la zona.

5. Efectos de los contaminantes en el hábitat y recursos biológicos

La actividad humana que genera el mayor daño a este sitio Ramsar es la agricultura, debido al aporte de agentes contaminantes como el lindano, pesticida que se ha encontrado con mayor frecuencia en agua y sedimentos, seguido del aldrin, aunque ambos no superaron los niveles permisibles por la Administración Federal de Control de la Contaminación del Agua, pero si llegan a ser un riesgo para los peces y aves, por su alta toxicidad, persistencia y acumulación en el organismo (Serrano, 2015). Los nutrientes como el N y P son otros contaminantes presentes en la LHC, cuyas altas concentraciones se derivan del uso desmedido de fertilizantes agrícolas y de los efluentes del cultivo de camarón que afectan el equilibrio natural de la laguna, (Páez-Osuna *et al.*, 2007). El índice de estado trófico TRIX mostró que la laguna presenta síntomas de contaminación con un promedio anual de 8.1 en la escala TRIX, correspondiente a un cuerpo de agua con sobre enriquecimiento de materia orgánica (Romero-Beltrán *et al.*, 2014). Otra fuente de contaminación es el uso de alimentos balanceados que contiene cianuro (producto químico altamente dañino) utilizados en la pesca y que cada vez más se manifiestan efectos adversos en el agua (CONANP, 2016). Con base en lo anterior, el ecosistema está considerado como en estado crítico y con tendencia en deterioro (Tabla 3).

6. Alteración de hábitats y efectos en la salud de los ecosistemas

La alteración del hábitat en la LHC está asociada al uso de suelo por las actividades humanas como la acuicultura, la ganadería, la agricultura, el desarrollo urbano/turístico, así como la pesca. Los trabajos de construcción de canales han contribuido a la acumulación de sedimento, a la modificación de la línea de costa, y a la pérdida de ecosistemas importantes como manglares (CONANP, 2016). Otro factor importante es el represamiento de los ríos, lo cual provoca que llegue menos agua a la laguna, incrementándose la salinidad por más tiempo a través del año, esto ocasiona alteraciones en el desarrollo estructural de los ecosistemas de manglar (Flores-Cárdenas *et al.*, 2016); los estudios sobre el estado de salud de manglares indican que la especie con mayores signos de estrés ante dichas condiciones fue el mangle negro *Avicennia germinans*. Por otro lado, los registros de la disminución de la cobertura de manglar indican tasas de variación anual de 0.99% (Millán-Aguilar *et al.*, 2020). Con base en lo anterior, se considera a la LHC en estado crítico y con tendencia en rápido deterioro (Tabla 3).

Recursos vivos

7. Impacto de las actividades humanas en la calidad de los recursos vivos

Históricamente, la LHC fue reconocida por su alta productividad en recursos biológicos, principalmente en capturas de pesca comercial y se caracterizaba por sus extensos ecosistemas de manglares (Ramsar, 2008). Sin embargo, actualmente se han registrado disminuciones en las capturas de camarón, con afectaciones causadas por la construcción de canales y dragados, así como la transformación del uso del suelo a terrenos agrícolas y acuícolas (CONANP, 2016). Asimismo, se ha documentado que la cobertura de manglar ha disminuido considerablemente (Millán-Aguilar *et al.*, 2020). Por otro lado, las descargas de aguas residuales ocasionan efectos nocivos en las lagunas costeras, por ejemplo, los reflejos del daño ambiental es el incremento del fitoplancton (algas marinas), reducción del oxígeno disuelto en el agua hasta llegar a condiciones con ausencia de oxígeno y mortalidad masiva de peces (Ruiz-Ruiz, 2017). En este caso, la LHC presenta un estado crítico y con tendencia en rápido deterioro (Tabla 3).



8. Estado de la biodiversidad

Los estudios sobre peces han proporcionado información de su biodiversidad, con registros de 60 especies de las cuales 8% fueron dulceacuícolas, 8% estuarinas. Las familias más representadas en diversidad son: Carangidae (9 especies), Gobiidae (11 especies), Clupeidae (4 especies), Gerreidae, Scianidae y Engraulididae (5 especies c/u), Ariidae, Lutjanidae, Mugilidae, Centropomidae, Poecilidae, Pomadasydidae y Solidae (3 especies) (Amezcu-Linares, 1977; Ramsar, 2008). En resumen, la laguna funciona como hábitat temporal o permanente de 83 especies de peces que pertenecen a 29 familias, que incluyen peces de agua dulce (Ramsar, 2008). Los registros que se tienen sobre camarón muestran cuatro especies: *L. vannamei*, *L. stylirostris*, *L. californiensis* y *L. brevisrostris*. Siendo *L. vannamei* el más abundante (Félix-Ortiz et al., 2017). Con respecto a la biodiversidad de aves, la Comisión Nacional para la Conservación de la Biodiversidad (CONABIO) reporta que en la laguna invernan un total de 75,000 pelícanos blancos (*Pelicanus erythrorhynchus*) y, por lo menos, siete especies de patos; también se han registrado hasta 200,000 avocetas (*Recurvirostra americana*) (Ramsar, 2008). Para el caso de las aves playeras en estado de reproducción, se observaron cinco especies durante el año 2017, con registro de 467 individuos de *Himantopus mexicanus*, 426 de *R. americana*, 7 de *Haematopus palliatus*, 2 de *Charadrius vociferus* y 8 de *C. nivosus*, esta última especie cuenta con presencia de nidos y huevos y su estatus es de especie amenazada, mientras que, *C. vociferus* está en peligro de extinción (Tabla 4) (Carmona et al., 2020). Con base en la información expuesta, se califica como deficiente y con tendencia en rápido deterioro (Tabla 3).

Tabla 4. Registro de las especies con estatus de conservación en el sistema lagunar Huizache-Caimanero

Especie	Estatus
Vegetación	
Mangle rojo (<i>Rhizophora mangle</i>) ¹	Protección especial
Mangle blanco (<i>Laguncularia racemosa</i>) ¹	Protección especial
Mangle negro (<i>Avicennia germinans</i>) ¹	Protección especial
Aves	
Playero polar (<i>Numenius borealis</i>) ¹	En peligro de extinción
Cenzontle (<i>Minus polyglottos</i>) ¹	En peligro de extinción
Pinzón mexicano (<i>Carpodactus mexicanus</i>) ¹	En peligro de extinción
Alcatraz (<i>Sula bebousii</i>) ¹	Amenazada
Águila pescadora (<i>Pandion haliaetus</i>) ¹	Amenazada
Charrán elegante (<i>Sterna elegans</i>) ¹	Amenazada
Pato mexicano (<i>Anas platyrhynchos</i>) ¹	Amenazada
Chortilejo blanco (<i>Charadrius nivosus</i>) ²	Amenazada
Ostrero común (<i>Haematopus palliatus</i>) ²	En peligro de extinción
Peces	
Guatopote del Fuerte (<i>Poeciliopsis latidens</i>) ¹	Vulnerable
Reptiles	
Cocodrilo de río o americano (<i>Crocodylus acutus</i>) ¹	Vulnerable
Lagarto enchaquirado (<i>Heloderma horridum</i>) ¹	Amenazada
Boa (<i>Boa constrictor</i>) ¹	Amenazada
Serpiente coralillo (<i>Micruroides eutyxanthus</i>) ¹	Amenazada
Iguana negra (<i>Ctenosaura pectinata</i>) ¹	Amenazada
Iguana verde (<i>Iguana iguana</i>) ¹	Amenazada
Tortuga golfina (<i>Lepidochelys olivacea</i>) ¹	En peligro de extinción
Mamíferos	
Conejo de Tres Marías (<i>Sylvilagus graysoni</i>) ¹	Amenazada
Conejo de Florida (<i>Sylvilagus floridanus</i>) ¹	Amenazada
Conejo mexicano (<i>Sylvilagus canicularius</i>) ¹	Amenazada
Conejo cola de algodón (<i>Sylvilagus graysoni</i>) ¹	Amenazada
Liebre torda (<i>Leptus callotis</i>) ¹	Amenazada
Armadillo (<i>Dasypus novemcinctus</i>) ¹	Amenazada
Puma (<i>Felis concolor</i>) ¹	En peligro de extinción
Lince rojo (<i>Lynx rufus</i>) ¹	En peligro de extinción

Fuente: Ramsar (2008)¹; Carmona et al. (2020)²; (^{1,2}) relaciona la información con el autor



9. Estado de las especies explotadas

La pesca de camarón fue una de las actividades más importante. En el período 2000-04 se llegaban a capturar en promedio 1,060 ton anuales, sin embargo, fueron disminuyendo hasta alcanzar solo 389 ton (Ramsar, 2008). Las prácticas inadecuadas de pesca y el uso no regulado de artes de pesca han afectado los volúmenes y tallas de camarones y peces de importancia comercial, además, el uso de purina como método de pesca, la extracción de madera de mangle han impactado de manera negativa el estado de las especies (CONANP, 2016). En este estudio, el sitio Ramsar fue calificado como crítico. En lo que respecta a la tendencia, el sistema fue considerado en rápido deterioro (Tabla 3).

10. Estado de las especies clave

Los manglares están considerados como especies clave, debido a los múltiples servicios ecosistémicos que brindan. Sin embargo, los estudios indican que han sufrido estrés por el daño que ocasionan las actividades humanas, se prevé que las modificaciones en el ecosistema sean más severas, ya que hay constantes cambios hidrológicos debido a la construcción de la presa Picachos (en el Río Presidio, en curso desde 2009) y el proyecto de la presa Santa María (en el Río Baluarte) (Flores-Cárdenas *et al.*, 2016). Además, se sigue perdiendo cobertura de manglares, con aumentos en la tasa de deforestación (Millán-Aguilar *et al.*, 2020). De acuerdo con la información obtenida, se catalogó un estado crítico y se calificó una tendencia en rápido deterioro (Tabla 3).

11. Estado de las especies en riesgo

En la LHC habitan dos especies consideradas en estatus vulnerable a nivel nacional e internacional por la Lista Roja de la UICN (Unión Mundial para la Conservación): el cocodrilo de río o americano (*Crocodylus acutus*) y el lagarto enchaquirado (*Heloderma horridum*), éste último también es considerado amenazado, según la NOM-059-SEMARNAT-2010. La legislación mexicana también considera como amenazados a la boa (*Boa constrictor*), al guatopote del Fuerte (*Poeciliopsis latidens*), al conejo de Tres Marías (*Sylvilagus graysoni*) y al pato mexicano (*Anas platyrhynchos*). Finalmente, la tortuga golfina (*Lepidochelys olivacea*) también se considera en peligro de extinción en la legislación mexicana. Además, hay registros de la presencia ocasional del playero polar (*Numenius borealis*), que está en peligro de extinción, según la NOM-059-SEMARNAT-2010. Las

especies de manglares como *Rizofora mangle*, *Laguncularia racemosa* y *Avecennia germinans* también forman parte de la categoría de protección especial, tal como señala la NOM-059-SEMARNAT-2010 (Tabla 4). Con respecto en lo anterior expuesto, el estado se considera como crítico y con tendencia en rápido deterioro (Tabla 3).

12. Estado de las especies exóticas

Como especies exóticas se señalaron a la tilapia (*Oreochromis niloticus*) y al plecostomo (*Hypostomus plecostomus*) (CONANP, 2016). Sin embargo, se carece de registros de estas especies. El estado y la tendencia para esta variable es sin determinar (Tabla 3).

Consideraciones finales y perspectivas

Los sitios Ramsar mantienen gran relevancia ecológica en relación con la conservación de especies de flora y fauna, sin embargo, la examinación de los aspectos ecológicos reveló que Huizache-Caimanero ha sido afectado ecológicamente, por una parte, la degradación de hábitats debido a que las actividades humanas están asentadas en la zona de inundación que es considerada un hábitat potencial para la fauna acuática y mamíferos y, por otra parte, la contaminación del agua ocasionada por el vertimiento de aguas residuales agrícolas y acuícolas. Los autores del presente trabajo recomiendan aumentar los esfuerzos de investigación científica para realizar estudios sobre calidad del agua del ecosistema lagunar, abordar estudios de conservación y conocimiento del estado actual de las poblaciones de aves playeras y migratorias, elaborar registros sobre la biodiversidad del sitio Ramsar, debido a las modificaciones que ha sufrido el sistema, considerar pausar el crecimiento de las actividades humanas e implementar programas de rehabilitación, conservación y aprovechamiento de manera racional de los recursos naturales. Por último, la mayor parte de la información expuesta fue publicada hace más de 10 años, por ello, son de gran interés las actualizaciones de las fichas técnicas de todos los sitios Ramsar de México, para tener una mejor comprensión de la importancia y el funcionamiento de estos grandiosos ecosistemas tan vitales para la biodiversidad y bienestar humano, como lo es la laguna Huizache-Caimanero.



Agradecimientos

El Dr. Julio Medina Galván agradece a la SECIHTI por el apoyo de la beca de posdoctorado con número de proyecto: 3717653.

Literatura citada

- Amezcu-Linares, F. 1977. *Generalidades ictiológicas del sistema lagunar costero de Huizache-Caimanero, Sinaloa, México*. Instituto de Ciencias del Mar y Limnología, Universidad Nacional Autónoma de México 4 (1): 1-26.
- Arreola-Lizárraga, J.A., J. Garatuza-Payan, E.A. Yepez-González y A. Robles-Morúa. 2019. *Capital natural y bienestar social de la comunidad Yaqui*, Oficina de Publicaciones. Instituto Tecnológico de Sonora, Ciudad Obregón, Sonora, México.
- Cabanillas, H., E. Llausas, R. Romero, A. Espinoza, A. Garcia, y M. Nishibuchi. 2006. *Outbreak of gastroenteritis caused by the pandemic Vibrio parahaemolyticus O3:K6 in Mexico*. FEMS Microbiology Letters 265: 76-80.
- Carmona, R., V. Ayala-Pérez, A. Hernández-Álvarez, L.F. Mendoza, G. Marrón, N. Arce, S. Vidal, y G.D. Danemann. 2020. *Poblaciones reproductivas de aves playeras en humedales del noroeste mexicano*. Huitzil 21(2): e-581. doi: <https://doi.org/10.28947/hrmo.2020.21.2.506>.
- Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). 2015. *Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero Río Baluarte (2510) estado de Sinaloa*. Ciudad de México. 22 pp.
- Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). 2020. *Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero Río Presidio (2509) estado de Sinaloa*. Ciudad de México. 30 pp.
- Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas (CONANP). 2016. *Fichas de evaluación ecológica de áreas naturales protegidas del noroeste de México*. 240 pp.
- Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas (CONANP). 2023. *Humedales mexicanos inscritos en la Convención de RAMSAR*. En <https://datos.gob.mx/busca/dataset/lista-de-los-humedales-de-importancia-internacional-sitios-ramsar-designados-en-mexico>. (Consultado 10-06-2023).
- DOF. 1996. Norma Oficial Mexicana NOM-001-SEMARNAT-1996, *Que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales*. Diario Oficial de la Federación, 23 de abril de 2003. DF, México

- DOF. 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*. Diario Oficial de la Federación, 30 de diciembre de 2010, México, DF.
- Du, W., S. Li y F. Li. 2024. *Different Immune Responses of Hemocytes from V. parahaemolyticus Resistant and -Susceptible Shrimp at Early Infection Stage*. Biology 13, 300. <https://doi.org/10.3390/biology13050300>
- Félix-Ortíz, J.A., E.A. Aragón-Noriega, N. Castañeda-Lomas, G. Rodríguez-Domínguez, W. Valenzuela-Quinonez y M. Siu-Quevedo. 2017. *Effect of tidal hour on the abundance of penaeid shrimp postlarvae (Decapoda: Penaeidae) along the mexican Pacific coast*. Crustaceana 90: 167-176.
- Flores-Cárdenas, F., M.A. Hurtado-Oliva, T.W. Doyle, M. Nieves-Soto, S. Díaz-Castro y M. Manzano-Sarabia. 2016. *Litterfall production of mangroves in Huizache-Caimanero lagoon system, Mexico*. Journal of Coastal Research 33(1): 118–124. <http://doi.org/10.2112/JCOASTRES-D-15-00242.1>
- FWPCA, Federal Water Pollution Control Act. 1972. *Report of the Committee on Water Quality Criteria*. Federal Water Pollution Control Administration, US Department of the Interior, Washington, DC.
- Galindo-Reyes, J.G., J.A. Medina, L.C. Villagrana y C.L. Ibarra. 1997. *Environmental and pollution condition of the Huizache-Caimanero lagoon in the north- west of Mexico*. Marine Pollution Bulletin 34 (12): 1072-1077. [http://doi.org/10.1016/S0025-326X\(97\)00081-7](http://doi.org/10.1016/S0025-326X(97)00081-7)
- García, E. 1973. *Modificaciones al sistema de clasificación climática de Koppen (para adaptarlo a las condiciones climáticas de la República mexicana)*. Instituto de Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México. 264 pp.
- Hernández-Morga, J. 2007. Concentración por ultrafiltración de virus entéricos en aguas del complejo lagunar Huizache-Caimanero, Sinaloa, México. Tesis de maestría. Centro de Investigación en Alimentación y Desarrollo, A.C. 148 pp.
- Ignatyeva, M., V. Yurak y A. Dushin. 2022. *Valuating Natural Resources and Ecosystem Services: Systematic Review of Methods in Use*. Sustainability 14, 1901. <https://doi.org/10.3390/su14031901>
- Instituto Nacional Electoral (INE). 2023. *Lista Nominal de Rosario, Sinaloa, a Julio de 2023*. En <https://ine.mx/transparencia/datos-abiertos/#/archivo/datos-por-rangos-de-edad-entidad-de-origen-y-sexo-del-padron-electoral-y-lista-nominal-2023>. (Consultado 12-10-2023).



- Martínez-García, M.C., y A.L. Lara-Domínguez. 2023. *Estructura de los manglares de Jácome, Veracruz, México (Sitio Ramsar 1602)*. Ecosistemas 32(3): 2432. <https://doi.org/10.7818/ECOS.2432>
- Medina-Galván, J., C.C. Osuna-Martínez, G. Padilla-Arredondo, M.G. Frías-Espéricueta, R.H. Barraza-Guardado y J.A. Arreola-Lizárraga. 2021. *Comparing the biogeochemical functioning of two arid subtropical coastal lagoons: the effect of wastewater discharges*. Ecosystem Health and Sustainability 7(1), 1892532. <https://doi.org/10.1080/20964129.2021.1892532>
- Millán-Aguilar, O., A. Nettel-Hernanz, M.A. Hurtado-Oliva, R.S. Dodd, F. Flores-Cárdenas y M. Manzano-Sarabia. 2020. *Landscape metrics and conservation status of five mangrove wetlands in the eastern Gulf of California margin*. Journal of Coastal Research 36(1): 94–102.
- Moreno-Sánchez, A.R. 2022. *Salud y medio ambiente*. Revista De La Facultad De Medicina UNAM 65(3): 8–18. <https://doi.org/10.22201/fm.24484865e.2022.65.3.02>
- Páez-Osuna F., G. Ramírez-Reséndiz, C. Ruiz-Fernández y M.F. Soto-Jiménez. 2007. *La contaminación por nitrógeno y fósforo en Sinaloa: Flujos, fuentes, efectos y opciones de manejo*. Serie Lagunas Costeras de Sinaloa, Páez Osuna F., (Ed). Instituto de Ciencias del Mar y Limnología, Universidad Nacional Autónoma de México, México, 303 pp.
- Ramsar. 2008. *Ficha Informativa del sitio Ramsar “Laguna Huizache-Caimanero”*. Secretaría de la Convención de Ramsar, Gland, Suiza, 16 pp.
- Ramsar (Secretaría de la Convención sobre los Humedales) 2022b. *Resolución XIV.17. 2022. Protección, conservación, restauración, uso sostenible y gestión de los ecosistemas de humedales para hacer frente al cambio climático*. 14ª Reunión de la Conferencia de las Partes Contratantes en la Convención de Ramsar sobre los Humedales. Wuhan (China) y Ginebra (Suiza), 5 a 13 de noviembre de 2022. “Acción en favor de los humedales para las personas y la naturaleza”. Disponible en: https://www.ramsar.org/sites/default/files/documents/library/xiv.17_climate_change_s.pdf
- Reyes-Velarde, P.M., R. Alonso-Rodríguez, V.P. Domínguez-Jiménez y O. Calvario-Martínez. 2023. *The spatial distribution and seasonal variation of the trophic state TRIx of a coastal lagoon system in the Gulf of California*. Journal of Sea Research 193: 102385.
- Rodríguez-Camacho, J.C., E. Méndez-Gómez, A.M. Rivas-Montaña y J.A. Cortés-Ruiz. 2014. *Evaluación de la presencia de Vibrio parahaemolyticus en camarón blanco (Litopenaeus vannamei) silvestre estuarino en el sur de Sinaloa y norte de Nayarit, mediante análisis microbiológico y PCR*. Revista Bio Ciencias 2: 282-292.

- Romero-Beltrán, E., F. Gabriel-Aldana, E.M. Muñoz-Mejía, P.M. Medina-Osuna, P. Valdez-Ledón, J.A. Bect-Valdez, M.T. Gaspar-Dillanes, L. Huidobro-Campos, A. Romero-Correa, E. Tirado-Figueroa, C.J. Saucedo-Barrón, D.A. Osuna-Bernal, y N. Romero-Mendoza. 2014. *Fichas técnicas de las lagunas costeras del estado de Sinaloa, México, con énfasis en calidad de agua, flujos de nutrientes y estado trófico*. Instituto Nacional de Pesca; Instituto Sinaloense de Acuacultura y Pesca. 53 pp.
- Ruiz-Luna, A., y C.A. Berlanga-Robles. 1999. *Modifications in coverage patterns and land use around the Huizache-Caimanero Lagoon System, Sinaloa, Mexico: A multi-temporal analysis using LANDSAT Images*. Estuarine, Coastal and Shelf Science 49: 37–44.
- Ruiz-Ruiz, T.M. 2017. *Análisis comparativo de índices de eutrofización en lagunas costeras del Estado de Sonora, México*. Tesis de doctorado en ciencias. Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste SC México. 108 pp. Disponible en: <http://dspace.cibnor.mx:8080/handle/123456789/574>.
- Ruiz-Santillán, M.P., E. Huamán-Rodríguez y F. Mejía-Coico. 2019. *Diagnóstico ecológico del humedal Chochoc*. Revista de Investigación Científica REBIOL. ISSN 2313-3171. 39 (2): 3 – 18 <http://dx.doi.org/10.17268/rebiol.2019.39.02.01>
- Serrano, N.O. 2015. *La exposición humana a lindano en Sabinánigo (Huesca)*. Revista de Salud Ambiental 15: 66-69.
- Vásquez, N.P., y E.F. Silva. 2023. *Futuro Marino Sostenible: Importancia Del Tejido Coralino En La Conservación De Ecosistemas Costeros*. La Casa del Maestro 1(5): 334-346.

Cita

Medina Galván, J., C.C. Osuna Martínez, M.G. Frías Espericueta y J.A. León Cañedo. Explorando aspectos ecológicos de una laguna costera. Recursos Naturales y Sociedad, 2025. Vol. 11 (3): 14-35. <https://doi.org/10.18846/renaysoc.2025.11.11.03.0002>



Sometido: 4 de abril de 2025

Aceptado: 4 de junio de 2025

Editora asociada: M.C. María Ruth Ochoa Díaz

Editora ejecutiva: Dra. Crisalejandra Rivera-Pérez

Diseño gráfico editorial: Ing. Francisca Elizabeth Villegas Carrazco

Liraglutide: More Than a Diabetes Control Medication

Liraglutida, más que un medicamento de control de la diabetes

Roxana Berger Ochoa^{1,3}, Ramón Gaxiola-Robles^{1,3}, Andrea Socorro Álvarez Villaseñor²,
Jesús Manuel Salazar Cabanillas¹, Tania Zenteno-Savín³

Resumen

La diabetes es la pandemia y la emergencia sanitaria que ha crecido más rápido a nivel mundial. La obesidad es el principal factor de riesgo para su desarrollo. La diabetes mellitus tipo 2 (DM2) es una enfermedad metabólica crónica caracterizada por niveles elevados de glucosa en sangre. Esto se produce cuando el páncreas no genera suficiente insulina o cuando el cuerpo no puede utilizar de forma eficaz la insulina producida. La liraglutida es un análogo del péptido similar al glucagón tipo 1 (GLP-1), que se emplea en el manejo farmacológico de la DM2, ya que reduce los niveles de la hemoglobina glucosilada (HbA1c), la concentración de glucosa en ayunas y posterior al consumo de alimentos, mediante la estimulación de la secreción de insulina dependiente de la glucosa, e inhibe la secreción de glucagón. El Centro de Atención a Pacientes con Diabetes del Instituto Mexicano del Seguro Social (CADIMSS) fomenta la corresponsabilidad del paciente y su familia, y otorga sesiones educativas a cargo de personal de enfermería y trabajo social durante un periodo de seis meses, con el objetivo de promover la práctica de actitudes responsables y la implementación de estilos de vida saludables en los derechohabientes. Entre las terapéuticas farmacológicas ofrecidas por el CADIMSS se encuentra la liraglutida, como monoterapia o en combinación con otros fármacos, con la finalidad de ayudar a reducir los niveles de glucosa y prevenir las posibles complicaciones que puedan presentarse a futuro.

Palabras claves: CADIMSS, diabetes, liraglutida, obesidad.

¹ Hospital General de Zona No.1. Instituto Mexicano del Seguro Social. La Paz. Baja California Sur. México.

² Coordinación de Planeación y enlace institucional OOAD Regional en Baja California Sur, México.

³ Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste, S.C. (CIBNOR). Planeación Ambiental y Conservación. La Paz. Baja California Sur. 23096. México.

* Autor de correspondencia: rgaxiolar@cibnor.mx Teléfono: +52 (612) 123 8400



Abstract

Diabetes is the fastest-growing pandemic and health emergency worldwide. Obesity is the main risk factor for its development. Type 2 diabetes mellitus (T2DM) is a chronic metabolic disease characterized by elevated blood glucose levels. This occurs when the pancreas does not produce enough insulin or when the body cannot effectively use the insulin it produces. Liraglutide is a glucagon-like peptide-1 (GLP-1) analog used in the pharmacological management of T2DM, as it lowers glycated hemoglobin (HbA1c), fasting glucose levels, and postprandial glucose levels. It works by stimulating glucose-dependent insulin secretion and inhibiting glucagon secretion. Liraglutide also has other positive effects on the body. The Diabetes Care Center of the Mexican Social Security Institute (CADIMSS) promotes shared responsibility between the patient and their family. It provides educational sessions led by nursing and social work staff over a six-month period, with the aim of encouraging responsible behaviors and the adoption of healthy lifestyle habits among beneficiaries. Among the pharmacological therapies offered by CADIMSS is liraglutide, used either as monotherapy or in combination with other drugs, with the goal of helping reducing glucose levels and prevent potential future complications.

Keywords: CADIMSS, diabetes, liraglutide, obesity.

Antecedentes

La diabetes es la pandemia y la emergencia sanitaria que ha crecido más rápido a nivel mundial. Según la Federación Internacional de Diabetes (Chandrasekaran y Weiskirchen, 2024), la obesidad es el principal factor de riesgo para su desarrollo. La diabetes mellitus tipo 2 (DM2) es una enfermedad metabólica crónica caracterizada por niveles elevados de glucosa en sangre, lo que se produce cuando el páncreas no sintetiza suficiente insulina o cuando el cuerpo no puede utilizar de forma eficaz la insulina disponible. Mantener niveles altos de glucosa en sangre es perjudicial para la salud, ya que puede causar complicaciones como infarto o daño al corazón, cerebro, nervios periféricos, ojos y riñones de forma crónica, entre otras enfermedades (Williams *et al.*, 2020). La prevalencia del sobrepeso en las Américas fue casi el doble de la observada a nivel mundial (Williams *et al.*, 2020).

Existen aproximadamente 422 millones de personas en todo el mundo con DM2; de ellas, 62 millones se encuentran en el continente americano (Williams *et al.* 2020). La mayoría vive en países con ingresos bajos y medios (Williams *et al.* 2020). Anualmente, se reportan 1.5 millones de muertes en todo el mundo (de las cuales 244,084 corresponden a América) que se atribuyen directamente a la DM2 (Williams *et al.* 2020). Se predice que el número de casos diagnosticados de DM2 alcanzará los 624 millones en el 2030, y 783 millones en el 2045 (Chandrasekaran y Weiskirchen, 2024). Por ello, es relevante tomar decisiones y acciones para prevenir, reducir y controlar la DM2, con la finalidad de disminuir la mortalidad.

La liraglutida es un análogo del péptido similar al glucagón tipo 1 (GLP-1) que se utiliza en el tratamiento de la DM2, ya que reduce la concentración de hemoglobina glucosilada (HbA1c), así como los niveles de glucosa en ayunas y posterior a la ingesta de alimentos. Esto ocurre mediante la estimulación de la secreción de insulina dependiente de la glucosa y la inhibición de la secreción de glucagón (Feinglos *et al.*, 2005)(figura 1). Además, la liraglutida presenta efectos cardioprotectores, asociados con la reducción de la presión arterial, lo cual representa un beneficio en pacientes que han presentado alguna lesión cardíaca, infarto o insuficiencia cardíaca (Tilinka *et al.*, 2021). También contribuye a la mejora de los niveles de grasas en sangre, como son el colesterol y los triglicéridos (dislipidemias), y a nivel renal, al igual que favorece la eliminación de líquidos y sal a través de la orina, un proceso conocidos como diuresis y natriuresis, respectivamente. (Tilinka *et al.*, 2021).

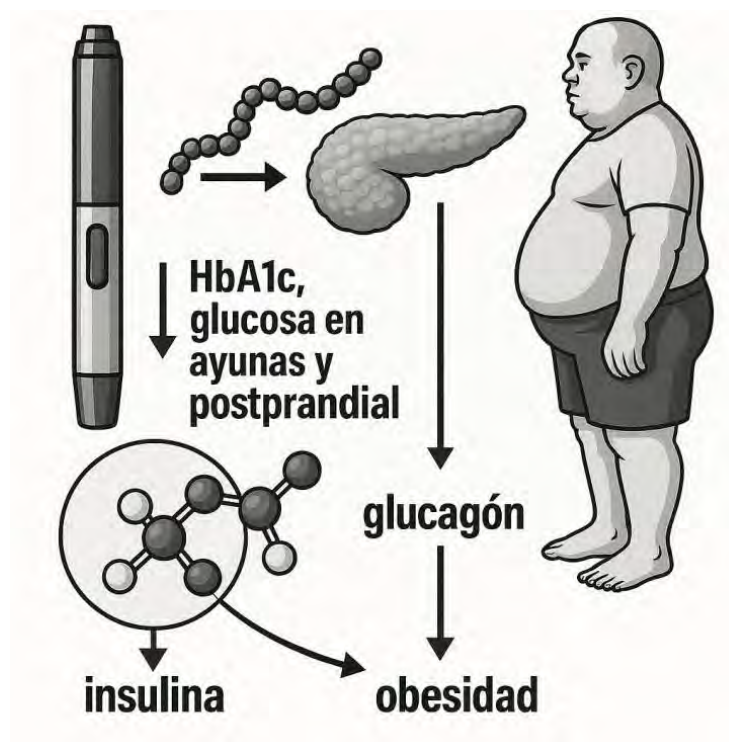


Figura 1. En la imagen se muestra, la pluma que es el dispositivo comercial común de administración de la liraglutida, apoyo en el tratamiento de la DM2. Disminuye la glucosa sérica y reduce la hemoglobina glucosilada (HbA1c). También ayuda al control del apetito, por ende reducen el peso corporal (Ramírez-Jirano, L. J. (2025). Infografía científica sobre liraglutida, insulina, glucagón y control glucémico con molécula de glucosa [Ilustración generada con IA]. OpenAI.)

El Centro de Atención a Pacientes con Diabetes del Instituto Mexicano del Seguro Social (CADIMSS) alberga un programa que atiende exclusivamente a personas con esta enfermedad. CADIMSS ofrece liraglutida como monoterapia o en combinación con otros fármacos, con la finalidad de ayudar a los pacientes con diabetes a prevenir posibles complicaciones que puedan presentarse en el futuro (IMSS, 2022). La prescripción de liraglutida se realiza de acuerdo con lo estipulado en los Protocolos de Atención Integral (PAI) del IMSS, en los cuales se determina qué pacientes con diabetes son candidatos a este tratamiento terapéutico como parte de su manejo integral (Medina-Chávez *et al.*, 2022).

La intención del presente manuscrito es informar qué es la obesidad, cómo contribuye al desarrollo de la DM2 y las complicaciones que conlleva. Asimismo, se brinda información sobre la liraglutida, un medicamento que imita la acción de una hormona intestinal cuya secreción depende de la presencia de nutrientes en la luz del intestino delgado. Este fármaco ayuda a controlar los niveles de glucosa en sangre, regula la presión arterial, disminuye las afectaciones causadas por el hígado graso, controla el apetito, reduce el peso corporal, entre otros beneficios reportados (Feinglos *et al.* 2005).

Quizás te has cuestionado: ¿cómo es que la obesidad puede dar origen a la DM2?

Para comenzar, la obesidad suele ser el principal factor de riesgo para el desarrollo de DM2. Según la Organización Mundial de la Salud (OMS), la obesidad y el sobrepeso se definen como la “acumulación anormal o excesiva de grasa, que puede ser perjudicial para la salud”. Para su medición se utiliza el índice de masa corporal (IMC) , que se calcula dividiendo el peso de una persona en kilogramos entre el cuadrado de su talla en metros (Chandrasekaran y Weiskirchen, 2024; Tilinca *et al.* 2021). Aquella persona cuyo IMC sea igual o superior a 25 se considera con sobrepeso, y la persona que presenta un IMC igual o superior a 30 se considera obeso. Por otro lado, el índice cintura cadera (ICC) se obtiene dividiendo la circunferencia de la cintura (medida a la altura de la última costilla flotante, o dos cm por arriba del ombligo) entre el valor del perímetro máximo de la cadera; lo ideal es que el ICC en hombres sea menor o igual a 102 cm y en mujeres menor o igual a 88 cm (Chandrasekaran y Weiskirchen, 2024; Tilinca *et al.* 2021). El riesgo de desarrollar una enfermedad es relativo al ICC; por ejemplo, la DM2 , dislipidemia (enfermedad metabólica que se caracteriza por presencia de niveles elevados de colesterol y triglicéridos en sangre) e hipertensión arterial sistémica (conocida como presión alta, que se presenta cuando los vasos sanguíneos se mantienen a una presión mayor de 140/90 mmHg, lo que representa que la fuerza ejercida por la sangre en venas y arterias es elevada, y entre más elevada sea la cifra mayor es esfuerzo que realiza el corazón para que la sangre circule de una manera suficiente para llegar al órgano blanco) (Sellén-Crombet *et al.* 2009).

Existe una hipótesis, conocida como la hipótesis del genotipo ahorrativo de Neel, que sugiere una explicación para el desarrollo de la obesidad; esta hipótesis propone que los ciclos de hambre experimentados por nuestros antepasados cazadores - recolectores favorecieron mecanismos genéticos asociados con la acumulación y aprovechamiento eficiente de grasa corporal, lo que permitía la supervivencia durante tiempos de escasez (Ceballos–Macías *et al.*, 2018). Sin embargo, en la actualidad, esta adaptación presenta un problema, ya que la ingesta es mucho mayor que el gasto energético (Ceballos–Macías *et al.* 2018). Según la hipótesis del genotipo ahorrativo, los genes de la obesidad están involucrados en la regulación del apetito, los comportamientos de búsqueda de alimentos y la eficiencia metabólica (Ceballos–Macías *et al.*, 2018). No obstante, muchos de estos genes tienen múltiples efectos adicionales, que también pueden estar bajo selección natural (Ceballos–Macías *et al.*, 2018).



Las señales del apetito inician en el cerebro, especialmente en las partes llamadas hipotálamo y mesencéfalo, que recibe señales de diferentes órganos del cuerpo para saber cuándo tenemos hambre o cuándo estamos satisfechos. Estas señales son enviadas a través de ciertas proteínas y hormonas que produce nuestro organismo. A continuación te explicamos algunas de las más importantes. (Ceballos–Macías *et al.*, 2018). (figura 2):

1. Péptido YY (PYY)

- Se produce en el intestino delgado (en partes llamadas íleon, yeyuno y colon).
- Disminuye el apetito y ayuda a controlar el peso.
- También reduce la producción de jugos gástricos y pancreáticos.
- Cuando no está presente, sentimos más hambre.

2. Colecistocinina (CCK)

- Se libera en el duodeno (parte inicial del intestino delgado) después de comer.
- Hace que la vesícula biliar libere bilis y que el páncreas libere enzimas que ayudan a digerir los alimentos.
- También ayuda a sentirse satisfecho, por eso se dice que reduce el apetito.

3. Polipéptido inhibidor gástrico (GIP)

- Es una hormona que se produce en el duodeno y yeyuno (partes del intestino delgado) después de comer.
- Estimula la producción de insulina, lo que ayuda a bajar el azúcar en la sangre.
- Hace que el estómago se vacíe más lentamente y reduce la producción de ácido en el estómago.

4. Péptido similar al glucagón tipo 1 (GLP-1)

- Se produce en el íleon (la parte final del intestino delgado).
- Ayuda al cuerpo a liberar insulina y disminuye la producción de glucosa por el hígado.
- Lentifica el vaciado del estómago, disminuye el movimiento del intestino y reduce el apetito.

5. Grelina

- Es una hormona que se produce en el estómago, especialmente antes de comer.
- Se le conoce como la “hormona del hambre” porque aumenta el apetito.
- Sus niveles suben antes de comer y bajan después de comer.

SEÑALES DEL APETITO

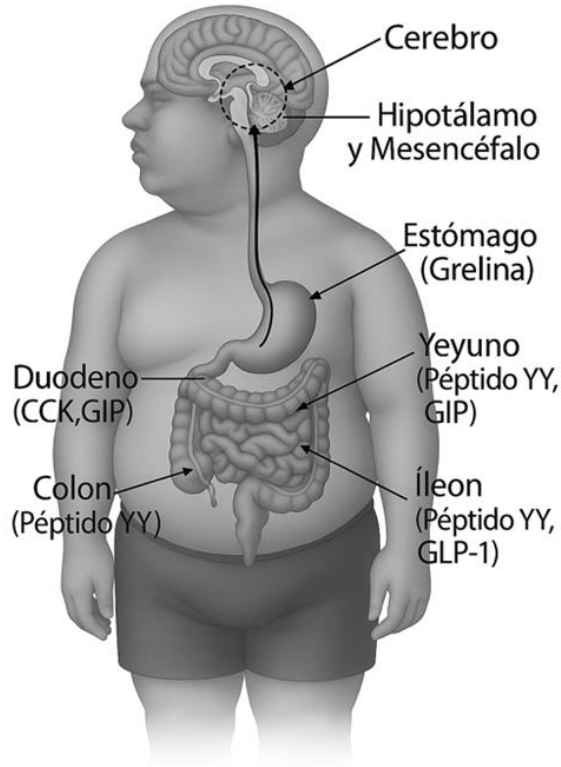


Figura 2. Ilustración educativa en escala de grises titulada "SEÑALES DEL APETITO". Muestra la silueta frontal de una persona con obesidad, con etiquetas anatómicas que señalan las estructuras involucradas en la regulación del apetito y sus enzimas u hormonas que secretan. Autora: Roxana Berger Ochoa

En pocas palabras, el organismo genera diversas sustancias que informan al cerebro si tienes hambre o no. Algunas de éstas reducen el deseo de comer, mientras que otras lo incrementan. La armonía entre todas estas señales es fundamental para conservar un peso adecuado y administrar el apetito.

La obesidad se atribuye al desequilibrio entre la ingesta calórica y el gasto energético (Ataey *et al.* 2020). Esto se debe, en parte, al consumo elevado de productos de bajo valor nutricional y alto contenido de azúcar, grasa y sal, como alimentos ultraprocesados, así como la ingesta habitual de bebidas azucaradas. El estilo de vida sedentario o inactivo del individuo también contribuye a la obesidad. Además, es importante reconocer que existen factores no modificables, como la predisposición genética, el nivel socioeconómico y trastornos emocionales u hormonales, que se atribuyen como factores de riesgo a desarrollar obesidad (Ataey *et al.* 2020). El habitar en un entorno obesogénico, es decir, un ambiente que favorece el desarrollo de la obesidad exacerba la probabilidad del desarrollo de la obesidad en individuos, poblaciones y comunidades. Dicho entorno está relacionado con factores estructurales que limitan la disponibilidad de alimentos saludables y



sostenibles a precios accesibles a nivel local (Ataey et al. 2020). Asimismo, la escasez de oportunidades en la vida diaria de un individuo o de una comunidad para realizar actividades físicas de manera sencilla y segura, así como la ausencia de un entorno legal y normativo adecuado, contribuye a la creación de un entorno obesogénico (Ataey et al. 2020). Por todo lo anterior, se considera que la obesidad es una condición multifactorial (Ataey et al. 2020).

La obesidad es la puerta de entrada a diversas enfermedades, es una de las principales causas de incapacidad y muerte; afecta a cualquier edad, en cualquier nivel socioeconómico en todo el mundo (Mera-Hernández, 2024). Además, la obesidad también influye negativamente en la calidad del sueño y en diversos aspectos de la calidad de vida del individuo (Mera-Hernández, 2024).

¿Qué se conoce como diabetes?

La diabetes se puede clasificar bajo las siguientes categorías:

- a. Diabetes mellitus tipo 1 (DM1): existe una deficiencia absoluta de insulina, ya que el cuerpo no la produce porque unas células del páncreas llamadas células beta, han sido destruidas. Esta destrucción puede deberse a una causa autoinmune o a una causa desconocida (Molina y Rodríguez, 2012).
- b. Diabetes mellitus tipo 2 (DM2): se origina por un defecto progresivo de la secreción y resistencia a la acción de la insulina (Molina y Rodríguez, 2012).
- c. Prediabetes: se le conoce así al estado intermedio de una hiperglucemia, en el cual los niveles de glucosa están elevados sobre el nivel normal, pero no lo suficientemente altos para cumplir los criterios de diabetes (Bansal, 2015).
- d. Diabetes Mellitus Gestacional (DMG): es la diabetes diagnosticada en el segundo o tercer trimestre del embarazo (Molina y Rodríguez, 2012).
- e. Tipos específicos de la diabetes debido a otras causas: incluyen síndromes genéticos de diabetes como la diabetes neonatal y la diabetes del joven de inicio en la madurez (MODY), así como alteraciones glucémicas provocadas por fármacos o químicos (Molina y Rodríguez, 2012).

En este manuscrito nos enfocamos sobre la DM2. Como ya se mencionó anteriormente, DM2 es una enfermedad metabólica crónica caracterizada por niveles elevados de glucosa en sangre. Esto se produce cuando el páncreas no sintetiza suficiente insulina o cuando el cuerpo no puede utilizar de forma eficaz la insulina que se produce (Williams, et al. 2020). La insulina es una hormona que regula la concentración de glucosa en sangre; cuando un individuo presenta hipoglucemias (el nivel de

glucosa en sangre es menor de lo normal) o hiperglucemias (el nivel de glucosa se encuentra por arriba de lo normal), se considera que existe un mal control metabólico (Williams *et al.* 2020). Los adultos con DM2 tienen un riesgo dos o tres veces mayor de sufrir infartos al corazón o accidentes cerebrovasculares, en comparación con quienes no padecen esta enfermedad. Además, la DM2 es también un factor de riesgo para daño crónico a los nervios periféricos, los ojos y los riñones (Williams *et al.* 2020).

Se conoce bajo el término “diabesidad” a la estrecha relación entre la obesidad y la DM2 (Chandrasekaran y Weiskirchen, 2024). Este término hace referencia a que la mayoría de las personas con DM2 presentan obesidad o sobrepeso. A pesar de que la DM2 está influenciada por predisposición genética, es decir, por factores de riesgo no modificables, se trata de una patología que puede prevenirse y controlarse mediante el abordaje de los factores de riesgo modificables de la obesidad (Chandrasekaran y Weiskirchen, 2024).

¿Qué tan común es presentar obesidad y DM2?

Según cifras de la Organización Mundial de la Salud (OMS), desde 1990 se ha duplicado la prevalencia de la obesidad entre los adultos y se ha cuadruplicado entre los adolescentes de todo el mundo (Tilincá *et al.* 2021). En 2014, en la región de las Américas, el 8.3% de los adultos mayores de 18 años tenía DM2 (Tilincá *et al.* 2021). La Federación Internacional de Diabetes (FID) estimó en 2019 que 1 de cada 11 adultos de entre 20 y 79 años (463 millones) tiene DM2, con una cifra estimada de más de 700 millones de casos para el 2045 (Chandrasekaran y Weiskirchen, 2024; Tilincá *et al.* 2021). En 2019, la DM2 fue la sexta causa de muerte en las Américas, con un estimado de 244,084 muertes causadas directamente por esta enfermedad y el 44% de todas las muertes por DM2 ocurrieron antes de los 70 años (Williams *et al.* 2020). La DM2 es la segunda causa principal de años de vida ajustados por discapacidad (VAD), lo que refleja las complicaciones limitantes que sufren las personas con DM2 a lo largo de su vida (Williams *et al.* 2020). En el 2022, se reportó obesidad en 1 de cada 8 personas en el mundo, 43% de hombres y 44% de mujeres. Para el mismo período, los individuos con sobrepeso sumaban aproximadamente 2,500 millones de adultos (Tilincá *et al.* 2021).

La Federación Mundial de Obesidad estima que, de la población total del mundo, el 14% de los hombres y el 20% de las mujeres desarrollarán obesidad para el 2030 (Chandrasekaran y Weiskirchen, 2024). Además, se calcula que el 18% de las personas en el 2030, tendrá un IMC



superior a 30 kg m^{-2} y que el 2% tendrá un IMC de 40 kg m^{-2} ; se prevé que los países con alto nivel socioeconómico experimentaron un mayor riesgo de presentar obesidad (Chandrasekaran y Weiskirchen, 2024). Se estima que la población mundial con DM2 aumentará en otros 200 millones de personas en 2040. En Estados Unidos, los nativos americanos, los hispanos y los asiático-americanos son la población más afectada por la DM2; se estima que el 70% de las personas con prediabetes acabarán desarrollando DM2 en 2030 (Chandrasekaran y Weiskirchen, 2024).

En México, la DM2 representa una de las primeras causas de morbilidad, con una prevalencia de 10.3% reportada en la Encuesta Nacional de Salud y Nutrición de 2018 (IMSS, 2022). En el censo realizado por el Instituto Mexicano del Seguro Social (IMSS) en el 2021, se registraron 4 747 174 personas con DM2 y fueron atendidas 3 085 948 personas; con una prevalencia del 12.37%, la DM2 fue la segunda causa de atención médica en medicina familiar y la tercera causa de defunción ese año (IMSS, 2022). Según el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), durante el periodo enero-junio de 2022, la DM2 fue la segunda causa de defunciones, tanto en el total como entre hombres y mujeres en México, con un reporte de 59 996 muertes (INEGI, 2022). Durante el mismo periodo de 2023, las defunciones por DM2 continuaron, ocupando el segundo lugar, con 55,885 muertes reportadas (INEGI, 2023).

¿Cómo se diagnostica la DM2?

El diagnóstico de DM2 se realiza cuando el paciente presenta alguno de los siguientes criterios; hemoglobina glucosilada (HbA1C) mayor o igual a 6.5%, glucemia en ayunas mayor o igual a 126 mg dL^{-1} , o glucosa plasmática posterior a la ingesta de alimento durante 2 horas mayores o igual 200 mg dL^{-1} (Mera-Hernandez, 2024). La morbilidad y las complicaciones relacionadas con la DM2 se pueden reducir sustancialmente con un control estricto de la glucemia, con el objetivo de alcanzar una HbA1c inferior a 7% (Chandrasekaran y Weiskirchen, 2024).

Una de las morbilidades que acompañan a la DM2, es el sobrepeso y la obesidad, y si bien la pérdida de peso mediante una dieta adecuada es la mejor opción para mejorar la salud en pacientes con factores de riesgo asociados a la obesidad, en aquellos pacientes que no obtienen resultados favorables (pérdida de peso) con un tratamiento basados en planes dietéticos y ejercicio, el uso de medicamentos aprobados representa una opción de abordaje (Ceballos-Macías *et al.*, 2018).

¿Qué es la liraglutida?

Las hormonas incretinas se producen en el intestino, son liberadas posterior a la ingesta de alimentos, en respuesta a la producción de insulina para regular la glucosa en sangre (Feinglos *et al.* 2005). El polipéptido insulinotrópico dependiente de la glucosa (GIP) y el péptido similar al glucagón tipo 1, (GLP-1) se han considerado de interés como una de las terapias potenciales para la DM2 debido a su capacidad de mejorar la secreción de insulina inducida por nutrientes (Feinglos *et al.* 2005). La atención se centró en el GLP-1 ya que este reduce la secreción de glucagón y mantiene una mayor eficacia liberadora de insulina en personas con DM2, además de ejercer un efecto de saciedad (Feinglos *et al.* 2005).

La liraglutida es un análogo del péptido similar al glucagón tipo 1 (GLP-1) derivado del propio GLP-1 (Feinglos *et al.*, 2005). Este fármaco se encuentra en fase clínica avanzada (fase III) para el tratamiento de la DM2 y se administra por inyección una vez al día, ya sea como monoterapia o en combinación con fármacos antidiabéticos orales (Feinglos *et al.*, 2005). Los efectos de la liraglutida están mediados exclusivamente por la activación del receptor de GLP-1. Entre sus beneficios, se reportan la reducción de los niveles de HbA1c y de la glucosa (en ayunas y posterior a la ingesta de alimentos), mediante la estimulación de la secreción de insulina dependiente de la glucosa, y la inhibición de la secreción de glucagón (Feinglos *et al.*, 2005). También se ha observado pérdida de peso en pacientes con obesidad y una posible mejora en la función de las células beta. La liraglutida no causa hipoglucemia cuando se utiliza sola, lo que la convierte en un fármaco seguro para evitar efectos adversos como el desmayo, pérdida de consciencia o incluso la muerte (Feinglos *et al.*, 2005). Los principales efectos secundarios de este medicamento son gastrointestinales (náuseas, vómito y diarrea); sin embargo, se reporta que estos síntomas suelen ser leves a moderados, transitorios, y que se presentan principalmente al inicio del tratamiento o con el aumento de la dosis (Feinglos *et al.*, 2005). También se ha reportado ligera inflamación en pancreás, acompañada de la elevación de enzimas pancreáticas y malestar abdominal, por lo que se recomienda evitar los medicamentos GLP-1 en pacientes con cáncer de páncreas o enfermedades pancreáticas. Por sí sola, la liraglutida presenta un riesgo bajo de producir hipoglucemias; sin embargo, cuando se combina con insulina o sulfonilureas puede aumentar dicho riesgo. (Ampudia -Blasco *et al.*, 2010). Otro efecto secundario observado en estudios con roedores es un posible aumento del riesgo de desarrollar cáncer y enfermedades asociadas a disfunción en la tiroides. (Ampudia -Blasco *et al.*, 2010).



Previo a sugerir el uso de la liraglutida se necesita conocer cómo están funcionando los riñones (Tilince *et al.*, 2021). Para ello, se calcula la tasa de filtrado glomerular (TFG), qué indica qué tan bien están funcionando los riñones en limpiar la sangre. La TFG se calcula usando datos como los niveles de creatinina en sangre, edad, raza y antropometría (peso y altura) del paciente (Tilince *et al.*, 2021). Una fórmula muy común para hacer este cálculo se llama fórmula Cockcroft – Gault (Tilince *et al.*, 2021). La liraglutida se puede utilizar incluso en pacientes que presentan una función renal de moderada a reducida (cuando la TFG es de 30 a 60 mL min⁻¹ 1.73 m⁻²), mientras que en la enfermedad renal grave (cuando la TFG es de 15 a 30 mL min⁻¹ 1.73 m⁻²) y en etapa terminal (con una TFG <15 mL min⁻¹ 1.73 m⁻²) debe de utilizarse con precaución ya que hay riesgo de que se presente un daño agudo en los riñones (Tilince *et al.*, 2021).

El GLP-1 es una hormona incretina producida en el intestino, específicamente por las células L, ubicadas en la parte final del intestino delgado (íleon distal) y el inicio del intestino grueso (colon proximal) (Tilince *et al.*, 2021). Esta hormona se libera después de la ingestión de alimentos, especialmente glucosa o carbohidratos, y sus niveles son bajos durante el ayuno (Feinglos *et al.*, 2005). El GLP-1 se une a receptores específicos ubicados en el páncreas, el cerebro, el corazón, los riñones, el sistema digestivo y los vasos sanguíneos (Feinglos *et al.*, 2005). Al activarse, estimula la secreción de insulina sólo en presencia de glucosa, promueve la supervivencia y proliferación de las células beta pancreáticas (Tilince *et al.*, 2021), inhibe la secreción de glucagón, retrasa el vaciamiento gástrico, aumenta la saciedad y reduce el apetito (Tilince *et al.*, 2021). Además, actúa en el cerebro enviando señales que ayudan a disminuir el apetito (Tilince *et al.*, 2021).

La exendina, un análogo de la hormona incretina GLP-1, fue identificada en 1992 en la saliva del monstruo de Gila (un lagarto, *Heloderma suspectum*) (Feinglos *et al.*, 2005). Los científicos notaron que esta sustancia tenía una estructura muy parecida (53%) al GLP-1 humano (Feinglos *et al.* 2005). Sin embargo, no fue hasta 2005 que se empezó a comercializar y utilizar como medicamento con el nombre de “exenatida” (Feinglos *et al.*, 2005). Desde entonces, se han desarrollado varios medicamentos relacionados al GLP-1, basados en exendina (lixisenatida) o en versiones modificadas del GLP-1 humano (liraglutida, dulaglutida, semaglutida) (Feinglos *et al.*, 2005). Estas modificaciones les permiten resistir a la degradación por la enzima DPP-4. Con el tiempo, se mejoró la exenatida para que su efecto durara más tiempo y se creó una versión que se inyecta solo una vez por semana, permitiendo que el medicamento se libere poco a poco. (Feinglos *et al.*, 2005).

Durante su uso en el tratamiento de la DM2 y la obesidad, se ha registrado que los medicamentos que activan al receptor GLP-1, reducen la presión arterial, la albuminuria (presencia de albúmina en

la orina, un signo de daño renal) y el riesgo de algunas complicaciones cardiovasculares (Feinglos *et al.*, 2005). Además, los miembros de esta clase están bajo investigación para su uso en el tratamiento del hígado graso, la demencia y la pérdida de masa ósea. Gracias a los avances en la creación de medicamentos más personalizados, ahora se está trabajando en el diseño de péptidos que puedan actuar sobre varios receptores al mismo tiempo, obteniendo como resultado lograr un mejor control de los niveles de glucosa en sangre y una mayor pérdida de peso que con los medicamentos actuales basados en la GLP -1. (Feinglos *et al.* 2005).

Según su cinética farmacológica, los agonistas del receptor de GLP-1 se clasifican en agentes de acción corta o prolongada. El fármaco de acción corta se conoce como exenatida (nombre comercial Byetta), y se caracteriza porque la concentración circulante del fármaco que dura unas pocas horas; su administración es una inyección subcutánea, dos veces al día, antes de un alimento con una vida media de 3.3 a 4 horas (Tilinc *et al.*, 2021). Los medicamentos de acción prolongada incluyendo a la liraglutida (nombre comercial Victoza, Saxenda), producen una concentración circulante duradera del fármaco con fluctuaciones menores, por lo que tienen mayor capacidad para reducir la glucosa en sangre en ayunas que los de acción corta; su administración es una inyección subcutánea al día, con una vida media de 12.6 a 14.3 horas (Tilinc *et al.*, 2021).

Liraglutida ha sido aprobada por la Agencia Europea de Medicinas (EMA, por sus siglas en inglés) para el tratamiento de la DM2 en combinación con otros antidiabéticos como es la metformina, sulfonilurea o tiazolidinediona (Ampudia -Blasco *et al.*, 2010). En Estados Unidos, el uso de liraglutida también está indicado en monoterapia (Ampudia -Blasco *et al.*, 2010).

Se recomienda iniciar el tratamiento con análogos de GLP-1, se recomienda iniciarse preferentemente en las fases tempranas de la DM2, ya que aparentemente se obtiene una mejor recuperación de la función de las células beta del páncreas y los beneficios clínicos obtenidos son posiblemente más relevantes que en estadios tardíos de la enfermedad (Ampudia -Blasco *et al.*, 2010). Los resultados que respaldan el uso de liraglutida en pacientes con DM2 son la mayor reducción de los niveles de HbA1c con un sólo fármaco antidiabético que con dos o más fármacos, así como la disminución del riesgo de enfermedades del corazón, del peso corporal, de la grasa abdominal, del tamaño de la cintura y de la presión arterial (Ampudia -Blasco *et al.*, 2010). Además, liraglutida mejora la concentración de grasas como el colesterol y los triglicéridos en sangre, así como de otros indicadores relacionados con el riesgo cardiovascular. (Ampudia -Blasco *et al.*, 2010).



La dosis de inicio recomendada para el tratamiento de la diabetes tipo 2 con liraglutida es de 0.6 mg diarios, al menos durante la primera semana. Esta dosis inicial permite mejorar la tolerancia gastrointestinal. Posteriormente, se puede aumentar a 1.2 mg una vez al día. Si los niveles de hemoglobina glucosilada (HbA1c) permanecen por encima del 7.0% (lo cual debe evaluarse cada tres meses), algunos pacientes pueden beneficiarse de una dosis mayor, aumentando a 1.8 mg diarios, que es la dosis máxima autorizada.(Ampudia -Blasco *et al.*, 2010). Debido al bajo riesgo de hipoglucemia, no es necesario monitorear la glucemia capilar durante la administración de liraglutida, a menos que esté combinada con una sulfonilurea y, si es así, se recomienda reducir la dosis de la sulfonilurea para reducir el riesgo de hipoglucemia (Ampudia -Blasco *et al.* 2010).

Las recomendaciones de la Asociación Americana de Diabetes (ADA) y la Asociación Europea para el estudio de la Diabetes (EASD) para el manejo de la hiperglucemia en la DM2 indican que la liraglutida debería iniciarse lo antes posible (entre los 2 – 3 meses) en pacientes con DM2 no controlada, es decir, aquellos que presenten una HbA1c >7.0 % a pesar de recibir la dosis máxima tolerada de metformina o sulfonilureas (Ampudia -Blasco *et al.*, 2010).

La pérdida de peso de al menos 5% del nivel inicial en pacientes con obesidad es clínicamente significativa, ya que mejora varias complicaciones metabólicas y cardiovasculares relacionadas con el exceso de peso, como la hipertensión arterial, niveles elevados de colesterol, triglicéridos y glucosa en sangre. (Seo *et al.* 2019; Tilinca *et al.*, 2021). El tratamiento farmacológico con liraglutida generalmente se recomienda en pacientes que no presentaron mejoría significativa después de modificaciones en el estilo de vida y continuar un IMC mayor o igual a 30 kg m⁻² o mayor o igual a 27 kg m⁻², con enfermedades asociadas al exceso de peso, como la diabetes (Seo *et al.* 2019; Tilinca *et al.*, 2021).

¿Conoces el centro de atención a pacientes con diabetes en el IMSS (CADIMSS)?

Los Módulos DiabetIMSS fueron implementados a partir de octubre del año 2008. Actualmente se encuentran dentro del marco del Programa Sectorial Derivado del Plan Nacional de Desarrollo 2019 – 2024 (IMSS, 2022). Se utiliza un protocolo de atención integral para el manejo de los pacientes con DM2 que tiene como objetivo la actuación del personal de salud de los distintos niveles de atención para estandarizar las acciones y actividades referentes a la prevención, diagnóstico y tratamiento de la diabetes mellitus tipo 2, con base en evidencia científica y recomendaciones por expertos, para así obtener un enfoque multidisciplinario e integral (Medina- Chávez *et al.*, 2022).

CADIMSS implementa, para cada paciente, una estrategia de atención médica y sesiones educativas durante 6 meses al inicio del diagnóstico. Se ofrece atención individual por un médico familiar del IMSS y sesiones educativas impartidas por el personal de enfermería por lo menos una vez al mes. Como el manejo es integral, se apoya con personal de nutrición para orientación sobre la dieta indicada para cada paciente, y con la Coordinación de Asistentes Médicos y del área de Trabajo Social para el apego a tratamiento. Con la finalidad de llegar a las metas de control, si es necesario, se puede citar al paciente con mayor frecuencia para realizar ajustes terapéuticos, incluyendo evaluación del automonitoreo con ajustes de insulina, utilizando medidas de HbA1c, glucemia en ayuno, posterior a la ingesta del alimento, colesterol, triglicéridos, presión arterial, peso y circunferencia cintura - cadera. (IMSS, 2022).

El protocolo de atención (PAI) se establece con el propósito de estandarizar líneas de acción que permitan normalizar las actividades que se deben realizar por el equipo multidisciplinario de salud en los diferentes niveles de atención, promoviendo estilos de vida saludables, estableciendo diagnósticos oportunos, otorgando atención y tratamientos adecuados, mejorando la evaluación y seguimiento de los pacientes afectados por esta enfermedad, previniendo las complicaciones, y brindando una atención integral y de calidad para el beneficio de los pacientes derechohabientes del IMSS (Medina-Chávez *et al.*, 2022).

Discusión

La liraglutida es un fármaco que ayuda de una manera integral al organismo, incrementando la secreción de insulina, disminuyendo el daño a proteínas medida a través de la HbA1c, estimula la proliferación de células pancreáticas y su supervivencia, reduce el apetito debido a que ayuda a retardar el vaciamiento gástrico y a disminuir los movimientos gástricos. Asimismo, disminuye el riesgo cardiovascular, a través de la reducción de peso del paciente, del tejido adiposo visceral, de la presión arterial, la mejora de la dilatación vascular, la inducción de diuresis y natriuresis, y la mejora de dislipidemias (niveles elevados de colesterol y triglicéridos). El centro de atención a pacientes con DM2 del IMSS facilita liraglutida como medicamento a todo aquel paciente que presente las condiciones para su uso. Además, las intervenciones educativas brindadas en el CADIMSS contribuyen de manera integral a la modificación positiva de estilos de vida.



Agradecimientos

A todo el personal del laboratorio de Estrés Oxidativo del Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste, S.C. (CIBNOR) y del Instituto Mexicano del Seguro Social (IMSS) involucrados en la consolidación del estudio y la redacción de este trabajo. RBO es beneficiaria de una beca de servicio social en investigación en medicina del IMSS. Número de Registro en el Comité Local de Investigación en Salud No. 301 del IMSS, R-2024-301-019 y en COMBIOETICA 03 CEI 001 2017082.

Referencias

- Ampudia-Blasco, F.J., C.C. Gómez, X.C. Claramunt, J.G. Alegría, E.J. Gimeno, J.M. Bravo, P.M. Raya, J.N. Pérez y M.P. Domingo. 2010. *Liraglutida en el tratamiento de la diabetes tipo 2: recomendaciones para una mejor selección de los pacientes, desde una visión multidisciplinar*. Avances en diabetología 26:226-234.
- Ataey, A., E. Jafarvand, D. Adham y E. Moradi-Asl. 2020. *The relationship between obesity, overweight, and the human development index in world health organization eastern mediterranean region countries*. Journal of Preventive Medicine and Public Health 53:98.
- Bansal, N. 2015. *Prediabetes diagnosis and treatment: a review*. World journal of diabetes 6:296.
- Ceballos-Macías, J.J., R. Pérez Negrón-Juárez, J.A. Flores-Real, J. Vargas-Sánchez, G. Ortega-Gutiérrez, R. Madriz-Prado y A. Hernández-Moreno. 2018. *Obesidad. Pandemia del siglo XXI*. Revista de sanidad militar 72:332-338.
- Chandrasekaran, P., y R. Weiskirchen. 2024. *The role of obesity in type 2 diabetes mellitus—An overview*. International Journal of Molecular Sciences 25:1882.
- Feinglos, M., M. Saad, F. Pi-Sunyer, B. An, O. Santiago, y L.D.R.S. Group. 2005. *Effects of liraglutide (NN2211), a long-acting GLP-1 analogue, on glycaemic control and bodyweight in subjects with type 2 diabetes*. Diabetic Medicine 22:1016-1023. (IMSS), I. M. d. S. S. 2022. *Lineamiento CADIMSS - 06 de mayo 2022*. En: <https://es.scribd.com/document/585707999/Lineamiento-CADIMSS-06Mayo2022>. (consultado el 26/09/2024).
- INEGI. 2022. *Estadísticas de defunciones registradas de enero a junio 2022 (preliminar)*. En: <https://www.inegi.org.mx/contenidos/saladeprensa/boletines/2023/DR/DR-Ene-jun2022.pdf>. (consultado el 26/09/2024).

INEGI. 2023. *Estadísticas de Defunciones Registradas (EDR) de enero a junio de 2023 (preliminar)*.

En:

https://www.inegi.org.mx/contenidos/saladeprensa/boletines/2024/EDR/EDR2023_ene-dic.pdf. (consultado el 26/06/2024).

Mera Hernández, T. 2024. *Correlación entre la pérdida de peso a 6 meses y el porcentaje de apego a la guía de práctica clínica para el diagnóstico y tratamiento del sobrepeso y obesidad exógena; durante la consulta externa en trabajadores del régimen ordinario adscritos a umf# 45, SLP, durante el año 2021*. REPOSITORIO NACIONAL CONACYT.Mexico. 72 pp

Molina, R. y C. Rodríguez. 2012. *Definición, clasificación y diagnóstico de la diabetes mellitus*. Revista Venezolana de Endocrinología y Metabolismo 10:7-12.

Sellén Crombet, J., E. Sellén Sanchén, L. Barroso Pacheco y S. Sellén Sánchez. 2009. *Evaluación y diagnóstico de la Hipertensión Arterial*. Revista Cubana de Investigaciones Biomédicas 28:0-0.

Seo, M.H., W.Y. Lee, J.H. Kim, J.H. Kang, K.K. Kang, B.Y. Kim, Y.H. Kim, W.J. Kim y E.M. Kim. 2019. 2018 *Korean society for the study of obesity guideline for the management of obesity in Korea*. Journal of Obesity & Metabolic Syndrome 28:40.

Tilinca, M.C., R.A. Tiuca, A. Burlacu y A. Varga. 2021. *A 2021 update on the use of liraglutide in the modern treatment of 'diabesity': a narrative review*. Medicina 57:669.

Williams, R., S. Karuranga, B. Malanda, P. Saeedi, A. Basit, S. Besancon, C. Bommer, A. Esteghamati, K. Ogurtsova y P. Zhang. 2020. *Global and regional estimates and projections of diabetes-related health expenditure: Results from the International Diabetes Federation Diabetes Atlas*. Diabetes Research and Clinical Practice 162:108072.

Medina-Chávez, J.H., M. Vázquez-Parrodi, P. Mendoza-Martínez, E.D. Ríos-Mejía, J.C. Anda-Garay y D.A. Balandrán-Duarte. 2022. *Protocolo de Atención Integral: prevención, diagnóstico y tratamiento de diabetes mellitus 2*. Revista Médica del Instituto Mexicano del Seguro Social 60:S4.



Cita

Berger Ochoa R., R. Gaxiola-Robles, A. S. Álvarez Villaseñor, J.M. Salazar Cabanillas y T. Zenteno-Savín. Liraglutida, más que un medicamento de control de la diabetes. Recursos Naturales y Sociedad, 2025. Vol. 11 (3): 37-54. <https://doi.org/10.18846/renaysoc.2025.11.11.03.0003>

Sometido: 7 de octubre de 2024

Aceptado: 8 de julio de 2025

Editores asociados: Dra. Laurence Stephanie Mercier

Editores ejecutivos: Dra. Crisalejandra Rivera-Pérez

Diseño gráfico editorial: Ing. Francisca Elizabeth Villegas Carrasco

What do we know about microplastics?

¿Qué sabemos sobre los microplásticos?

Stephanie Hernández-Carreón^{1*}, Judith Virginia Ríos-Arana¹

Resumen

Los plásticos son contaminantes ampliamente distribuidos y detectados en agua, suelo, aire y seres vivos. En años recientes, los plásticos han atraído la atención de la ciudadanía por las islas de basura plástica que se han acumulado a lo largo del tiempo en los mares y los efectos ocasionados en animales marinos como las tortugas y aves. En el ambiente, el viento, agua, sol y los organismos microscópicos degradan y rompen el plástico, liberando y/o formando pequeños fragmentos (<5 mm) llamados microplásticos (MPs) cuyos efectos en los seres vivos son estudiados en la actualidad. ¿Qué tipos de MPs hay en el ambiente? ¿Cómo se detectan los MPs en el ambiente? ¿Afectan los MPs a los seres vivos en forma negativa? Poco se sabe en la actualidad sobre ello, aun cuando se han desarrollado diversos métodos para detectar e identificar MPs, y estudiado el efecto de algunos de ellos en diversos organismos. Este documento, por tanto, da una perspectiva general sobre los microplásticos y expone los retos que se presentan para generar el conocimiento apropiado que permee en la población y contribuya a la reducción de la problemática ocasionada por el uso indiscriminado y desecho de plásticos.

Palabras clave: Plástico, microplásticos, contaminación.

¹ Instituto de Ciencias Biomédicas, Universidad Autónoma de Ciudad Juárez. Av. Benjamín Franklin 4650, Zona PRONAF Condominio La Plata, 32310, Ciudad Juárez, Chihuahua, México.

*Autor de correspondencia: al216616@alumnos.uacj.mx Phone: +52 656 529 6799



Abstract

Plastics are ubiquitous pollutants detected in water, soil, air, and organisms. In recent years, plastics have gained public attention because of the garbage patches accumulated in the sea, and their effects on marine animals like turtles and birds. In the environment, plastics are broken down by sunlight, water, wind, and microorganisms, turning them into pieces smaller than 5 mm called microplastics (MPs), whose effects are being studied to this day. What kind of MPs are there in the environment? How are MPs detected? Do they have negative effects on living beings? Little is known about it, even though several methods have been developed to detect and identify MPs, in addition to the studies done to determine their effects on organisms. Hence, this document shows a general perspective on microplastics and points out the challenges to generate the appropriate knowledge for the public that will contribute to reducing the issues generated by the indiscriminate use of plastics and their subsequent disposal.

Keywords: plastic, microplastics, pollution

1. Introduction

Plastic represents one of the biggest pollutants nowadays: In 2022, almost 400 metric tons of plastic were produced around the world (Statista, 2024), and about 50% of plastic production ends up in landfills or the environment (Chamas, *et al.*, 2020), where plastics concentrate given the small amount that is recycled (about 9%; Evode *et al.*, 2021) and their very slow degradation process in the environment (from 10-20 to 500-1000 years; Chamas *et al.*, 2020). Additionally, plastic production increases as it replaces other materials, and so does the number of single-use plastics. For these reasons, MPs are considered an emergent pollutant (da Silva *et al.*, 2020). Once in the environment, plastics degrade into smaller particles (<5 mm) named microplastics (MPs). Therefore, plastics and their degradation by-products (toxic substances included) may impact organisms either by ingestion or entanglement (Zantis *et al.*, 2021) when released into the environment. MPs were first reported by Carpenter & Smith (1972) in the 1970s when they detected small plastic particles (0.25-0.5 cm) in the Sargasso Sea. Since then, research about MPs has increased, evidencing their presence in land, air, water, and organisms, including human blood and placenta (Kanhai, *et al.*, 2018; Mistri *et al.*, 2022; Ragusa *et al.*, 2021). Most scientific information about MPs focuses on describing their shape, color, and chemical composition, as well as the marine or freshwater impacts linked to their presence

(Anbumani & Kakkar, 2018; Li *et al.*, 2018; Prata *et al.*, 2019). For that account, this review summarizes basic and general information about MPs, that allows the public and young students to dive into key concepts of MPs types and origin, the ways they are introduced to ecosystems, methods and techniques for MP sampling and detection, how organisms are affected, and what is still left to do in the microplastic research field.

2. Microplastics

2.1 Origin and types

Microplastic origins go back to the 1950s when plastic materials were introduced to the public. Plastic versatility and low-cost production led to diverse uses of this material: it can be found in clothes, medicine, food packaging, kitchenware, toys, cosmetic products, and electronics, among other products (Praveena *et al.*, 2018). Nearly 400 million tons of plastic were produced in the year 2022 only (Statista, 2024), some of these plastics are directly produced as small particles (primary microplastics). The plastics that enter the ecosystems as waste are degraded into smaller pieces (secondary microplastics) by water erosion or by other forms of physical abrasion, and light (ultraviolet light; Galloway *et al.*, 2017).

Due to their characteristics, MPs are classified by shape and the substance they are made of (polymer). Shape classification includes films, which have a thin paper-like shape; fibers which are thin and long like a piece of thread; spheres which are round ball-like shaped (sometimes perforated); foams which have a sponge-like structure; and irregular forms (or fragments), as their name indicates, do not have a defined shape (Figure 1; Ding *et al.*, 2019).

According to the substances (polymers) from which plastics are made, they are classified as low-density polyethylene (LDPE, plastic bags material), high-density polyethylene (HDPE, shampoo bottles material), polypropylene (PP, food containers material), polystyrene (PS, packing material), and polyvinyl chloride (PVC, pipes or window frames material), among others (Matsui *et al.*, 2020). Shape and type of polymer are often used to describe the MP detected in rivers, soils, air, and/ or organisms (Wang *et al.*, 2017).

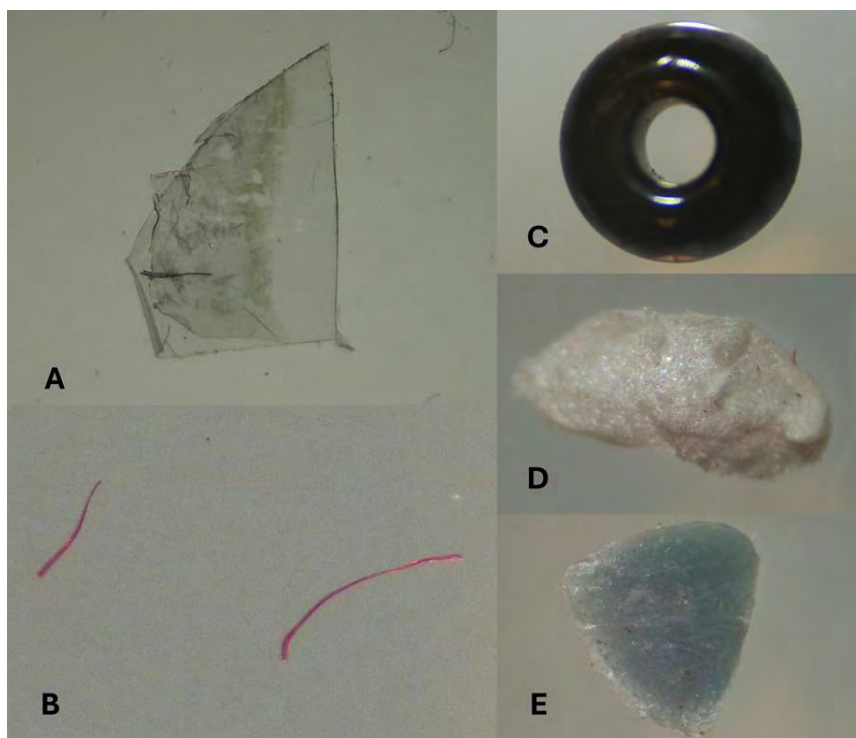


Figure 1. Microplastic shapes: film (A), fibers (B), bead (C), foam (D), irregular or fragment (E).

3. Microplastics in the environment

3.1 Where do they come from?

The ways plastics enter ecosystems are diverse but ultimately derive from the human lifestyle: plastics are part of many items used by humans in agricultural practices, food packaging, clothes, and tech items such as phones and computers, among others (Samandra *et al.*, 2022). Said items are made for both single or multiple uses but, after fulfilling their purpose, they will eventually be deposited either in the garbage or in the environment (soil or water bodies) where plastics can last for years ($[> 10 \text{ years}]$; Chamas *et al.*, 2020; Corradini *et al.*, 2019; Xia *et al.*, 2021) and degrade into microplastics by the effects of sunlight (ultraviolet light), water movement, microorganisms, etc. Then MPs are distributed by the wind and fall onto the ground (atmospheric deposition), or by water to other places (Figure 2; Liu *et al.*, 2018; Zhang *et al.*, 2017). Domestic wastewater can be another source of microplastics, for instance: microfibers are released in wastewater from washing machines, which, treated or not, end up in rivers or the sea; also, water from runoffs might contain plastic particles (Napper *et al.*, 2016; Ziajahromi *et al.*, 2017). However, information about MPs presence, distribution, and degradation is not equally documented in water, air, and soil.

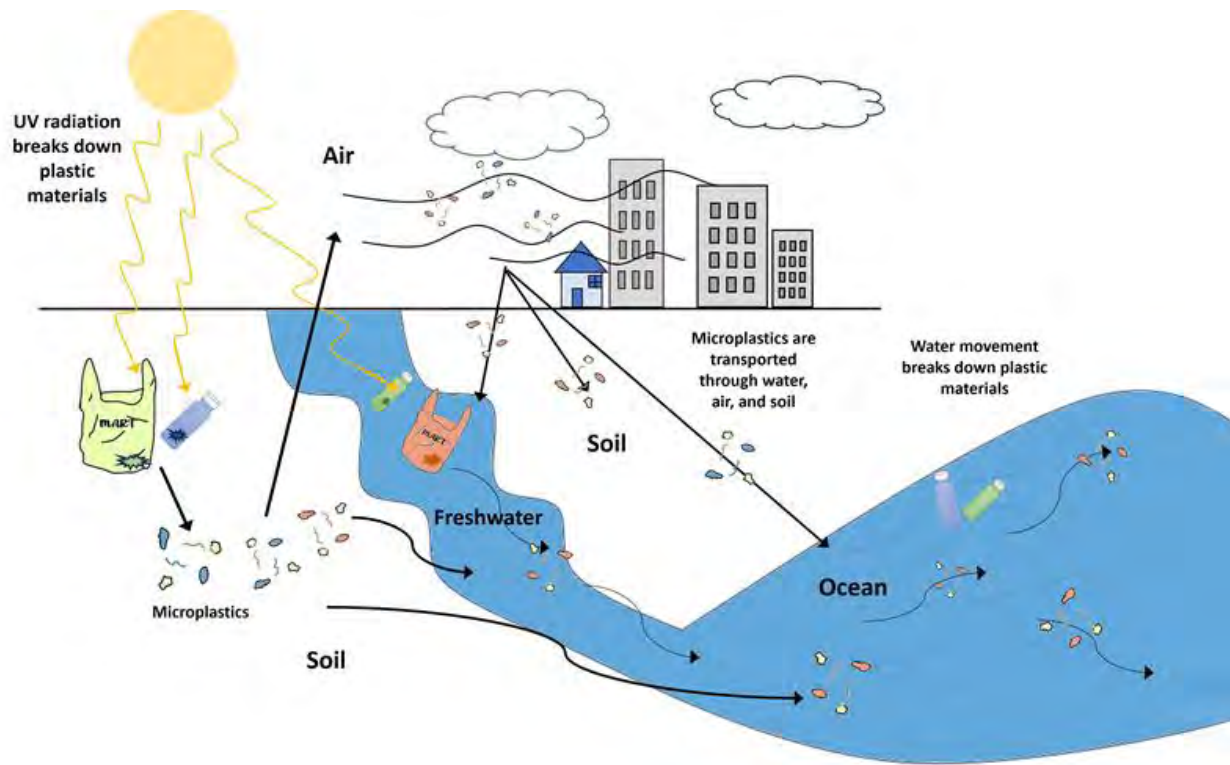


Figure 2. Production and transport of microplastics in the environment.

3.2 Distribution of microplastics

Since 1972, the presence of MPs has been reported in subsequent studies done in countries like Dominica, France, Australia, Japan, Mexico, and Panama (Derraik, 2002), showing an increase of these particles in marine waters from the late 1980s to the early 2000s. Later, during the 2010s-2020s, MPs in freshwaters and sediments were detected in Mongolia, Italy, UK, Germany, Austria, USA, Argentina, Brazil, Chile, Colombia, China, Mexico, Spain, and Peru, among other countries (Eerkes-Medrano *et al.*, 2015; Orona-Návar *et al.*, 2022). In soils, MPs have been found in Switzerland, China, South Korea, Spain, Germany, Chile, Mexico, and the US (Scheurer & Bigalke, 2018; Yang *et al.*, 2022).

As previously mentioned, atmospheric deposition can be a source of MPs (Obbard, 2018), and air in China, France, UK, Germany, Spain, Turkey, Taiwan, Indonesia, Iran, Vietnam, Japan, Nepal, and the US has been reported to contain MPs (O'Brien *et al.*, 2023; Xuewen *et al.*, 2022). Even though research in soil and air is increasing, in comparison to water, these two media remain underexplored, as Xuewen and collaborators (2022) stated: “Atmospheric MP research is still in its early stages”.



Meanwhile, Batool *et al.*, (2022) found that only 23% of the publications from 1998 to 2021 were related to the terrestrial environment.

The wide distribution of microplastics in nature leads to the uptake of these particles by organisms through 1) the roots of plants grown in soils polluted with these particles, 2) ingestion by aquatic and terrestrial organisms, and 3) inhalation (Austen *et al.*, 2022; Xie *et al.*, 2022). Up to 110 MPs per organism (Figure 3) have been detected in cetaceans (such as whales and dolphins), seals (Nelms *et al.*, 2019), marine turtles (Caron *et al.*, 2018), and fish (Mistri *et al.*, 2022). In terrestrial organisms, MPs have been found in dogs (2.36-485.77 $\mu\text{g/g}$; Hu *et al.*, 2024), earthworms (14.8 \pm 28.8 particles/g), and chicken (129.8 \pm 82.3 particles/g; Huerta *et al.*, 2017). Humans are not exempt from MP exposure: MPs have been detected in placenta (Ragusa *et al.*, 2021), blood (Leslie *et al.*, 2022), testis (Zhao *et al.*, 2023), kidney, liver, and brain (Nihart *et al.*, 2025). Researchers hypothesize that the accumulation of MPs can be the result of eating food or drinking bottled water containing these particles (Zhou *et al.*, 2021).

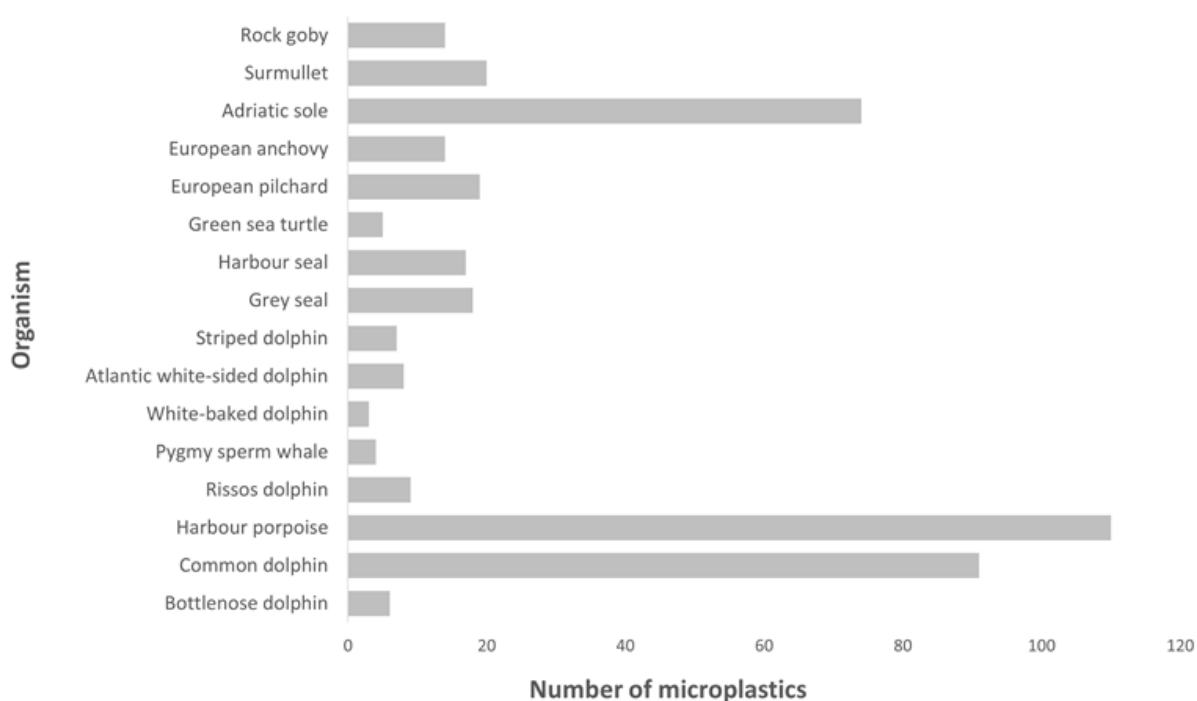


Figure 3. Number of microplastics found in the gastrointestinal tracts of different organisms.

3.3 How do microplastics affect living organisms?

Microplastic effects may be as diverse as living organisms are. Studies in algae have shown that MPs interfere with photosynthesis, which is the process that plants use to produce sugars (Wu *et al.*, 2019), and with the metabolic processes of rotifers and cladocerans (Figures 4 and 5), which are minute aquatic animals (zooplankton organisms; Jeong *et al.*, 2016; Parolini *et al.*, 2023). In marine mollusks (bivalves, e.g. oysters), exposure to MPs reduces reproductive cells size and delays larval development (Sussarelu *et al.*, 2016); fish behavior is altered by microplastics, producing seizures and erratic movements, also, a decrease in their size and anatomical changes (tails bending upward or downward) were also observed due to MPs presence (Cong *et al.*, 2019; Mak *et al.*, 2019). A very different effect is observed in insect-like animals named collembolans, due to MPs exposure: the percentage of beneficial microbes (Bacteroidetes) is reduced in gut microbiota (Zhu *et al.*, 2018). In humans, MPs may increase the risk of heart attack and strokes, reduce the amount of sperm (Hu *et al.*, 2024; Marfella *et al.*, 2024), and may cause respiratory issues (Amato-Lourenço *et al.*, 2020). Laboratory experiments in human stem cells have shown that MPs (Polystyrene [PS]) interfere with protein activity, affecting the normal development of neurons (Hua *et al.*, 2022); it also reduces the viability of human umbilical cells (Lee *et al.*, 2021). Studies about the impacts of microplastics on human health are still limited.

Plastics are usually treated with other substances to improve their hardness, heat resistance, color, or other physical characteristics. This modification alters the effects they may cause in organisms, such is the case of bisphenol A (BPA; drinking water bottles material), which is associated with alterations in hormone functions that interfere with reproductive processes (Siracusa *et al.*, 2018). Additionally, given that plastics are considered waterproof (hydrophobic), microorganisms and substances such as metals and pesticides can adhere to their surface (Borges-Ramírez *et al.*, 2021; Brennecke *et al.*, 2016; Velzeboer *et al.*, 2014), possibly increasing the exposure and ingestion of these contaminants (Basseling *et al.*, 2012; Barboza *et al.*, 2018).

The outcome of the exposure to microplastics is still being explored, but the type of particles (shape, size, and polymer) plays an important role in the effects of MPs on living organisms. However, it is important to mention that most microplastic effects have only been described in experiments under specific temperature, light, and other physical and chemical factors.

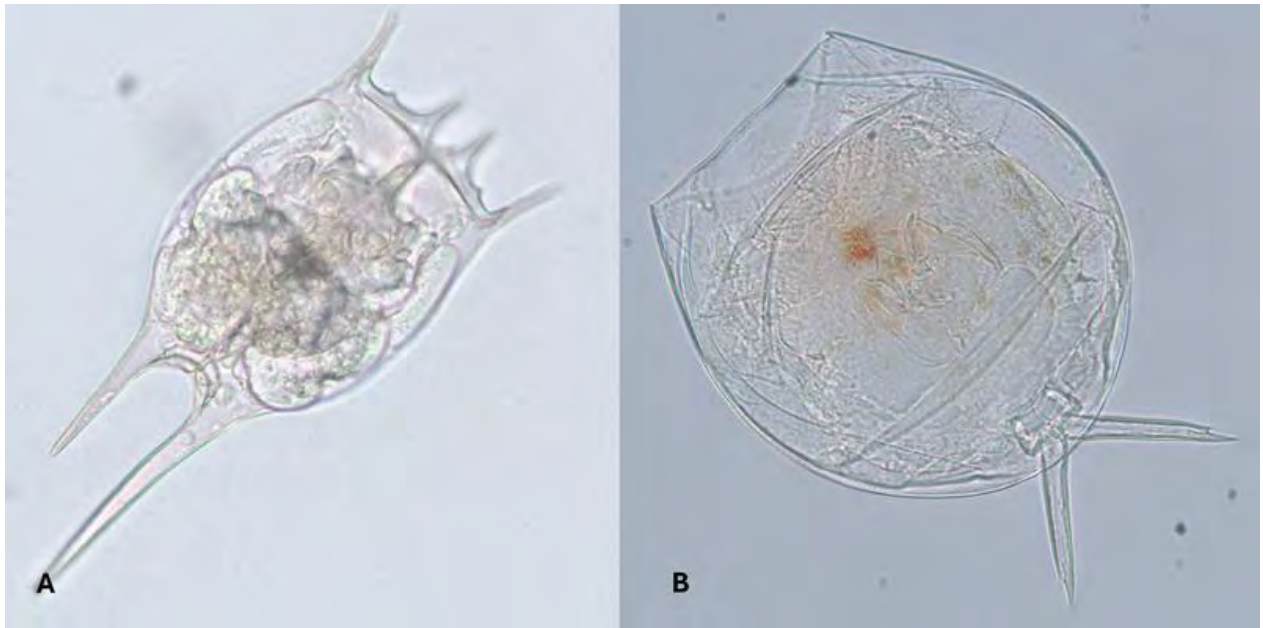


Figure 4. Rotifers: *Brachionus havanensis*, Rousselet, 1911 (A), and *Lecane unguolata*, Rosse, 1887 (B)

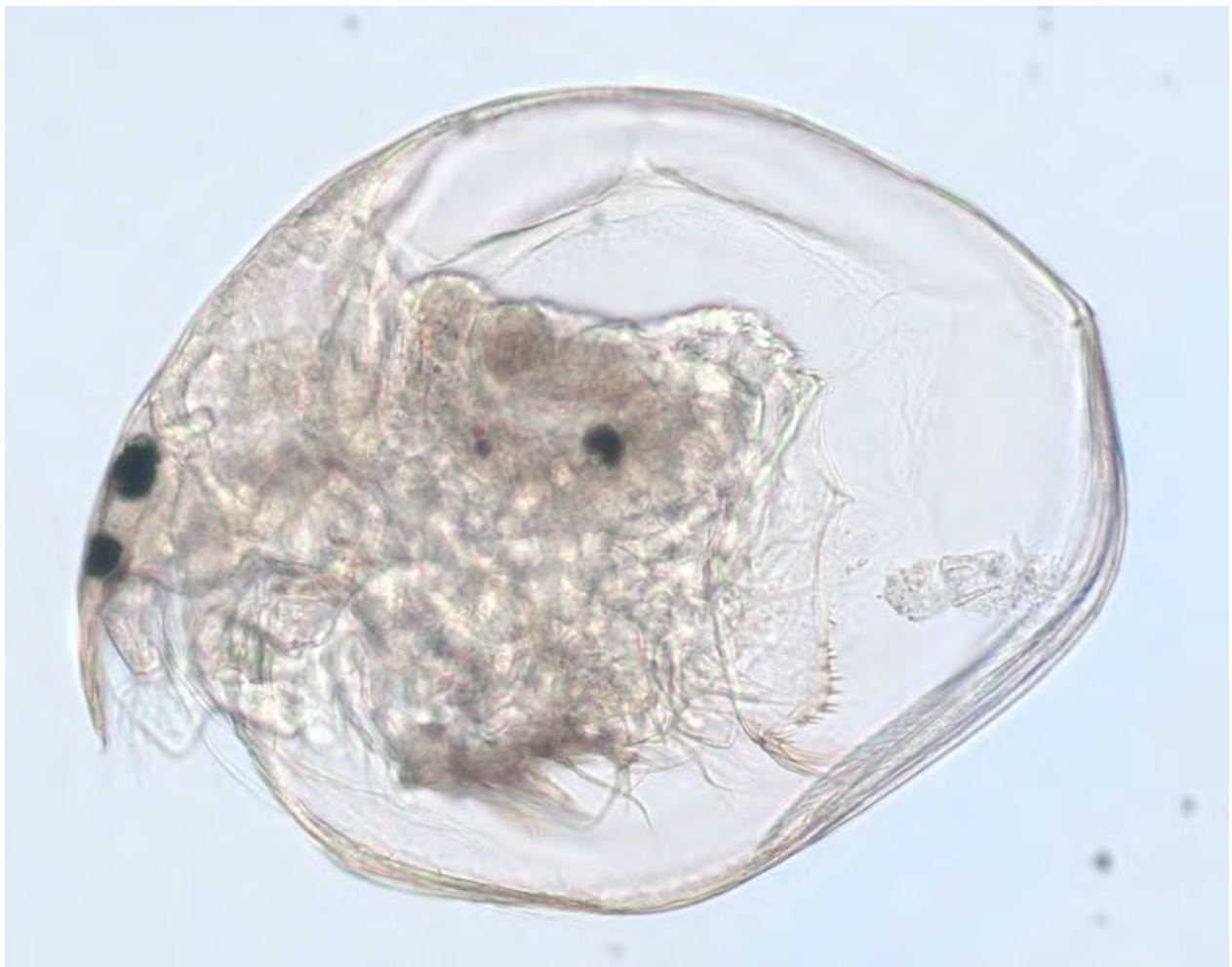


Figure 5. Cladoceran (*Chydorus brevilabris* Frey, 1980). Images are courtesy of Judith Virginia Ríos Arana.

4. How to detect microplastics in the environment?

Several processes have been used for microplastic detection and identification. The selection of the process depends on where researchers are looking for (soil, water, air, etc.), the study purpose (quantification, identification, detection in organisms, etc.), and resource availability. There is no official method by the corresponding environmental authorities or researchers for microplastic studies, nevertheless, there are some practices that prevail among microplastic research, as shown in Figure 6. The following sections summarize the phases and processes used for microplastic collection, extraction, and identification.

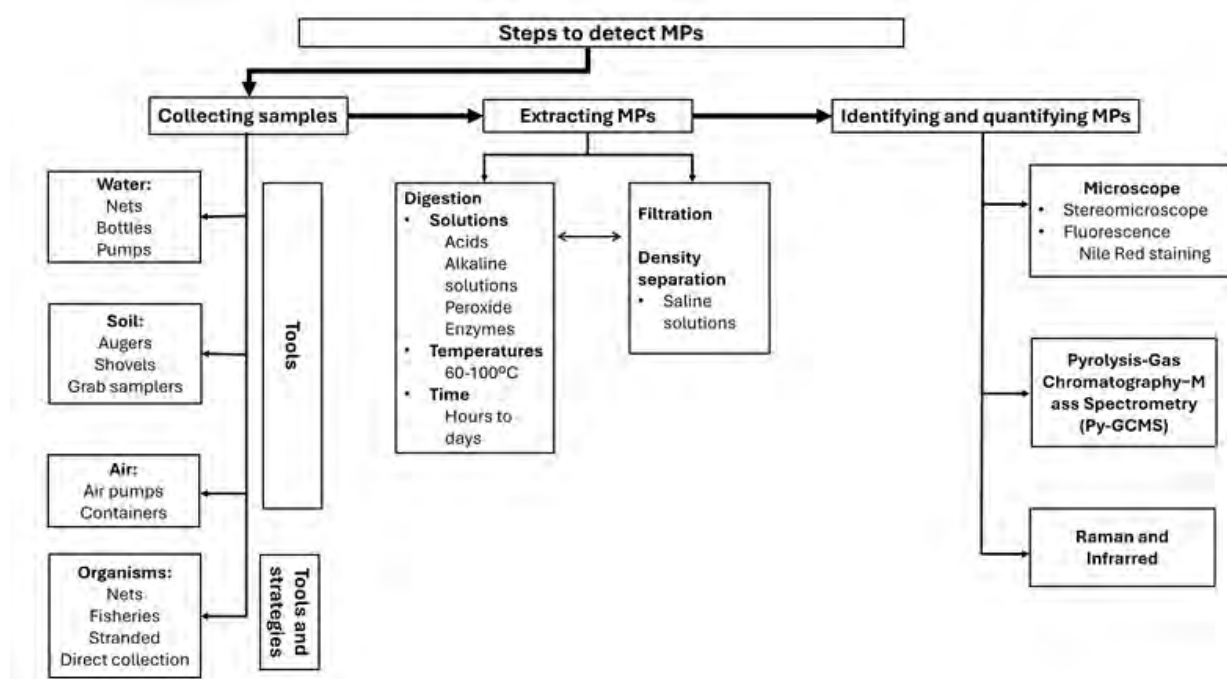


Figure 6. Phases, tools, procedures, and instruments used in MPs detection and identification.

4.1 Collecting MPs in the environment: Sampling methods

The main purpose of microplastic sampling methods is to obtain samples of water, soils, sediments, air, or organisms that guarantee the presence or absence of these particles. Tools for sample collection are selected based on the media (e.g. soil or water), sampling site, required sample volume, type of sample (grab or composite), and the size of MPs that is being searched among others (Prata *et al.*, 2019).



In water, nets like plankton, trawling, and sieves with varying pore size (<1 cm; Figure 7A and B), and containers (glass or metal; Figure 7C) are used to collect MPs (Ding *et al.*, 2019; Shim *et al.*, 2016; Zhang *et al.*, 2017). The use of nets and sieves allows the estimation of MPs concentration in large (>20 L) or small volumes (300—1000 mL) of water, while bulk samples of surface water are collected in containers (Barrows *et al.*, 2018; Lahens *et al.*, 2018). The amount of MPs detected may vary independently of the chosen sampling tool (Lindeque *et al.*, 2020): MPs above filter porous size can be concentrated in small volumes when filtered through plankton nets, while all kinds of MPs sizes could be collected in containers.

For sediments and soils, samples (50 g to 4 kg) are collected using augers (metallic cylinder;), stainless-steel shovels, and grab samplers (metallic clamp-like cylinder, Figure 7D) from one or more depths (e.g. 0-10 cm; Möller *et al.*, 2020; Corradini *et al.*, 2019; Xia *et al.*, 2021; Choong *et al.*, 2021; Scheurer y Bigalke, 2018; Zhang y Liu, 2018). Sample amount and depth of sampling may influence the number of MPs detected in a sample.

Even though one might not think that MPs are floating in the air, studies have reported air deposition as an important source of microplastic pollution in soil or water (Napper *et al.*, 2023; Sun *et al.*, 2022). MPs collection in air is done by either pumping air into a glass flask containing deionized water (Xie *et al.*, 2022) or letting particles fall freely into a glass container, although this method takes more time (hours or even days; Dris *et al.*, 2016). Pumping air is an expensive method but allows to measure air volume, and estimate MPs concentration, while the glass container method is cheaper and easy to install, but air volume cannot be measured and small particles may not be collected.

To find MPs in organisms, they must first be collected and then processed to “extract” MPs from their bodies. The use of nets is common to collect minuscule animals (not perceived at simple sight; Cole *et al.*, 2014; Yu *et al.*, 2020), as well as fish and bivalves in aquatic systems. Fish and bivalves can also be bought from local fishermen (Fischer & Scholz-Böttcher, 2017; Liu *et al.*, 2021; Nalbone *et al.*, 2021). Marine mammal samples have been obtained from stranded animals (Nelms *et al.*, 2019), scats (Perez-Venegas *et al.*, 2020), and even from hunters (Moore *et al.*, 2020). Once the organisms or their remains are collected, the samples are prepared and processed.

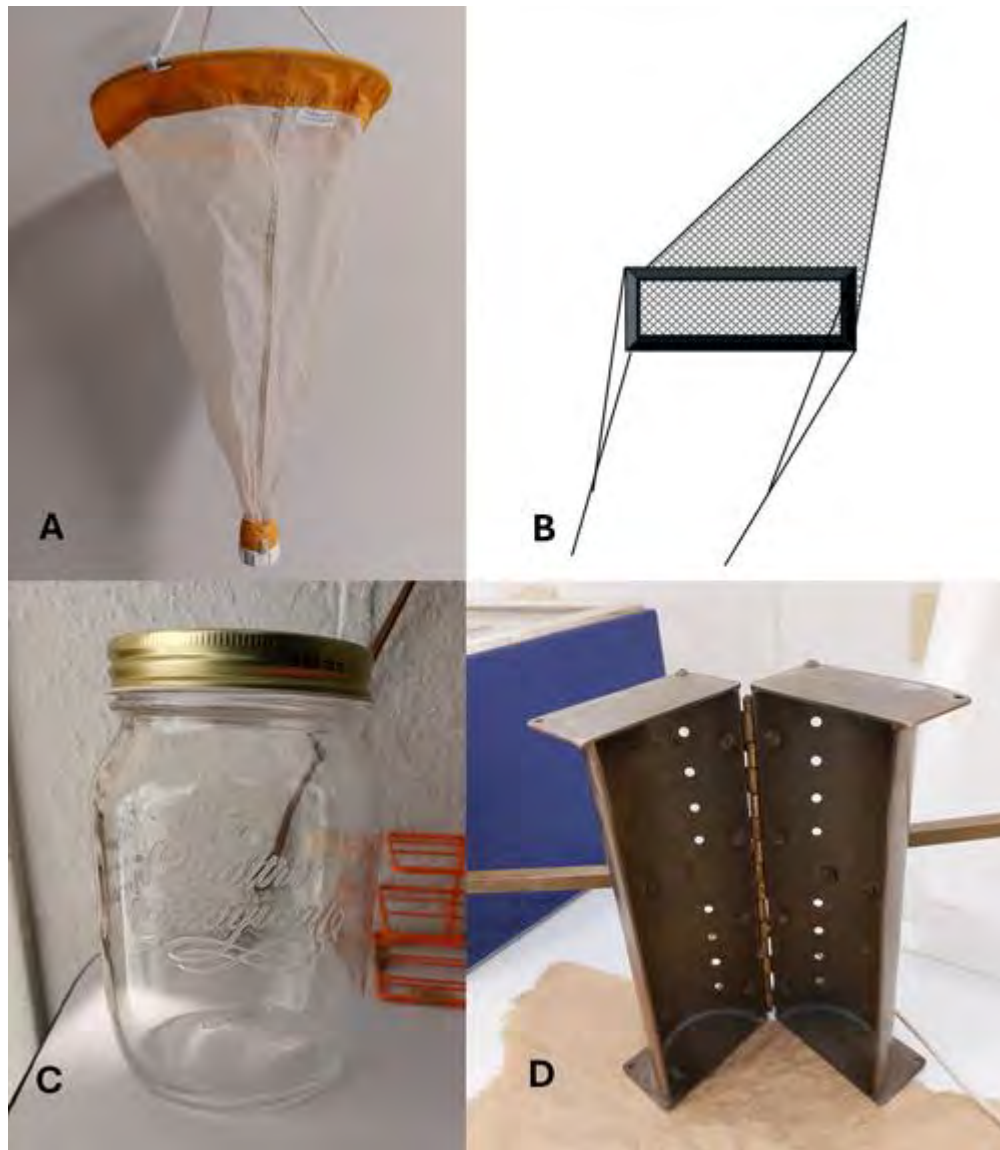


Figure 7. A. Plankton net. B. Neuston net. C. Glass container. D. Grab sampler (Van Veen)

4.2 Procedures used to extract MPs from the environment and organisms

After sample collection, non-plastic particles are removed by filtration, organic matter is destroyed (by digestion), and MPs are isolated by density separation (mass differences) from other particles. These procedures do not follow an established order: some researchers digest the samples before the density separation (Liu *et al.*, 2021), others after (Xia *et al.*, 2021), and some do not include density separation (Bian *et al.*, 2022).

Filtration is used in water samples to concentrate particles in a filter before and/or after the digestion and separation steps. Filters with small pores (0.45 microns, smaller than a bacterium) are often



used to retain the plastic particles from the samples (Scheurer & Bigalke, 2018; Xu *et al.*, 2021; Zhang & Liu, 2018).

Organic matter can be mistakenly identified as microplastics, and it must be disintegrated with acids, alkaline solutions (e.g., caustic soda), peroxide, or even enzymes (proteins that degrade organic matter; Cole *et al.*, 2014; Löder *et al.*, 2017; Naidoo *et al.*, 2017; Zhao *et al.*, 2014). This is usually done at high temperatures (60 - 100 °C) to speed up the process (Erni-Cassola *et al.*, 2017). Table 1 presents specific conditions for MPs isolation from environmental samples and organisms.

When looking for microplastics in soils, sediments, or water, microplastics must be separated by density from other particles. Salts like sodium chloride (Vermaire *et al.*, 2017) or calcium chloride (Stolte *et al.*, 2015) are used to prepare solutions that allow microplastics to float and facilitate their recovery from a sample.

Table 1. Microplastic extraction-isolation process: conditions used for the elimination of organic matter

Substance	Sample	Time	Temperature	Reference
Peroxide	Sand	1 h	60°C	Erni-Cassola <i>et al.</i> , 2017
		7 h	100 °C	
Acid	Fish	Overnight	Room temperature	Naindoo <i>et al.</i> , 2017
		Minutes (not specified)	80°	
Alkaline (Caustic potash)	Beluga whale stomach and intestine	2 weeks	Room temperature	Moore <i>et al.</i> , 2020
Alkaline (Caustic potash)	Water and sediment	~48h	45°C	Liu <i>et al.</i> , 2021
	Fish	48-72h		
Peroxide	Water	1 h	75°	Silva y Sousa, 2021
Peroxide	Sediment	24 h	Room temperature	Xia <i>et al.</i> , 2021
Peroxide	Water	5 h	80°C	Xu <i>et al.</i> , 2021

4.3 Procedures for MP identification

Once microplastics have been isolated from samples, they can be identified and quantified through different instruments (Figure 6).

Fibers, fragments, or films, among other MP shapes and colors, are identified under stereoscopic microscopes (Shruti *et al.*, 2019), but other materials can be misidentified using this instrument, such as non-plastic particles that look like plastics to the naked eye. MPs are dyed with Nile Red (fluorescent dye) to improve visual MPs identification using fluorescent light (fluorescence microscopy; Shim *et al.*, 2016). This substance makes microplastics emit light when they are observed under the microscope (Figure 8).



Figure 8. Microplastic (fiber) dyed with Nile Red under a fluorescence microscope (a non-plastic particle is observed partially under the fiber).



Other procedures for MPs identification and quantification are Pyrolysis-Gas Chromatography–Mass Spectrometry (Py-GCMS), Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR), and Raman spectroscopy. In Py-GCMS, microplastic substances are “broken in pieces” with heat and the elements that compose the plastic are identified by comparing to registered patterns of MPs (Bouزيد *et al.*, 2022; Fischer & Scholz-Böttcher, 2017). This procedure destroys the sample, but elements from organic matter can interfere with the identification (Fabbri *et al.*, 1998). A representation of the instrument used in this procedure is shown in Figure 9.

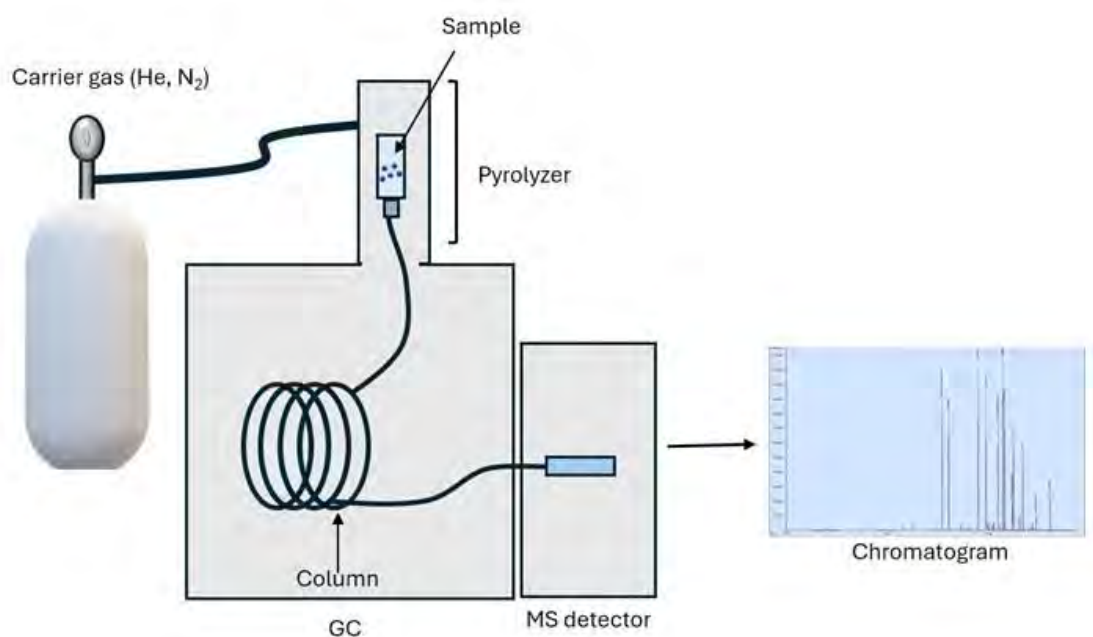


Figure 9. Pyrolysis-Gas Chromatography–Mass Spectrometry equipment.

In FTIR and Raman spectroscopy, the samples are exposed to infrared light (heatwaves), which is absorbed by specific chemical compounds and generates a pattern (spectrum). These patterns are compared to the ones found in databases to identify the type of MPs in the sample (Cole *et al.*, 2014; Stevens, 1999; Zheng *et al.*, 2021). However, FTIR does not detect all the particles (especially the ones that are too small) and is also time-consuming (Song *et al.*, 2021).

5. How to determine the effects of microplastics?

Several studies have been published to evaluate the effects of MPs on different organisms (Jeong *et al.*, 2016; Mak *et al.*, 2019; Sanchez-Zamora *et al.*, 2024). The most common characteristics tested in MP toxicity are the size, shape (spheres/beads, fibers, and fragments), and type of plastic material (substance, polymer; e.g., polyethylene [PE], polystyrene [PS], and polyethylene terephthalate [PET]). Most tests have been performed on aquatic organisms (Table 2) since MPs were first detected in the sea (Carpenter & Smith, 1972) and are abundant in aquatic systems. As the concern about plastic use and pollution increases, studies on terrestrial animals such as earthworms (Kwak *et al.*, 2021) and rats (An *et al.*, 2021) have also been performed.

The effects of microplastics are measured with acute toxicity tests (uptake of a large amount MPs in a short period: 24-96 h) in microscopic aquatic organisms such as rotifers (Sanchez-Zamora *et al.*, 2024) and cladocerans (Bosker *et al.*, 2019; Figure 4 and 5), and chronic toxicity tests (uptake of a small amount of MPs during a long period: 90 days or more; An *et al.*, 2021) in larvae, juvenile and adult organisms like fish (Pannetier *et al.*, 2020) and oysters (Sussarelu *et al.*, 2016). The effects of microplastics can be estimated in: 1) an entire population through population size, feeding behavior, among other characteristics; and 2) across generations, such as reduction of larval and adult size. Besides the age of the organisms to be tested, toxicity experiments must also consider factors such as temperature, light, pH, and salinity of the media (water, sediments, or soil) where organisms are cultured and tested, as well as if they are going to be fed during the test (Cong *et al.*, 2019).

**Table 2.** Examples of particle size, type and exposure time used to determine the effects of MPs.

Species	Type of organism	Microplastic	Amount/Exposure	Effects determined on	Reference
<i>Chlorella (C.) pyrenoidosa</i> <i>Microcystis (M.) flosaquae</i>	Algae	PP and PVC	Up to 11 days, 5-500 mg/L	Biochemical processes	Wu et al., 2019
<i>Daphnia magna</i>	Cladoceran	1-5 µm PS beads	10 ² , 10 ³ , 10 ⁴ and 10 ⁵ particles/L 21 d exposure	Population	Bosker et al., 2019
<i>Moina cf. micrura</i>	Cladoceran	10.59 and 22.57 µm PET beads	940 ± 100 particles/mL, 24 h and up to 72 h exposure	Organs	Portugal et al., 2021
<i>Brachionus calyciflorus</i>	Rotifer	30 µm PS beads	2.5-40 mg/L. 24 h acute test (LC ₅₀)	Mortality	Sánchez-Zamora et al., 2024
<i>Crassostrea gigas</i>	Oyster	2 and 6 µm PS beads	2,062 ± 170 and 118 ± 15 beads/mL. 23 d exposure	Reproduction	Sussarellu et al., 2016
<i>Danio rerio</i>	Fish	10-600 µm PE beads	11, 110 and 1100 particles/L. 72-96 h exposure	Behavior, anatomy	Mak et al., 2019

Table 2 (continued)

Species	Type of organism	Microplastic	Amount/Exposure	Effects determined on	Reference
<i>Eisenia andrei</i>	Earthworm	180-212 µm and 250-300 µm PE beads	21 d, 1000 mg/kg of soil	Development	Kwak <i>et al.</i> , 2021
Wistar rats	Rodent	0.5 µm PS beads	Rats: 0.015, 0.15, 1.5 mg/d, 90 d exposure. Granulosa cells: 0, 1, 5 and 25 µg/mL	Cells	An <i>et al.</i> , 2021



6. Limitations and challenges in microplastic research

Researchers have identified several limitations involving microplastic studies:

- I. Most researchers, if not all, agree that the wide range of techniques used for sampling, separating, and identifying MPs make it difficult to compare the results among studies of these particles, as the amounts of MPs detected might differ when using one method or another (Liu *et al.*, 2021). Thus, it is necessary to standardize, as much as possible, methods for sampling (based on the media to be explored and site characteristics at least), extraction, and identification of MPs that allow researchers to contrast their results with others. A review recently published by Prata *et al.*, (2024), indicates that there is currently an attempt to standardize a way to analyze microplastics in the environment by the International Organization for Standardization (ISO).
- II. In test phases, researchers face the lack of appropriate tools to manipulate MPs and clean environments to prevent sample contamination by airborne microplastics (Prata *et al.*, 2024). In our research group's experience, we have found that manipulating and weighing microplastics to prepare solutions in specific concentrations can be difficult, given the tools we have for these tasks.
- III. Research on microplastic effects is done in laboratories under conditions that are seldom similar to those found in nature. For instance, spheres were the most used (73.68%) shape in 32 MPs ecotoxicological studies reviewed during our research, followed by fragments (21.05%) and fibers (2.63%) but Lu *et al.*, (2021) reported that spherical MPs (granules) were only detected in about one-third of 165 studies on MPs detection in freshwater ecosystems. Additionally, toxicity experiments involved the effects of seven polymers (Polystyrene [PS], Polyethylene [PE], Polyvinyl Chloride [PVC], High-Density Polyethylene [HDPE], Polypropylene [PP], Polyethylene Terephthalate [PET], and Polyamide [PA]) in 32 studies, although, the most commonly found polymers in water are PE, PET, and PP according to Lu *et al.*, (2021). Moreover, experiments with microplastics generally use virgin particles containing only the polymer of interest, while in nature, MPs interact with an array of substances and organisms that can alter their toxic effects (Velzeboer *et al.*, 2014).

7. Why is quantifying and identifying MPs in the environment important?

Determining MP types and quantities in the environment leads us to know where they are present, as well as their dispersion patterns by air and water around the world. For instance, in a study by Kanhai *et al.* (2018), MPs were found in the Arctic Central Basin, a remote region where high-impact human activities such as industrial or agricultural activities do not occur. The researchers hypothesize that the way MPs arrive in this area might be through oceanic currents and riverine input, as well as shipping activities.

Most studies of MP distribution or transport are predictions based on computer simulations. Allen *et al.* (2019), have simulated air transport and distribution patterns of microplastics. Their simulations were based on wind, snow and rain events in the Pyrenees to predict MPs distribution in the region: it was predicted that MPs found in the French Pyrenees came from regions about 60 to 95 km away, from western Andorra, the Spanish Pyrenees and Saint Gaudens valley, where human population of 22,250-24,975 inhabitants are found. Unfortunately, they were not able to predict MPs' transportation paths. Other simulations done by Ward *et al.* (2024), considered microplastic shape and size in order to predict how particles move and deposit on the soil, finding that smaller particles have a wider deposition range in comparison to particles of large size, which tend to fall closer to the emission area. Even though Allen *et al.* (2019) reported MPs air deposition on soil in the French Pyrenees (up to 365 particles/m²/day), MPs deposition is not monitored in most simulation studies, therefore, there is a lack of data to verify the simulations accuracy in predicting MPs transport and distribution paths (Allen *et al.*, 2019; Evangeliou *et al.*, 2020; Zhang *et al.*, 2020).

Knowing where microplastics are found and the way they move in an ecosystem or from one place to another can give researchers a clue to describe the risks and/or consequences of their presence in a specific place. Plenty of studies have been done about plastics and MPs in the oceanic water and sediments about microplastic detection: In the Arctic Central Basin, Kanhai *et al.*, (2018) found 0.7 particles/m³, while in the Bohai Sea in China, 0.33 ± 0.34 MP particles/m³ were reported (Zhang *et al.*, 2017), and in sediments, up to 13,392 particles/kg were quantified in the Tampico Beach in Mexico. Additionally, the “Garbage Patch” in the Pacific ocean is definitely a MPs source: How many MPs are produced in this place? Where do they go? How are they affecting the ocean system? Still, more studies are needed to determine MPs pollution sources and contamination effects in the environment and organisms, as well as to estimate how many MPs are being distributed around the world (Bucci *et al.*, 2020; Talbot & Chang, 2022).



Through monitoring MPs, we can learn about their degradation processes under specific environmental conditions of humidity, dryness, temperature, salinity, and organic matter, among others. Humans are responsible for the presence of plastics and microplastics in the environment, and consequently, of all the effects they may cause in water, air, soil, and living organisms. As more information is generated about microplastics, the government and authorities can propose new laws to regulate plastic disposal and limit microplastic use or production. A clear example is the Microbead-Free Water Act enacted in 2015 in the United States of America to stop the production and distribution of plastic microbeads in cosmetic products by the year 2019 (FDA, 2022). Moreover, on a global scale, international treaties to regulate the production and use of plastics are being discussed nowadays: in 2022, at the United Nations Environment Assembly in Nairobi, Kenya, 175 countries agreed on creating a “treaty based on the life cycle of plastics produced by packaging materials, products and business models” (Thompson, 2022). Aspects related to recycling, pollution, and impacts on health and society were also considered (Thompson, 2022). Other strategies and plans for plastic product industries should be developed and implemented not only to reduce discharges and emissions of microplastics to the environment, but also to avoid their production in the environment and mitigate or remove them from it.

Conclusions

Microplastics have been studied since the 1970s, and 50 years later, scientists can classify, collect, measure, and identify them. However, we still need to set the basis for how MPs are distributed in marine environments, freshwater ecosystems, soil, and air, and among these media, as it is known that microplastics in the air fall to water systems and soils. Organisms can also serve as transporters of MPs. More field research is needed to fully understand how transportation and distribution of MPs occur, as well as to test distribution predictions based on computer simulation. Additionally, researchers are bringing up the need to perform toxicity experiments with environmentally realistic MP concentrations in order to know their potential effects in organisms exposed to MPs in nature, and not only under specific laboratory conditions such as temperature, light, or concentration. The concentrations of MPs used in experiments tend to be higher than the ones found in nature (up to 7 orders of magnitude) since we do not know how much living systems have been altered by microplastic presence. Moreover, the effects in organisms caused by substances combined with MPs to improve their hardness, make them more malleable, or color them have not been determined, not even in polluted sites, or in remote locations.

Although there is a lack of consensus among the scientific community on defining an optimal method for determining MPs in the environment, there are plans to standardize methods by international organizations so the results obtained by different research teams can be compared to those of other teams and have a clearer idea about the state of microplastic pollution, and facilitate the creation of international regulations and possible mitigation plans. More than 400 metric tons of plastics are distributed around the world and it is still not known what kinds or how many of MPs are environmentally relevant to disturb natural systems and organisms.

Acknowledgments

The authors wish to thank the Secretaría de Ciencias, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI) for the PhD scholarship granted to Stephanie Hernández Carreón.

References

- Allen, S., D. Allen, V.R Phoenix, G. Le Roux, P. Durántez Jiménez, A. Simonneau, S. Binet y D. Galop. 2019. *Atmospheric transport and deposition of microplastics in a remote mountain catchment*. Nature Geoscience 12(5): 339–344.
- Amato-Lourenço, L.F., L. Dos Santos Galvão, L.A. De Weger, P.S. Hiemstra, M.G. Vijver y T. Mauad. 2020. *An emerging class of air pollutants: Potential effects of microplastics to respiratory human health?* Science of The Total Environment 749: 141676.
- An, R., X. Wang, L. Yang, J. Zhang, N. Wang, F. Xu, Y. Hou, H. Zhang y L. Zhang. 2021. *Polystyrene microplastics cause granulosa cells apoptosis and fibrosis in ovary through oxidative stress in rats*. Toxicology 449: 152665.
- Anbumani, S., y P. Kakkar. 2018. *Ecotoxicological effects of microplastics on biota: A review*. Environmental Science and Pollution Research 25 (15): 14373–14396.
- Austen, K., J. MacLean, D. Balanzategui y F. Hölker. 2022. *Microplastic inclusion in birch tree roots*. Science of the Total Environment 808: 152085.



- Barboza, L.G., L. Russo, V. Branco, C. Carvalho y L. Guilhermino. 2018. *Microplastics increase mercury bioconcentration in gills and bioaccumulation in the liver and cause oxidative stress and damage in Dicentrarchus labrax juveniles*. Scientific Reports 8: 15655.
- Barrows, A.P.W., S.E. Cathey y C.W. Petersen. 2018. *Marine environment microfiber contamination: Global patterns and the diversity of microparticle origins*. Environmental Pollution 237: 275-284.
- Basseling, E., A. Wegner, W.M. Foekema, M.J. van den Heuvel-Greve y A.A. Koelmans. 2012. *Effects of Microplastic on Fitness and PCB Bioaccumulation by the Lugworm Arenicola marina (L.)*. Environmental Science & Technology 47(1): 593-600.
- Batool, I., A. Qadir, J.M. Levermore y F.J. Kelly. 2022. *Dynamics of airborne microplastics, appraisal and distributional behaviour in atmosphere; a review*. Science of The Total Environment 806: 150745.
- Bian, P., Y. Liu, K. Zhao, Y. Hu, J. Zhang, L. Kang y W. She. 2022. *Spatial variability of microplastic pollution on surface of rivers in a mountain-plain transitional area: A case study in the Chin Ling-Wei River Plain, China*. Ecotoxicology and Environmental Safety 232: 113298.
- Borges-Ramírez, M.M., G. Escalona-Segura, E. Huerta-Lwanga, E. Iñigo-Elias y J.R. Osten. 2021. *Organochlorine pesticides, polycyclic aromatic hydrocarbons, metals and metalloids in microplastics found in regurgitated pellets of black vulture from Campeche, Mexico*. Science of The Total Environment 801: 149674.
- Bosker, T., G. Olthof, M.G. Vijver, J. Baas y S.H. Barmantlo. 2019. *Significant decline of Daphnia magna population biomass due to microplastic exposure*. Environmental Pollution 250: 669-675.
- Bouزيد, N., C. Anquetil, R. Dris, J. Gasperi, B. Tassin y S. Derenne. 2022. *Quantification of Microplastics by Pyrolysis Coupled with Gas Chromatography and Mass Spectrometry in Sediments: Challenges and Implications*. Microplastics 1: 229-239.
- Brennecke, D., B. Duarte, F. Paiva, I. Caçador y J. Cannin-Clode. 2016. *Microplastics as vectors for heavy metal contamination from the marine environment*. Estuarine Coastal and Shelf Science 178: 189-195.
- Bucci, K., M. Tulio y C.M. Rochman. 2020. *What is known and unknown about the effects of plastic pollution: A meta-analysis and systematic review*. Ecological Applications, 30(2): e02044.

- Caron, A.G.M., C.R. Thomas, K.L.E. Berry, C.A. Motti, A. Ariel y J.E. Brodie, 2018. *Ingestion of microplastic debris by green sea turtle (Chelonia mydas) in the Great Barrier Reef: Validation of a sequential extraction protocol*. Marine Pollution Bulletin 127: 743-751.
- Carpenter, E.J. y K.L. Smith. 1972. *Plastics on the Sargasso Sea Surface*. Science 175: 1240-1241.
- Chamas, A., H. Moon, J. Zheng, Y. Qiu, T. Tabassum, J.H. Jang, M. Abu-Omar, S.L. Scott y S. Suh. 2020. *Degradation Rates of Plastics in the Environment*. ACS Sustainable Chemistry & Engineering 8 (9): 3494–3511
- Choong, W.S., T. Hadibarata, A. Yuniarto, K.H.D. Tang, F. Abdulla, M. Syafrudin, D.A. Al Farraj y A.M. Al-Mohaimeed. 2021. *Characterization of microplastics in the water and sediment of Baram River estuary, Borneo Island*. Marine Pollution Bulletin 172: 112880.
- Cole, M., H. Webb, P.K. Lindeque, E.S. Fileman, C. Halsband y T.S. Galloway. 2014. *Isolation of microplastics in biota-rich seawater samples and marine organisms*. Scientific Reports-UK 4: 4528.
- Cong, Y., F. Jin, M. Tian, J. Wang, H. Shi, Y. Wang y J. Mu. 2019. *Ingestion, egestion and post-exposure effects of polystyrene microspheres on marine medaka (Oryzias melastigma)*. Chemosphere 228: 93–100.
- Corradini, F., P. Meza, R. Eguiluz, F. Casado, E. Huerta-Lwaga y V. Geisse. 2019. *Evidence of microplastic accumulation in agricultural soils from sewage sludge disposal*. Science of the Total Environment 671: 411-420.
- Da Silva, V.H., F. Murphy, J.M. Amigo, C.A. Stedmon y J. Strand. 2020. *Classification and quantification of microplastic (< 100 µm) using FPA-FTIR imaging system and machine learning*. Analytical Chemistry 92 (20): 13724-13733.
- Derraik, J. 2002. *The pollution of the marine environment by plastic debris: a review*. Marine Pollution Bulletin 44: 842-852.
- Ding, L., R. Mao, X. Guo, X. Yang, Z. Qian y C. Yang. 2019. *Microplastics in surface waters and sediments of the Wei River, in the northwest of China*. Science of the Total Environment 667: 427-434.
- Dris, R., J. Gasperi, M. Saad, C. Mirande y B. Tassin. 2016. *Synthetic fibers in atmospheric fallout: a source of microplastics in the environment?* Marine Pollution Bulletin 104 (1-2): 290-293



- Eerkes-Medrano, D., R.C. Thompson y D.C. Aldridge. 2015. *Microplastics in freshwater systems: A review of the emerging threats, identification of knowledge gaps and prioritisation of research needs*. Water Research 75: 63–82.
- Erni-Cassola, G., M.I. Gibson, R.C. Thompson y R. Christie-Oleza. 2017. *Lost, but found with Nile red; a novel method to detect and quantify small microplastics (20 μm –1 mm) in environmental samples*. Environmental Science & Technology 51(23): 13641-13648.
- Evangelidou, N., H. Grythe, Z. Klimont, C. Heyes, S. Eckhardt, S. Lopez-Aparicio y A. Stohl. 2020. *Atmospheric transport is a major pathway of microplastics to remote regions*. Nature Communications, 11(1): 3381.
- Evode, N., S.A. Qamar, M. Bilal, D. Barceló y H.M.N. Iqbal. 2021. *Plastic waste and its management strategies for environmental sustainability*. Case Studies in Chemical and Environmental Engineering 4: 100142.
- Fabbri, D., C. Trombini e I. Vassura. 1998. *Analysis of Polystyrene in Polluted Sediments by Pyrolysis-Gas Chromatography-Mass Spectrometry*. Journal of Chromatographic Science. 36(12): 600-604.
- Flores-Ocampo, I.Z. y J.S. Armstrong-Altrin. 2023. *Abundance and composition of microplastics in Tampico beach sediments, Tamaulipas State, southern Gulf of Mexico*. Marine Pollution Bulletin, 191, 114891.
- Food and Drug Administration. 2022. The Microbead-Free Waters Act: FAQs. In: <https://www.fda.gov/cosmetics/cosmetics-laws-regulations/microbead-free-waters-act-faqs> (Accessed: 13/02/2025).
- Fischer, M., y B.M. Scholz-Böttcher. 2017. *Simultaneous Trace Identification and Quantification of Common Types of Microplastics in Environmental Samples by Pyrolysis-Gas Chromatography-Mass Spectrometry*. Environmental Science & Technology 51: 5052-5060.
- Galloway, T.S., M. Cole y C. Lewis. 2017. *Interactions of microplastic debris throughout the marine ecosystem*. Nature Ecology and Evolution 1: 0116.
- Hu, C.J., M.A. Garcia, A. Nihart, R. Liu, L. Yin, N. Adolphi, D.F. Gallego, H. Kang, M.J. Campen y X. Yu. 2024. *Microplastic presence in dog and human testis and its potential association with sperm count and weights of testis and epididymis*. Toxicological Sciences 200 (2): 235-240.

- Hua, T., S. Kiran, Y. Li y Q.X.A. Sang. 2022. *Microplastics exposure affects neural development of human pluripotent stem cell-derived cortical spheroids*. Journal of Hazardous Materials. 435: 128884.
- Huerta Lwanga, E., J. Mendoza Vega, V. Ku Quej, J. Chi, L. Sanchez del Cid, C. Chi, G. Escalona Segura, H. Gerstenm, T. Salánki, M. van der Ploeg, A.A. Koelmans y V. Geissen. 2017. *Field evidence for transfer of plastic debris along a terrestrial food chain*. Scientific Reports 7: 14071.
- Jeong, C.B., E.J. Won, H.M. Kang, M.C. Lee, D.S. Hwang, U.K. Hwang, B. Zhou, S. Souissi, S.J. Lee y J.S. Lee. 2016. *Microplastic Size-Dependent Toxicity, Oxidative Stress Induction, and p-JNK and p-p38 Activation in the Monogonont Rotifer (Brachionus koreanus)*. Environmental Science & Technology 50: 8849-8857.
- Kanhai, L.D.K., K. Gårdfeldt, O. Lyashevskaya, M. Hassellöv, R.C. Thomson e I. O'Connor. 2018. *Microplastics in sub-surface waters of the Arctic Central Basin*. Marine Pollution Bulletin 131: 8-18
- Kwak, J.I., y Y.J. An. 2021. *Microplastic digestion generates fragmented nanoplastics in soils and damages earthworm spermatogenesis and coelomocyte viability*. Journal of Hazardous Materials 402: 124034.
- Lahens, L., E. Strady, T.C. Kieu-Le, R. Dris, K. Boukema, E. Rinnert, J. Gasperi y B. Tassin. 2018. *Macroplastic and microplastic contamination assessment of a tropical river (Saigon River, Vietnam) transversed by a developing megacity*. Environmental Pollution 236: 661-671.
- Lee, H.S., D. Amarakoon, C. Wei, K.Y. Choi, D. Smolensky y S.H. Lee. 2021. *Adverse effect of polystyrene microplastics (PS-MPs) on tube formation and viability of human umbilical vein endothelial cells*. Food and Chemical Toxicology. 154: 112356.
- Leslie, H.A., M.J.M. Van Velzen, S.H. Brandsma, A.D. Vethaak, J.J. Garcia-Vallejo y M.H. Lamoree. 2022. *Discovery and quantification of plastic particle pollution in human blood*. Environment International 163: 107199.
- Li, J., H. Liu y J. Paul Chen. 2018. *Microplastics in freshwater systems: A review on occurrence, environmental effects, and methods for microplastics detection*. Water Research 137: 362–374.
- Lindeque, P.K., M. Cole, R.L. Coppock, C.N. Lewis, R.Z. Miller, A.J.R. Watts, A. Wilson-McNeal, S.L. Wright y T.S. Galloway. 2020. *Are we underestimating microplastic abundance in the marine*



- environment? A comparison of microplastic capture with nets of different mesh-size. Environmental Pollution* 265: 114721.
- Liu, M., S. Lu, Y. Song, L. Lei, J. Hu, W. Lv, W. Zhou, C. Cao, H. Shi, X. Yang y D. He. 2018. *Microplastic and mesoplastic pollution in farmland soils in suburbs of Shanghai, China. Environmental Pollution* 242: 855-862.
- Liu, S., H. Chen, J. Wang, L. Su, X. Wang, J. Zhu y W. Lan. 2021. *The distribution of microplastics in water, sediment, and fish of the Dafeng River, a remote river in China. Ecotoxicology and Environmental Safety* 228: 113009.
- Löder, M.G.J., H.K. Imhof, M. Ladehoff, L.A. Löschel, C. Lorenz, S. Mintenig, S. Piehl, S. Primpke, I. Scherank, C. Lasorsch y G. Gredts. 2017. *Enzymatic Purification of Microplastics in Environmental Samples. Environmental Science & Technology* 51: 14283-14292.
- Lu, H.C., S. Ziajahromi, P.A. Neale y F.D.L. Leusch. 2021. *A systematic review of freshwater microplastics in water and sediments: Recommendations for harmonisation to enhance future study comparisons. Science of The Total Environment* 781: 146693.
- Mak, C.W., K.C.F. Yeung y K.M. Chan. 2019. *Acute toxic effects of polyethylene microplastics on adult zebrafish. Ecotoxicology and Environmental Safety* 182: 109442.
- Marfella, R., F. Prattichizzo, C. Sardu, G. Fulgenzi, L. Graciotti, T. Spadoni, N. D'Onofrio, L. Scisciola, R. La Grotta, C. Frigé et al. 2024. *Microplastics and Nanoplastics in Atheromas and Cardiovascular Events. New England Journal of Medicine* 390 (10): 900–910.
- Matsui, K., T. Ishimura, M. Mattonau, I. Iwai, A. Watanabe, N. Teramae, H. Ohtai y C. Watanabe. 2020. *Identification algorithm for polymer mixtures based on Py-GC/MS and its application for microplastic analysis in environmental samples. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis* 149: 104834
- Mistri, M., A. Augusto, E. Casoni, M. Nicoli, C. Vaccaro y C. Munari. 2022. *Microplastic accumulation in commercial fish from the Adriatic Sea. Marine Pollution Bulletin* 174: 113279.
- Moore, R.C., L. Loseto, M. Noel, A. Etemadifar, J.D. Brewster, S. MacPhee, L. Bendell y P.S. Ross. 2020. *Microplastics in beluga whales (Delphinapterus leucas) from the Eastern Beaufort Sea. Marine Pollution Bulletin* 150: 110723.
- Möller, J.N., M.G.J. Löder y C. Laforsch. 2020. *Finding Microplastics in Soils: A Review of Analytical Methods. Environmental Science & Technology* 54 (4): 2078–2090.

- Naidoo, T., K. Goordiyal y D. Glassom. 2017. *Are Nitric Acid (HNO₃) Digestions Efficient in Isolating Microplastics from Juvenile Fish?* Water, Air Soil and Pollution 228: 470.
- Nalbone, L., A. Panebianco, F. Giarratana y M. Russel. 2021. *Nile Red staining for detecting microplastics in biota: Preliminary evidence.* Marine Pollution Bulletin 172: 112888.
- Napper, I.E., y R.C. Thompson. 2016. *Release of synthetic microplastic plastic fibres from domestic washing machines: Effects of fabric type and washing conditions.* Marine Pollution Bulletin 112 (1-2): 39-45.
- Napper I.E., A. Baroth, A.C. Barrett, S. Bhola, G.W. Chowdhury, B.F.R. Davies, E.M. Duncan, S. Kumar, S.E. Nelms, N.H. Niloy, B. Nishat, T. Maddalene, N. Smith, R.C. Thompson y H. Koldewey. 2023. *The distribution and characterization of microplastics in air, surface water and sediment within a major river system.* Science of the Total Environment. 901: 166640.
- Nelms, S.E., J. Barnett, A. Brownlow, N.J. Davison, R. Deaville, T.S. Galloway, P.K. Lindeque, D. Santillo y B.J. Godley. 2019. *Microplastics in marine mammals stranded around the British coast: ubiquitous but transitory?* Scientific Reports-UK. 9: 1075.
- Nihart, A.J., M.A. Garcia, E. El Hayek, R. Liu, M. Olewine, J.D. Kingston, et al., 2025. *Bioaccumulation of microplastics in decedent human brains.* Nature Medicine.
- O'Brien, S., C. Rauert, F. Ribeiro, E.D. Okoffo, S.D. Burrows, J.W. O'Brien, X. Wang, S.L. Wright y K.V. Thomas. 2023. *There's something in the air: A review of sources, prevalence and behaviour of microplastics in the atmosphere.* Science of The Total Environment 874: 162193.
- Obbard, R. 2018. *Microplastics in Polar Regions: The role of long range transport.* Environmental Science and Health. 1: 24-29.
- Orona-Návar, C., R. García-Morales, F.J. Loge, J. Mahlknecht, I. Aguilar-Hernández y N. Ornelas-Soto. 2022. *Microplastics in Latin America and the Caribbean: A review on current status and perspectives.* Journal of Environmental Management 309: 114698.
- Pannetier, P., B. Morin, F. Le Bihanic, L. Dubreil, C. Clérandeau, F. Chouvellon, K. Van Arkel, M. Danion y J. Cachot. 2020. *Environmental samples of microplastics induce significant toxic effects in fish larvae.* Environment International 134: 105047.
- Parolini, M., B. De Felice, A. Gois, M. Faria, N. Cordeiro y N. Nogueira. 2023. *Polystyrene microplastics exposure modulated the content and the profile of fatty acids in the Cladoceran Daphnia magna.* Science of The Total Environment, 860, 160497.



- Perez-Venegas, D.J., C. Toro-Valdivieso, F. Ayala, B. Brito, L. Iturra, M. Arriagada, M. Seguel, C. Barrios, M. Sepúlveda, D. Olivia, S. Cárdenas-Alayza, M.A. Urbina, A. Jorquera, E. Castro-Nallar y C. Galbán-Malagón. 2020. *Monitoring the occurrence of microplastic ingestion in Otariids along the Peruvian and Chilean coasts*. Marine Pollution Bulletin 153: 110966.
- Portugal, S.G.M., C.A.B. Oses, M.G.R. Thiago y C.W.C. Branco. 2021. *Uptake of Microplastics by a Tropical Freshwater Cladocera Revealed by Polyethylene Terephthalate Fluorescence*. Water, Air, & Soil Pollution 232 (8): 337.
- Prata, J.C., J.P. Da Costa, A.C. Duarte y T. Rocha-Santos. 2019. *Methods for sampling and detection of microplastics in water and sediment: A critical review*. Trends in Analytical Chemistry 110: 150–159.
- Prata, J.C., J. Padrão, M.T. Khan y T.R. Walker. 2024. *Do's and don'ts of microplastic research: A comprehensive guide*. Water Emerging Contaminants & Nanoplastics 3: 8.
- Praveena, S.M., S.N.M. Shaifuddin y S. Akizuki. 2018. *Exploration of microplastics from personal care and cosmetic products and its estimated emissions to marine environment: An evidence from Malaysia*. Marine Pollution Bulletin 136: 135–140.
- Ragusa, A., A. Svelato, C. Santacroce, P. Catalano, V. Notarstefano, O. Carnevali, F. Papa, M. Antonio, F. Baiocco, S. Drahi, E. D'Amore, D. Rinaldo, M. Matta y E. Giorgini. 2021. *Plasticenta: First evidence of microplastics in human placenta*. Environmental International 146: 106274.
- Samandra, S., J.M. Johnston, J.E. Jaeger, B. Symons, S. Xie, M. Currell, A.V. Ellis y B.O. Clarke. 2022. *Microplastic contamination of an unconfined groundwater aquifer in Victoria, Australia*. Science of The Total Environment 802: 149727.
- Sánchez-Zamora, C., S. Nandini y S.S.S. Sarma. 2024. *Synergistic effects of microplastics and cyanotoxins on the demography of the rotifer Brachionus calyciflorus Pallas*. Chemosphere 365: 143355.
- Scheurer, M., y M. Bigalke. 2018. *Microplastics in Swiss Floodplain Soils*. Environmental Science & Technology 52: 3591-3598.
- Shim, W.J., Y.K. Song, S.H. Hong y M. Jang. 2016. *Identification and quantification of microplastics using Nile Red staining*. Marine Pollution Bulletin 113: 469-476.

- Shruti, V.C., M.P. Jonathan, P.F. Rodríguez-Espinosa y F. Rodríguez-González. 2019. *Microplastics in freshwater sediments of the Atoyac River basin, Puebla City, Mexico*. Science of the Total Environment 654: 154-163.
- Silva, P.H.S, y F.D.B. de Suouza. 2021. *Microplastic pollution of Patos Lagoon, south of Brazil*. Environmental Challenges 4: 100076.
- Siracusa, J.S., L. Yin, E. Measel, S. Liang y X. Yu. 2018. *Effects of bisphenol A and its analogs on reproductive health: A mini review*. Reproductive Toxicology 79: 96–123.
- Song, Y.K., S.H. Hong, S. Eo y W.J. Shim. 2021. *A comparison of spectroscopic analysis methods for microplastics: Manual, semi-automated, and automated Fourier transform infrared and Raman techniques*. Marine Pollution Bulletin 173: 113101.
- Statista. 2024. *Producción de plástico a nivel mundial de 2002 a 2022* In: <https://es.statista.com/estadisticas/636183/produccion-mundial-de-plastico> (Accessed 14/08/2024).
- Stevens, M.P. 1999. *Polymer Chemistry. An introduction*. Oxford University Press. Nueva York, EE. UU. 551 pp.
- Stolte, A., S. Forster, G. Gerdt y H. Schubert. 2015. *Microplastic concentrations in beach sediments along the German Baltic coast*. Marine Pollution Bulletin 99 (1-2): 216-229.
- Sun, J., Z. Peng, Z.R. Zhu, W. Fu, X. Dai y B.J. Ni. 2022. *The atmospheric microplastics deposition contributes to microplastic pollution in urban waters*. Water Research 225: 119116.
- Sussarellu, R., M. Suquet, Y. Thomas, C. Lambert, C. Fabioux, M. Pernet, N. Le Goï, V. Quillen, C. Mingat, Y. Epelboin, C. Corporeau, J. Guyomarch, J. Robbins, I. Paul-Point, P. Soudan y A. Huvet. 2016. *Oyster reproduction is affected by exposure to polystyrene microplastics*. PNAS 9: 2430-2435.
- Talbot, R., y H. Chang. 2022. *Microplastics in freshwater: A global review of factors affecting spatial and temporal variations*. Environmental Pollution. 292:118393.
- Thompson, T. 2022. *Plastic pollution: Three problems that a global treaty could solve*. In: <https://www.nature.com/articles/d41586-022-03835-w> (Accessed: 16/10/2024).
- Velzeboer, I., C.J. Kwadijk y A.A. Koelmans. 2014. *Strong sorption of PCBs to Nanoplastics, Microplastics, Carbon Nanotubes and Fullerenes*. Environmental Science & Technology 48: 4869-4876.



- Vermaire, J., C. Pomeroy, S.M. Herczeght, O. Haggart y M. Murphy. 2017. *Microplastic abundance and distribution in the open water and sediment of the Ottawa River, Canada, and its tributaries*. FACETS. 2: 301-314.
- Wan, W., A.W. Ndungu, Z. Li y J. Wang. 2017. *Microplastics pollution in inland freshwaters of China: A case study in urban surface waters of Wuhan, China*. Science of the Total Environment 575: 1369-1374.
- Ward, E., M. Gordon, R. Hanson y L.M. Jantunen. 2024. *Modelling the effect of shape on atmospheric microplastic transport*. Atmospheric Environment. 326: 120458.
- Wu, Y., P. Guo, X. Zhang, S. Xie y J. Deng. 2019. *Effect of microplastics exposure on the photosynthesis system of freshwater algae*. Journal of Hazardous Materials 374: 219–227.
- Xia, F., Q. Yao, J. Zhang y D. Wang. 2021. *Effects of seasonal variation and resuspension on microplastics in river sediments*. Environmental Pollution 286: 117403.
- Xie, Y., Y. Li, Y. Fengo, W. Cheng y Y. Wang. 2022. *Inhalable microplastics prevail in air: Exploring the size detection limit*. Environmental International 162: 107151.
- Xu, Y., F.K.S. Chan, M. Johnson, T. Stanton, J. He, T. Jia, J. Wang, Z. Wang, Y. Yao, J. Yang, D. Liu, Y. Xu y X. Yu. 2021. *Microplastic pollution in Chinese urban rivers: The influence of urban factors*. Resources, Conservation and Recycling 173: 105686.
- Xu, Y., X. Luo, J. Fan, T. Zhang, H. Li y Y. Wei. 2022. *Ecological and human health risk of atmospheric microplastics (MPs): a review*. Environmental Science: Atmospheres 2: 921.
- Yang, H., Y. Yumeng, Y. Yu, H. Yinglin, B. Fu y J. Wang. 2022. *Distribution, sources, migration, influence and analytical methods of microplastics in soil ecosystems*. Ecotoxicology and Environmental Safety 243: 114009.
- Yu, J., J. Tian, R. Xu, Z. Zhang, G. Yang, X. Wang, J. Lai, y R. Chen. 2020. *Effects of microplastics exposure on ingestion, fecundity, development, and dimethylsulfide production in Tigriopus japonicus (Harpacticoida, copepod)*. Environmental Pollution 267: 115429.
- Zantis, L.J., E.L. Carroll, S.E. Nelms y T. Bosker. 2021. *Marine mammals and microplastics: A systematic review and call for standardisation*. Environmental Pollution 269: 116142.
- Zhang, W., S. Zhang, J. Wang, Y. Wang, J. Mu, P. Wang, X. Lin y D. Ma. 2017. *Microplastic pollution in the surface waters of the Bohai Sea, China*. Environmental Pollution 231: 541-548.

- Zhang, G.S., y Y.F. Liu. 2018. *The distribution of microplastics in soil aggregate fractions in southwestern China*. Science of the Total Environment 642: 12-20.
- Zhang, Y., S. Kang, S. Allen, D. Allen, T. Gao y M. Sillanpää. 2020. *Atmospheric microplastics: A review on current status and perspectives*. Earth-Science Reviews, 203: 103118.
- Zhao, S., L. Zhu, T. Wang y D. Li. 2014. *Suspended microplastics in the surface water of the Yangtze Estuary System, China: First observations on occurrence, distribution*. Marine Pollution Bulletin 86: 562-568.
- Zhao, Q., L. Zhu, J. Weng, Z. Jin, Y. Cao, H. Jiang y Z. Zhang. 2023. *Detection and characterization of microplastics in the human testis and semen*. Science of The Total Environment 877: 162713.
- Zheng, Y., J. Li, C. Sun, W. Cao, M. Wang, F. Jiang y P. Ju, P. 2021. *Comparative study of three sampling methods for microplastics analysis in seawater*. Science of the Total Environment 765: 144495.
- Zhou, X., J. Wang, H. Li, H. Zhang y D.L. Hua-Jiang. 2021. *Microplastic pollution of bottled water in China*. Journal of Water Process Engineering 40: 101884.
- Zhu, D., Q. Chen, X. An, X. Yang, P. Christie, X. Ke, L. Wu y Y. Zhu. 2018. *Exposure of soil collembolans to microplastics perturbs their gut microbiota and alters their isotopic composition*. Soil Biology and Biochemistry 116: 302-310.
- Ziajahromi, S., P.A. Neale, L. Rintoul y F.D.L. Leusch. 2017. *Wastewater treatment plants as a pathway for microplastics: Development of a new approach to sample wastewater-based microplastics*. Water Research 112: 93-99.



Semblanza de los autores

- **Stephanie Hernández Carreón:** Obtuvo el título de Licenciada en Biología en el año 2014 y el Título de Maestra en Ciencias Químico-Biológicas en año 2019, ambos por la Universidad Autónoma de Ciudad Juárez. Es estudiante del Doctorado en Ciencias Químico-Biológicas en la misma institución. Su investigación se ha enfocado en plaguicidas y metales pesados en suelos agrícolas del Valle de Juárez y en microplásticos en el Río Bravo.
Correo electrónico: al216616@alumnos.uacj.mx biol.hernandezstephanie@gmail.com
- **Judith Virginia Ríos Arana:** Realizó estudios profesionales en la Universidad Autónoma de Chihuahua y Universidad de Texas en El Paso, graduándose como Químico Bacteriólogo Parasitólogo, Maestra en Ciencias (Química) y Doctor en Filosofía (Ph.D.) en Ciencias del Ambiente e Ingeniería. Desde el 2024 ha impartido 23 materias diferentes en 5 programas de licenciatura y 5 de posgrado como profesor de tiempo completo en la Universidad Autónoma de Cd. Juárez. Sus campos de investigación incluyen limnología, ecotoxicología y química aplicada.
Correo electrónico: jríos@uacj.mx

Cita

Hernández-Carreón S., y J.V. Ríos-Arana. What do we know about microplastics?. Recursos Naturales y Sociedad, 2025. Vol. 11 (3): 56-87.
<https://doi.org/10.18846/renaysoc.2025.11.11.03.0004>

Aceptado: 8 de julio de 2025

Editora asociada: Dra. Crisalejandra Rivera-Pérez

Editora ejecutiva: Dra. Crisalejandra Rivera-Pérez

Diseño gráfico editorial: Ing. Francisca Elizabeth Villegas Carrasco

The role of auxiliary sciences in marine biology:
tools for understanding life in the Ocean

El papel de las ciencias auxiliares en la biología marina: herramientas para entender la vida en el océano

Carlos Francisco Rodríguez-Gómez^{1*}, Vicencio de la Cruz-Francisco¹,
Agustín de Jesús Basáñez-Muñoz¹, Ivette A. Chamorro-Florescano¹, Karla C. Garcés-García¹

Resumen

El océano cubre más del 70% de la Tierra y alberga una diversidad biológica impresionante. Los biólogos marinos estudian estos ecosistemas complejos utilizando ciencias auxiliares para obtener una comprensión más precisa. Entre estas disciplinas se encuentran la física, que explica el movimiento de las aguas y su impacto en la distribución de las especies; la química, que estudia la composición del agua y los procesos biogeoquímicos que influyen en los ecosistemas marinos; las matemáticas, que permiten modelar fenómenos complejos como el crecimiento de poblaciones marinas y la dispersión de contaminantes; y la bioestadística, que ayuda a explorar y analizar datos complejos e interpretar los resultados obtenidos. En el caso de diseños experimentales donde se involucran más de una variable, la estadística multivariada permite estudiar cómo interaccionan entre sí las variables involucradas en un ecosistema marino. El buceo es otra herramienta crucial para observar directamente a las especies en su entorno natural; mientras que los Sistemas de Información Geográfica (SIG) y la percepción remota, proporcionan herramientas para estudiar grandes áreas oceánicas, permitiendo evaluar por ejemplo el impacto del cambio climático y la contaminación a gran escala. En conjunto, estas ciencias auxiliares enriquecen el entendimiento del océano, siendo esenciales no solo para el estudio de la vida marina, sino también para la conservación de los ecosistemas marinos y costeros frente a los desafíos ambientales actuales.

Palabras clave: biodiversidad, conservación, ecosistemas, interacción, métodos.

¹Facultad de Ciencias Biológicas y Agropecuarias, campus Tuxpan, Universidad Veracruzana.

Carretera Tuxpan Tampico Kilómetro 7.5 Universitaria 92870, Tuxpan de Rodríguez Cano, Ver. México

*Autor de correspondencia: carlosrodriguez05@uv.mx



Abstract

The ocean covers more than 70% of the Earth's surface and is home to an astonishing diversity of life. Marine biologists study these complex ecosystems using auxiliary sciences to gain a more accurate understanding. These disciplines include physics, which describes water movement and its impact on species distribution; chemistry, which studies water composition and the biogeochemical processes that shape marine ecosystems; mathematics, which allows modelling complex phenomena such as marine population growth and pollutant dispersion; and biostatistics, which aids in analysing intricate data and interpreting results. In experimental designs involving multiple variables, multivariate statistics help assess how different factors interact within a marine ecosystem. Diving is another crucial tool, allowing direct observation of species in their natural environments, while Geographic Information Systems (GIS) and remote sensing provide large-scale insights into oceanic regions, enabling assessments of climate change impacts and pollution. Together, these auxiliary sciences deepen our understanding of the ocean, playing an essential role not only in studying marine life but also in conserving marine and coastal ecosystems.

Keywords: biodiversity, conservation, ecosystems, interaction, methods.

Introducción

El océano cubre más del 70% de la superficie terrestre donde habitan miles de especies, desde pequeños organismos microscópicos hasta grandes mamíferos marinos (García-Gómez, 2022). La comprensión del funcionamiento de estos ecosistemas es un desafío para los biólogos marinos, quienes recurren a diversas ciencias auxiliares para profundizar en el estudio de los océanos (Castro y Huber, 2016). Este documento tiene como objetivo mostrar cómo las ciencias auxiliares se integran en el trabajo cotidiano de los biólogos marinos para ofrecer una visión más completa de los fenómenos marinos.

¿Un biólogo marino sólo sabe de la biología del mar?

Con certeza, amable lector, le podemos decir que no. Una persona dedicada al estudio de la biología marina no solo conoce de los organismos vivos en el mar. Es común escuchar a algunas personas decir que eligieron estudiar biología marina para evitar los números y las matemáticas, pero la realidad es que la biología marina requiere de la comprensión de diversos métodos, incluidos los cuantitativos. Aunque la especialización de quienes estudian la biología marina está en los

ecosistemas marinos, esta ciencia requiere un conocimiento multidisciplinario para explicar la complejidad del océano. Los biólogos marinos deben integrar herramientas y conceptos de diversas ciencias, como la física, las matemáticas, la química y la bioestadística, entre otras, para comprender cómo interactúan los factores biológicos, físicos y químicos en los ecosistemas marinos (Figura 1). Por ejemplo, el uso de tecnologías como los Sistemas de Información Geográfica (SIG), utilizando técnicas de percepción remota y el buceo, junto con métodos hidrobiológicos (técnicas para coleccionar, identificar y analizar comunidades biológicas), nos permiten estudiar en detalle tanto la flora y la fauna, así como condiciones ambientales del mar.



Figura 1. Ciencias auxiliares de la Biología Marina.

Algunas ciencias auxiliares para estudiar a los organismos del mar

La metodología científica es el primer paso para cualquier investigación. En la biología marina, esta metodología organiza el proceso de recolección de datos y garantiza que los resultados obtenidos sean replicables. Para estudiar un ecosistema, los biólogos marinos deben establecer claramente qué preguntas desean responder, cómo recolectarán los datos, qué variables medirán y cómo controlarán las posibles variables que puedan influir en sus resultados (Hernández-Sampieri *et al.*, 2015). Si un biólogo marino planea, por ejemplo, analizar el impacto ambiental de la contaminación en los arrecifes de coral, debe diseñar un experimento que permita medir variables como la temperatura, salinidad y la concentración de contaminantes en diferentes puntos del arrecife. Sin una metodología adecuada, los resultados podrían estar sesgados, lo que afectaría la calidad de las conclusiones (Zvereva y Kozlov, 2021). Debido a esto, el biólogo marino aplica el método científico a partir de la observación de las especies marinas y de los fenómenos naturales, así como en la identificación de problemáticas ambientales, se apoya de la revisión bibliográfica que ayuda a valorar la pertinencia del estudio de acuerdo con los antecedentes del tema de interés (Hernández-



Sampieri *et al.*, 2015). Esto conduce al planteamiento de preguntas e hipótesis, al diseño y la planificación del proyecto de investigación para la obtención y análisis de datos con el apoyo de otras ciencias auxiliares, a fin de obtener conclusiones sólidas (Figura 2).



Figura 2. Biólogos marinos aplicando la metodología científica.

Por otra parte, la física es una ciencia muy útil para estudiar cómo se mueven las aguas del mar, un fenómeno que influye directamente en el comportamiento de las especies marinas. El estudio de las corrientes oceánicas, la energía de las olas y las mareas implica el conocimiento de las leyes físicas que rigen estos procesos, para poder predecir cómo influyen en la biodiversidad de un área (García-Gómez, 2022; Knauss y Garfield, 2017). Por ejemplo, las corrientes marinas son vitales para entender cómo los nutrientes se distribuyen a través de grandes áreas oceánicas, lo que afecta la distribución de las especies y la productividad primaria, que es la tasa a la que los organismos fotosintéticos generan materia orgánica, sosteniendo las redes alimenticias marinas (Castro y Huber, 2016).

La química es otra ciencia importante en la biología marina, ya que permite entender mejor los ciclos biogeoquímicos, procesos mediante los cuales elementos como el carbono, nitrógeno, fósforo y

silicio circulan y se transforman entre los seres vivos y el ambiente, tanto en la columna de agua como en los sedimentos del fondo de los océanos (Emerson y Hamme, 2022). También estudia afectaciones en los seres vivos, como el impacto de plásticos, metales pesados, toxinas y la acidificación oceánica (Garrison y Ellis, 2016; Kennish, 2001). Por ello, el biólogo marino, además de coleccionar y manejar muestras de agua, sedimentos y organismos, se involucra en el trabajo de laboratorio usando instrumentos especializados del área química, siguiendo metodologías estandarizadas que llevan a resultados confiables.

Desde el análisis de datos ecológicos hasta la modelación matemática de poblaciones o el estudio de la física marina, los números permiten entender y gestionar los ecosistemas marinos. Las matemáticas, en especial los modelos matemáticos, permiten simular fenómenos complejos como la dinámica de poblaciones de especies, la dispersión de contaminantes o la evolución de un ecosistema ante diferentes condiciones (García-Gómez, 2022; Zar, 2010). En la biología marina, los biólogos utilizan ecuaciones matemáticas para comprender y proyectar fenómenos como el crecimiento de poblaciones marinas, la distribución de especies y la interacción entre los componentes de un ecosistema. Sin estos modelos, sería muy difícil comprender la magnitud de los cambios en los ambientes marinos, especialmente en un contexto de cambio climático.

Cuando los biólogos marinos reúnen una gran cantidad de datos sobre los océanos (pueden ser miles de datos), es necesario analizarlos adecuadamente para responder a las preguntas previamente planteadas. La bioestadística desempeña una función clave en este proceso, ya que permite analizar la información cuando los resultados observados son de calidad (Daniel, 2016; Zar, 2010). Las técnicas estadísticas que manejan los biólogos marinos son la estadística descriptiva (enfocada en el comportamiento de los datos obtenidos en el estudio) y la estadística inferencial (inferencias basadas en cálculos probabilísticos de los datos), las cuales son esenciales para analizar la información cualitativa y cuantitativa de variables poblacionales y de comunidades biológicas, así como de factores ambientales (Zar, 2010). Estas técnicas son fundamentales para la interpretación de procesos complejos, para validar hipótesis y para la toma de decisiones que permiten el manejo de los ecosistemas y recursos marinos y costeros. Por ejemplo, al estudiar una especie, los biólogos marinos pueden aplicar técnicas estadísticas para saber si las diferencias en la cantidad de individuos son el resultado de cambios naturales o si hay factores humanos que influyen. Sin un análisis estadístico adecuado, se corre el riesgo de sacar conclusiones incorrectas (Figura 3).



Figura 3. Los biólogos marinos analizan información estadística de los ecosistemas y la que obtienen en laboratorio.

En este sentido, los diseños experimentales ayudan a poner en práctica experimentos que permitan observar y analizar los efectos de las variables de un ecosistema marino. Un buen diseño experimental favorece la obtención de datos válidos y controla cualquier factor que pueda afectar los resultados (Montgomery, 2004). En biología marina, se puede diseñar un experimento para estudiar cómo el aumento de la temperatura influye sobre los corales, permitiendo que los demás factores se mantengan constantes, como la salinidad y la disponibilidad de luz. Un diseño experimental bien implementado es fundamental para garantizar que los resultados sean confiables y útiles, mismos resultados que serán analizados a través de la estadística descriptiva e inferencial (Figura 3).

Debido a que los ecosistemas marinos son complejos, la estadística multivariada es una herramienta que permite analizar la relación entre varias variables cualitativas y cuantitativas al

mismo tiempo (Palacio *et al.*, 2020). Por ejemplo, un biólogo marino puede usar estadística multivariada para analizar cómo la temperatura, la salinidad y los nutrientes afectan la biodiversidad en una región, aplicando técnicas como el análisis de componentes principales (ACP) y los análisis de correspondencia (CA) (Legendre y Legendre, 2012). La estructura de las comunidades, que se entiende como la forma en que se organizan y distribuyen las especies de la columna de agua (plancton), del fondo marino (bentos) y nadadoras (necton), así como sus individuos en un ecosistema, puede ser estudiada empleando un análisis de clasificación (Clúster) para identificar grupos similares en composición y abundancia de especies (Clarke y Warwick, 2001). También se puede usar el Escalamiento Multidimensional No Métrico (NMDS) para visualizar relaciones entre muestras en gráficos 2D o 3D. Otros análisis, como ANOSIM, comparan grupos para determinar diferencias entre los mismos, mientras que SIMPER identifica las especies que más contribuyen a esas diferencias (Clarke y Warwick, 2001; Legendre y Legendre, 2012). Estos métodos ayudan a comprender las interacciones en ecosistemas marinos y su respuesta a factores externos como el cambio climático o la contaminación (Figura 3).

Los métodos hidrobiológicos son un conjunto de técnicas, procedimientos y herramientas que utiliza el biólogo marino para la realización de muestreos de campo (observación y colecta), para el manejo y análisis de muestras de agua, de sedimento y de muestras biológicas (Contreras Espinoza, 1994; Costello *et al.*, 2016). Por ello, los métodos hidrobiológicos son esenciales para el estudio de la calidad del agua (parámetros fisicoquímicos, nutrientes y contaminantes) y para el monitoreo de los ecosistemas marinos. Por ejemplo, en el estudio del plancton, el biólogo marino aplica técnicas para la colecta, fijación y conservación de las muestras, esto involucra el uso de diferentes herramientas, desde material de cristalería, reactivos, instrumentos de medición y aparatos electrónicos (Karlson *et al.*, 2010). En estudios del necton y bentos, las técnicas de muestreo pueden ser extractivas para la colecta de organismos, por ejemplo, para coleccionar peces, moluscos y crustáceos se emplean artes de pesca, mientras para la obtención de muestras del fondo marino se utilizan dragas (Granados Barba *et al.*, 2002). También, el biólogo marino emplea métodos no destructivos como el censo visual para el estudio de las especies de corales, equinodermos (como erizos y estrellas de mar) y peces, utilizando como unidades de muestreo los transectos y cuadrantes, técnicas que se complementan con fotografías y filmaciones para la identificación de especies marinas, y para la estimación de propiedades poblacionales y de atributos comunitarios (abundancia, densidad, cobertura, entre otros). El uso de técnicas hidrobiológicas permite a los biólogos marinos obtener datos clave para entender cómo las condiciones del agua afectan la biodiversidad y la salud de los organismos marinos (Figura 4).



Figura 4. Métodos de muestreo que realizan los biólogos marinos en diferentes ecosistemas y en laboratorio.

En este sentido, el buceo es una técnica que permite al biólogo marino sumergirse en aguas poco profundas (máximo 40 m) de los litorales para registrar y/o recolectar muestras de organismos, evaluar el estado de los hábitats y estudiar los comportamientos de las especies (Larn y Whistler, 1997). Además, el buceo permite estudiar aspectos de los ecosistemas que no pueden ser observados desde la superficie, lo que aporta una perspectiva única sobre la vida marina. Asimismo, gracias al buceo, los biólogos marinos continúan documentando los mares a través de fotografías y videos, que son de gran utilidad para la divulgación científica con el fin de promover en la sociedad la importancia y conservación de ambientes como los arrecifes coralinos, los pastos marinos, los manglares y los bosques de kelp (Figura 5).



Figura 5. El buceo como una técnica indispensable para el biólogo marino.

Los Sistemas de Información Geográfica (SIG) y la percepción remota son herramientas tecnológicas que permiten a los biólogos marinos estudiar vastas áreas del océano sin necesidad de desplazarse físicamente (Aguirre Gómez, 2002; Buzai *et al.*, 2016). Los SIG integran datos oceanográficos, registros de biodiversidad y modelos predictivos, mejorando la gestión de recursos marinos (MacLeod, 2013). La percepción remota permite responder a eventos como derrames de petróleo y analizar tendencias a largo plazo, facilitando estrategias de conservación más eficientes. A través de imágenes satelitales y drones, los biólogos marinos pueden mapear ecosistemas marinos, estudiar el impacto del cambio climático y monitorear la salud de los hábitats (McCauley *et al.*, 2025). Estas tecnologías también permiten realizar estudios a gran escala, como el seguimiento de la migración de especies o la evaluación de los efectos de la contaminación en grandes áreas marinas (Figura 6).

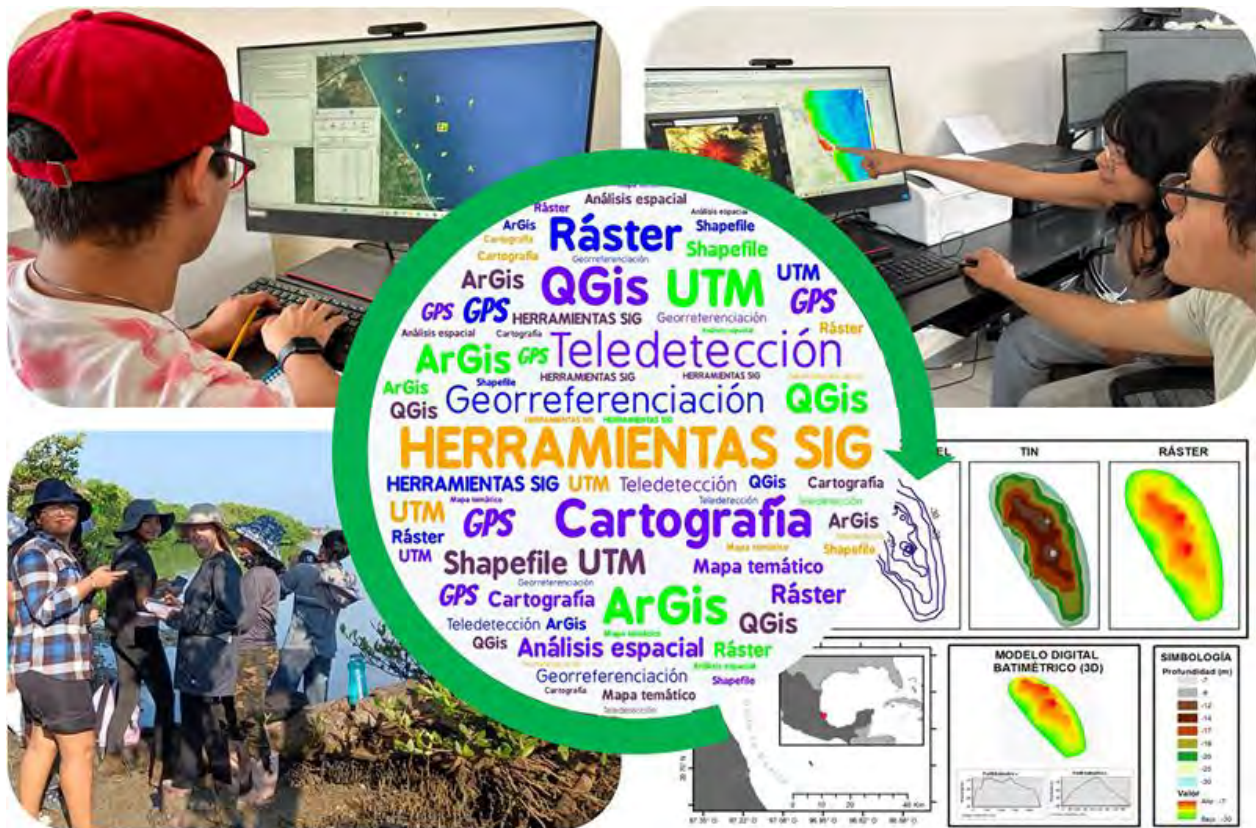


Figura 6. El trabajo de gabinete usando los SIG y la percepción remota son muy importantes en el trabajo de los biólogos marinos.

Consideraciones finales

La biología marina es una disciplina compleja que depende de diversas ciencias auxiliares para obtener una comprensión más profunda de los ecosistemas marinos. La integración de la física y la química, las matemáticas, la bioestadística, el buceo y otras disciplinas permite a los biólogos marinos abordar preguntas fundamentales sobre la vida en el mar de manera más efectiva. El uso de estas herramientas no solo enriquece nuestro entendimiento del océano, sino que también es crucial para la conservación de los ecosistemas marinos en un mundo que enfrenta desafíos ambientales sin precedentes. Sin embargo, hay tecnologías emergentes, como el ADN ambiental (eDNA) o el uso de inteligencia artificial para el análisis de datos que hacen de la biología, en general, una ciencia en una dinámica constante. Estos nuevos enfoques nos permitirán profundizar en cómo las ciencias auxiliares ayudan a mitigar problemas como la sobrepesca o la acidificación oceánica, entre otros.

Agradecimientos

Se agradece el apoyo de los estudiantes del Programa Educativo (PE) Biología marina de la Facultad de Ciencias Biológicas y Agropecuarias, región Poza Rica-Tuxpan, Universidad Veracruzana, durante las prácticas de campo y laboratorio que ayudaron a ilustrar este documento. Esta es una contribución de los integrantes de la Academia de Ciencias Auxiliares del PE Biología marina con participación de miembros del Cuerpo Académico 035 - Preservación y conservación de ecosistemas tropicales.

Literatura citada

- Aguirre Gómez, R. 2002. *Los mares mexicanos a través de la percepción remota*. 1a. edición. Editorial Plaza y Valdés, México. 95 pp.
- Buzai, G.D., C.A. Baxendale, L. Humacata y N. Principi. 2016. *Sistemas de Información Geográfica*. Lugar Editorial, Argentina. 149 pp.
- Castro, P. y M.E. Huber. 2016. *Marine Biology*. McGrawHill, USA. 462 pp.
- Clarke, K.R. y R.M. Warwick. 2001. *Change in Marine Communities: An Approach to Statistical Analysis and Interpretation*. 2a. edición. PRIMER-E Ltd, UK. 174 pp.
- Contreras Espinoza, F. 1994. *Manual de técnicas hidrobiológicas*. Editorial Trillas. 141 pp.
- Costello, M.J., Z. Basher, L. McLeod, I. Asaad, S. Claus, L. Vanderpitte, Y. Moriaki, H. Gislason, M. Edwards, W. Appeltans, H. Enevoldsen, G.I. Edgar, P. Miloslavich, S.D. Monte, I.S. Pinto, D. Obura y A.E. Bates. 2016. *Methods for the study of marine biodiversity*. pp. 129–163. En: Walters, M. y R.J. Scholes (Eds.). *The GEO Handbook on Biodiversity Observation Networks*. Springer. Berlín, Alemania. 308 pp.
- Daniel, W.W. 2016. *Bioestadística. Base para el análisis de las ciencias de la salud*. 4a. edición. Editorial Limusa Wiley. 924 pp.
- Emerson, S.R. y R.C. Hamme. 2022. *Chemical oceanography. Element fluxes in the sea*. 1a. edición. Cambridge University Press. 387 pp.
- García-Gómez, J.C. 2022. *Biología marina. Medio físico, biodiversidad, recursos y conservación*. 1a. edición. Editorial Universidad de Sevilla, España. 552 pp.
- Garrison, T. y R. Ellis. 2016. *Oceanography: An invitation to Marine Science*. 9a. edición. Cengage Learning, USA. 604 pp.



- Granados Barba, A., V. Solís Weiss y R. Bernal Ramírez. 2002. *Métodos de muestreo en la investigación oceanográfica*. 1a. reimpresión. Posgrado en Ciencias del Mar y Limnología, UNAM. 448 pp.
- Hernández Sampieri, R., C. Fernández Collado y M.P. Baptista Lucio. 2015. *Metodología de la investigación*. 6a. edición. McGrawHill, México. 600 pp.
- Karlson, B., C. Cusack y E. Bresnan. 2010. *Microscopic and molecular methods for quantitative phytoplankton analysis*. IOC-UNESCO, Francia. 110 pp.
- Kennish, M.J. 2001. *Practical Handbook of Marine Science*. 3a. edición. CRC Press LLC. 876 pp.
- Knauss, J.A. y N. Garfield. 2017. *Introduction to physical oceanography*. 3a. edición. Waveland Press Inc., USA. 310 pp.
- Larn, R. y R. Whistler. 1997. *Manual de buceo deportivo y profesional*. Ediciones Omega, Barcelona. 479 pp.
- Legendre, P. y L. Legendre. 2012. *Numerical ecology*. 3a. edición. Elsevier. 990 pp.
- MacLeod, C.D. 2013. *An introduction to using GIS in marine biology*. 2a. edición. Pictish Beast Publications, Escocia. 426 pp.
- McCauley, D., S. Andrzejaczek, B.A. Block, K.C. Cavanaugh, H.C. Cubaynes, E.L. Hazen, C. Hu, D. Kroodsma, J. Li y S.H. Young. 2025. *Improving ocean management using insights from space*. Annual Review of Marine Science 17: 381-408.
- Montgomery, D.C. 2004. *Diseño y análisis de experimentos*. Editorial Limusa Wiley. 686 pp.
- Palacio, F.X., M.J. Apodaca y J.V. Crisci. 2020. *Análisis multivariado para datos biológicos: teoría y su aplicación utilizando el lenguaje R*. 1a. edición. Vázquez Mazzini Editores, Argentina. 265 pp.
- Zar, J.H. 2010. *Biostatistical analysis*. 5a. edición. Prentice Hall. 944 pp.
- Zvereva, E.L. y M.V. Kozlov. 2021. *Biases in ecological research: attitudes of scientists and ways of control*. Scientific Reports 11: 26.

Cita

Rodríguez-Gómez, C.F., F. Vicencio de la Cruz-Francisco, A. de J. Basañez-Muñoz, I.A. Chamorro-Florescano y K.C. Garcés-García. El papel de las ciencias auxiliares en la biología marina: herramientas para entender la vida en el océano. Recursos Naturales y Sociedad, 2025. Vol. 11 (3): 89-101. <https://doi.org/10.18846/renaysoc.2025.11.11.03.0005>

Sometido: 2 de junio de 2025

Aceptado: 1 de septiembre de 2025

Editor asociado: Dr. Raúl O. Martínez Cruz

Editores ejecutivos: Dra. Crisalejandra Rivera-Pérez

Diseño gráfico editorial: Ing. Francisca Elizabeth Villegas Carrasco

Advances in sex determination, sex reversal,
and sex control in the Pacific white shrimp *Litopenaeus vannamei*

Avances en la determinación sexual, reversión sexual, y control sexual en el camarón blanco del Pacífico *Litopenaeus vannamei*

Rafael Campos-Ramos^{1*} y Danitzia A. Guerrero-Tortolero¹

Resumen

Los camarones penaeidos tienen un sistema de determinación sexual WZ/ZZ en donde la hembra es el sexo heterogamético y existen genes ligados al sexo. La fisiología sexual en los machos está bajo el control de la glándula androgénica, localizada en los vasos distales y el ámpula terminal. Sin embargo, a la fecha no se conoce el proceso molecular durante la diferenciación sexual en todos los penaeidos de importancia comercial. Por lo tanto, el cultivo monosexual de hembras aún no es posible de aplicar, y aún se requiere de mucha investigación para lograrlo. Lo anterior incluye ARN de interferencia, hibridación interespecífica, inducción a la triploidía y tetraploidía, bioensayos con hormonas esteroideas, y la generación de “super” hembras con un genotipo WW, que al ser cruzados con machos normales ZZ, se produzca 100% de hembras WZ.

Palabras clave: Glándula androgénica, péptido similar a la insulina, esteroides.

¹Laboratorio de Endocrinología, Programa de acuicultura. Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste, S.C. Instituto Politécnico Nacional 195, Playa Palo Santa Rita Sur, La Paz, Baja California Sur, 23096, México.

*Autor de correspondencia: rcampos@cibnor.mx



Abstract

Penaeid shrimp have a WZ/ZZ sex determination system in which the female is the heterogametic sex, and sex-linked genes are present. Male sexual physiology is under the control of the androgen gland located in the distal vessels and the terminal ampulla. However, to date, the molecular process during sexual differentiation is not fully understood in all commercially important penaeids. Therefore, monosexual female culture is not yet feasible, and substantial research is still required to achieve this. This includes RNA interference, interspecific hybridization, triploidy and tetraploidy induction, steroid hormone bioassays, and the generation of "super" females with a WW genotype, which, when crossed with normal ZZ males, produce 100% WZ females.

Keywords: Androgen gland, insulin-like peptide, steroids.

Definiciones

Andrectomía: se refiere a la extirpación del bulbo eyaculador (conducto espermático) en langostinos de agua dulce o del ámpula terminal y vasos distales en penaeidos. La glándula androgénica (GA) está adherida a manera de un cordón a lo largo de estas estructuras, y por ende, se elimina la glándula en el procedimiento. La extirpación se realiza con pinzas finas en la coxa del quinto pereiópodo en donde se encuentran los gonoporos del macho, o mediante una microcirugía. La morfología de estas estructuras se puede revisar en Campos-Ramos *et al.* (2006), Garza-Torres *et al.* (2009) y Vázquez-Islas *et al.* (2014).

Neohembras: camarones con fenotipo de hembras, pero genéticamente son machos.

Neomachos: camarones con fenotipo de machos, pero genéticamente son hembras.

Intersexual: organismo que contiene bilateralmente un ovario y un testículo, y externamente puede presentar estructuras masculinas o femeninas.

1. Introducción

Esta revisión abarca los avances pioneros y recientes en el conocimiento de la determinación sexual, la reversión sexual, y el control del sexo en langostinos y camarones, dando un énfasis en el camarón del Pacífico *Litopenaeus vannamei* (Boone) con el objetivo de lograr en el futuro un cultivo monosexual de esta especie en la acuicultura. El control del sexo es un factor importante y rentable en la acuicultura debido al dimorfismo sexual natural que existe en el crecimiento entre hembras y machos. Nos hemos esforzado para dirigir al lector hacia numerosos artículos que contienen información relevante, y lo que aún se requiere realizar en futuras investigaciones desde nuestra perspectiva.

La pesca y la acuicultura de diferentes crustáceos como las langostas, camarones, langostinos, cangrejos y cangrejos de río constituyen una enorme industria económica mundial para el consumo humano. La acuicultura moderna de langostinos y camarones está en constante desarrollo para mejorar la producción. El control del sexo en los penaeidos y su crecimiento han sido dos de los principales desafíos en la industria camaronícola, y un proceso intelectualmente desconcertante a largo plazo para los biólogos (Campos-Ramos y Guerrero-Tortolero, 2019) ya que, en la actualidad, después de tres décadas de investigación, todavía no es factible realizar un cultivo monosexual de hembras de *Litopenaeus vannamei*.

El tamaño (la talla) del langostino y del camarón determina el precio de venta en el mercado, por lo que el cultivo monosexual de machos o el monosexual de hembras, respectivamente, genera mejores ganancias en la cosecha y un producto de mejor calidad en el mercado.

1.1 Dimorfismo sexual

En los decápodos y, por lo tanto, en los camarones y langostinos criados comercialmente, un sexo crece más que el otro, debido a un dimorfismo sexual genético (Charniaux-Cotton, 1960). Los machos crecen más que las hembras en especies de agua dulce como el langostino de río gigante de Malasia, *Macrobrachium rosenbergii* (de Man) (Wickins y Beard, 1974; Sagi *et al.*, 1986), el cangrejo de río de pinza roja, *Cherax quadricarinatus* (von Martens) (Curtis y Jones, 1995), así como los yabbies australianos como *Cherax destructor* (Clark), *Cherax albidus* (Clark) y *Cherax rotundus* (Clark) (Austin y Meewan, 1999; Lawrence, 2004).



En los penaeidos ocurre lo contrario: las hembras crecen más que los machos (Campos-Ramos et al., 2006), en especies como el camarón blanco del Pacífico, *Litopenaeus vannamei* (Campos-Ramos et al., 2006; Chow y Sandifer, 1991), el camarón café *Penaeus californiensis* (Holmes), una de las especies más importantes para la pesca del Pacífico nororiental (Campos-Ramos et al., 1994), y el camarón azul del Pacífico *Litopenaeus stylirostris* (Stimpson) (Alfaro, 1994). Así como en camarones asiáticos como el camarón Kuruma, *Marsupenaeus japonicus* (Bate) (Nakamura et al., 1992), el camarón tigre gigante, *Penaeus monodon* (Fabricius) (Hansford y Hewitt, 1994) el camarón de India, *Penaeus indicus* (H. Milne-Edwards) (Mohan y Siddeek, 1995), y el camarón chino, *Fenneropenaeus chinensis* (Osbeck) (Li y Xiang, 1997).

Si bien los sistemas intensivos producen altos rendimientos por metro cuadrado de cultivo, los camarones juveniles permanecen sin una diferencia significativa en la talla entre machos y hembras. Es decir, tanto en *P. monodon*, así como en *L. vannamei*, el dimorfismo sexual en cuanto al peso corporal comienza alrededor de los 9-10 g y se vuelve significativo alrededor de los 17 g (Hansford y Hewitt, 1994; Chow y Sandifer, 1991; Pérez-Rostro e Ibarra, 2003).

1.2 Marcadores moleculares ligados al sexo

En tratamientos experimentales de reversión sexual en organismos acuáticos, es de suma importancia el contar con un marcador molecular ligado al sexo que de la certeza de que el organismo revertido que se visualiza fenotípicamente, sea realmente un organismo con un genotipo del sexo opuesto. Sin embargo, si no se cuenta con un marcador ligado al sexo, alternativamente se debe de realizar una prueba de progenie, mediante la cruce de un organismo adulto revertido con un organismo normal, y esperando la proporción sexual Mendeliana en la progenie.

Evidentemente, la realización de una prueba de progenie conlleva el criar a los organismos hasta el estado adulto, para entonces reproducirlos. Lo anterior, en el caso de los camarones penaeidos, puede tomar alrededor de un año y medio para tener resultados confiables. En cambio, un marcador molecular conlleva un análisis a muy corto plazo que se puede realizar en etapas muy tempranas del desarrollo.

En *M. rosenbergii*, se cuenta con un marcador ligado al sexo específico de la hembra que permite una identificación temprana del sexo, y la confirmación genética de neohembras (Ventura et al., 2011).

El mapeo genómico en penaeidos muestra marcadores ligados al sexo en el genoma materno en *M. japonicus* (Li *et al.*, 2003), *L. vannamei* (Zhang *et al.*, 2006; Yu *et al.*, 2017; Garcia *et al.*, 2024) y *P. monodon* (Staelens *et al.*, 2008). En *L. vannamei*, mediante el análisis de ligamiento y asociación se encontró que existe una región de determinación sexual en el cromosoma número 18 (LG18), y dentro de ésta, un locus (marcador 19299) completamente ligado al sexo (Yu *et al.*, 2017). Posteriormente, utilizando el mismo marcador, otro grupo de investigación obtuvo marcadores SNP (polimorfismos de nucleótidos simples) específicos ligados al sexo. Uno de estos marcadores se ha utilizado para identificar el sexo en a partir de protozoa I, en donde después de la amplificación con oligos específicos, el producto de PCR se secuencía, y si se determina una heterocigocidad en la posición 120 bp (G/C) que se identifica como una hembra, mientras que si es homocigoto (C/C) se identifica como un macho (Wang *et al.*, 2020).

Adicionalmente, un grupo de investigación en el CIBNOR encontró un marcador en un locus posiblemente ligado a la diferenciación sexual, el cual no está localizado en los grupos de ligamiento genético reportados a la fecha, asociados al sexo. Se trata de un marcador que diferencia hembras de machos, siendo un método confiable y rápido de realizarse, mediante la fusión de alta resolución (HRM) post-PCR. Básicamente, se identifican tres SNPs en el locus que permiten diferenciar homocigotos de un sexo (macho), de heterocigotos del otro sexo (hembra), mediante la visualización de dos picos diferentes en las curvas de fusión (Pérez-Enríquez *et al.*, 2020).

Ambas aportaciones científicas acelerarán el contar con bioensayos de reversión sexual con resultados confiables de los genotipos sexuales.

1.3 La relevancia de la glándula androgénica en decápodos

Los camarones y langostinos son decápodos, y los machos tienen una glándula unida al conducto deferente distal, llamada glándula androgénica (GA), la cual secreta una hormona de tipo insulina involucrada en la diferenciación sexual masculina, la espermatogénesis y el desarrollo y mantenimiento de los caracteres sexuales del macho (Charniaux-Cotton, 1962; 1954; 1953; Sagi *et al.*, 1997; Campos-Ramos *et al.*, 2006; Garza-Torres *et al.*, 2009). Sin embargo, en el momento en que aparece la GA en el conducto deferente distal y el ámpula terminal del macho al inicio de la espermatogénesis, aproximadamente a los 30 días como postlarva, los machos ya han diferenciado por organogénesis los lóbulos testiculares y conductos deferentes internos, así como las hembras ya han diferenciado los lóbulos ováricos y el oviducto, a partir de postlava 1-12 (Garza Torres *et al.*, 2009) (Fig. 1).

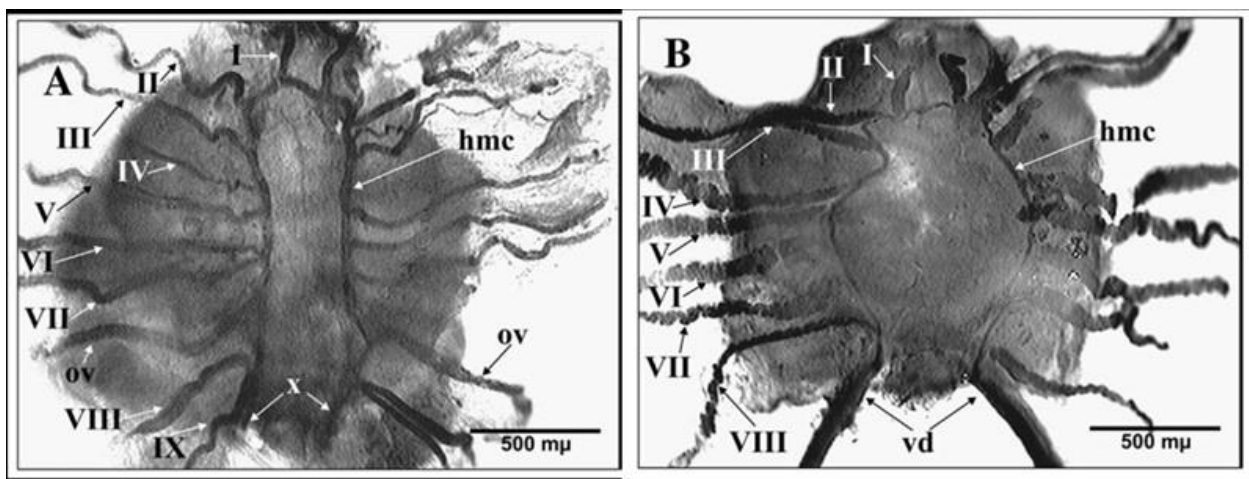


Figura 1. Vista ventral del órgano genital en postlarva de *Litopenaeus vannamei* en la hembra (A) y en el macho (B), ubicado en la región cefalotorácica. Tubo colector principal (HMC) en forma de herradura en macho, lóbulos gonádicos (números romanos), oviducto (OV) en la hembra y conducto deferente (VD) en el macho. Tomado de Garza-Torres et al. (2009).

Con lo anterior, se sugiere que la GA en los penaeidos no está involucrada en la determinación genética sexual del órgano genital, pero sí en su fisiología de mantener las características masculinas externas (Garza-Torres et al., 2009). La localización y morfología de esta glándula en *L. vannamei* se pueden consultar en las siguientes publicaciones (Vázquez-Islas et al., 2015; 2014; Garza-Torres et al., 2009; Campos-Ramos et al., 2006; Alfaro, 1994). Básicamente, la glándula androgénica es un tejido delgado con morfología de un cordón celular, que se extiende desde el ámpula terminal (que contiene el espermátforo) hasta los vasos deferentes distales del órgano reproductor (testículos), adquiriendo una forma de un gancho (Vázquez-Islas et al., 2014).

A nivel molecular, la GA codifica un polipéptido similar a la insulina (Insulin-like androgenic gland or IAG). La secuencia de este polipéptido tiene la misma organización estructural en todas las especies de penaeidos estudiadas. La GA en *L. vannamei* (Lv-IAG) consiste de un marco de lectura abierto de 507 pb que codifica 169 residuos de aminoácidos que comprenden una metionina en la posición 01, un péptido señal (Asn02-Gly34), una cadena B (segmento Tyr35-Arg71), un péptido C (segmento Ser72-Arg138) y una cadena A (segmento Ser139-Phe169). La secuencia de nucleótidos de Lv-IAG tiene un 87% de similitud con *F. chinensis* (Fc-IAG), un 84% con *P. monodon* (Pm-IAG), y un 82% con *M. japonicus* (Maj-IAG). La secuencia de aminoácidos de Lv-IAG muestra una alta identidad con el polipéptido de insulina-GA de estas especies. Toda esta información, así como un diagrama de la estructura molecular de la GA se puede consultar en Vázquez-Islas et al. (2014).

2. Determinación sexual

La determinación sexual en crustáceos está establecida a través de cromosomas sexuales (Charniaux- Cotton, 1969; Ginsburger-Vogel y Charniaux- Cotton, 1982). En camarones penaeidos no se distinguen cromosomas sexuales (Campos-Ramos, 1997; Garza-Torres *et al.*, 2011) ni tampoco hay evidencia de determinación sexual ambiental (Campos-Ramos *et al.*, 2006). Se considera que todas las especies hasta ahora estudiadas poseen un sistema de determinación sexual WZ/ZZ estable, en donde la hembra determina el sexo (Campos-Ramos *et al.*, 2006), confirmado por estudios de ligamiento genético asociado al sexo (Li *et al.*, 2003; Zhang *et al.*, 2006; Staelens *et al.*, 2008; Yu *et al.*, 2017; Wang *et al.*, 2020; Garcia *et al.*, 2024).

Históricamente, el sistema de determinación sexual para cada especie de acuicultura se ha dilucidado mediante la reversión sexual, seguida de cruzar los organismos revertidos con organismos normales, y analizar la proporción del sexo en la progenie. Este procedimiento es el principio del control del sexo para fines de acuicultura.

Se encuentran dos escenarios con respecto a la determinación sexual en los decápodos. El primero es un sistema estable de determinación sexual primaria, siendo la hembra el sexo heterogamético, y con un gen, o una región en algún lugar del cromosoma W que determina el sexo (hembra con genotipo WZ). En contraste, los machos tienen dos cromosomas sexuales ZZ.

El segundo escenario involucra una hormona secretada por la GA, que diferencia, o al menos mantiene al individuo como un macho (presumiblemente un gen o genes en el cromosoma Z o en algún cromosoma autosómico). En teoría, debe haber una conexión entre estos dos escenarios. Sin embargo, hasta ahora, el mecanismo sexual molecular que precede al desarrollo GA para diferenciarse en macho, o que precede y anula una vía sexual macho-GA, para diferenciarse en hembra, sigue siendo un tanto desconocido (Campos-Ramos y Guerrero-Tortolero, 2019), aunque ya existen indicios de que este proceso está regulado debido a una perturbación neuroendocrina, como se describe más adelante. Sin embargo, se requiere de más investigación al respecto.

En *M. rosenbergii*, los neomachos WZ cruzados con hembras WZ sesgaron la progenie hacia las hembras (Malecha *et al.*, 1992), mientras que las neohembras ZZ, cruzadas con machos ZZ, produjeron progenie exclusivamente de machos (Aflalo *et al.*, 2006). En *C. quadricarinatus*, se determinó un sistema de determinación sexual WZ/ZZ después del cruce de hembras WZ con machos ZZ, y entre intersexuales WZ y hembras WZ, lo que dio las proporciones sexuales esperadas



de 1:1 y 3:1, respectivamente. Por lo tanto, los organismos intersexuales fueron machos fenotípicamente funcionales, pero hembras WZ genotípicamente (Parnes et al., 2003).

2.1 Determinación sexual en híbridos

En los híbridos interespecíficos de agua dulce y marina, la regla de Haldane debe de entenderse para comprender la desviación en la proporción de los sexos. Cabe señalar que el cruce interespecífico en camarones penaeidos se ha investigado muy poco.

La regla de Haldane (observada en la naturaleza por John Burdon Sanderson Haldane en 1922) establece que, en la progenie de un híbrido, cuando un sexo está ausente, es raro, o es estéril, ese sexo siempre es el heterocigoto (Haldane, 1922). Más información de Haldane se puede consultar en Guerrero-Tortolero y Campos-Ramos (2019).

En los cangrejos de río, los cruces intra-subespecíficos y los cruces inter-subespecíficos entre machos *Cherax destructor albidus* (Clark) y la hembra de *C. destructor destructor* dieron la proporción sexual esperada de 1:1. Sin embargo, el cruzamiento recíproco inter-subespecífico resultó en una proporción consistente de 3:1 machos y hembras, en tres familias, y de solo 100% machos en otra familia (Austin y Meewan, 1999).

En los camarones penaeidos, el sexo heterogamético femenino (WZ/ZZ) también sigue la regla de Haldane, después de observar una progenie sesgada hacia los machos, a partir de un cruce híbrido entre una hembra de *P. monodon* y un macho de *P. esculentus* (Haswell) (Benzie et al., 2001).

2.2 Sistema de determinación sexual elucidados con camarones triploides

El mapeo genómico en camarones penaeidos sugiere un mecanismo de determinación sexual WZ/ZZ. Adicionalmente, en dos especies de camarones inducidos a la triploidía, la proporción del sexo se ha desviado hacia las hembras.

El primer informe de inducción de triploidía en penaeidos fue en *L. vannamei*, utilizando un choque frío para retener el segundo cuerpo polar meiótico (Dumas y Campos-Ramos, 1999). Sin embargo, los organismos triploides no son viables en esta especie debido al mosaicismo que se presenta durante el desarrollo embrionario temprano (Zúñiga-Panduro et al., 2014). En otras especies, se ha logrado la inducción de triploidía viable en *F. chinensis* (Li et al., 2003), *M. japonicus* (Coman et al., 2008) y *P. monodon* (Pongtippatee et al., 2012).

En *P. monodon*, después de la retención del segundo cuerpo polar, la proporción sexual triploide fue de dos hembras: un macho (Pongtippatee *et al.*, 2012). Sin embargo, en otro estudio, la proporción del sexo fue de una hembra, por cada 1.6 machos (Sellars *et al.*, 2012). En contraste, la proporción del sexo en *F. chinensis* estuvo sesgado hacia las hembras en una proporción de 4:1 (Li *et al.*, 2003). Más aún, en *M. japonicus* se obtuvo una proporción del sexo de 16:1 hembras y machos, respectivamente (Sellars *et al.*, 2009) y 100% de hembras (Coman *et al.*, 2008).

Las proporciones del sexo en los estudios mencionados arriba dependen de la recombinación que existe entre los cromosomas sexuales durante la primera división meiótica; es decir, la distancia que existe entre el centrómero y la región (o locus) sexual. La explicación hipotética de estos resultados se puede consultar en Guerrero-Tortolero y Campos-Ramos (2019).

2.3 Inducción a la tetraploidía

La inducción de triploides produce esterilidad en camarones, lo cual es de suma importancia en la acuicultura. La lógica racional para producir camarones triploides es realizar cruces entre camarones tetraploides viables y camarones diploides. Adicionalmente, la triploidía podría desviar el sexo hacia una proporción mayor de hembras. Sin embargo, la inducción de camarones tetraploides viables no ha tenido éxito en ninguna especie. Lo anterior se debe a que los tratamientos experimentales resultaron con defectos citológicos letales durante la embriogénesis (ver revisión en Zúñiga-Panduro *et al.*, 2014). La importancia de producir camarones tetraploides radica en la mayor producción natural de camarones triploides, sin los efectos adversos de los tratamientos directos en el crecimiento y la supervivencia. Por lo tanto, la inducción de tetraploides requiere de más investigación.

3. Reversión sexual

En langostinos, las técnicas de reversión sexual de agua dulce se basan en la extirpación (andrectomía) o en la implantación de la glándula androgénica del macho en el cefalotórax de las hembras juveniles.

3.1 Reversión sexual en *M. rosenbergii* y *Cherax quadricarinatus*

El cultivo monosexual de machos en *M. rosenbergii* comenzó a finales de la década de 1980, cuando la determinación manual-visual del sexo era la única forma de separar a los machos de las hembras, pero era un enfoque poco práctico en la acuicultura en esta especie, por ser un procedimiento muy



laborioso (Sagi *et al.*, 1986). La reversión sexual de macho a hembra (neohembra) se logró mediante una andrectomía del conducto deferente espermático en machos juveniles recién diferenciados sexualmente, con un peso corporal de menos de 1 g (aproximadamente 30 días después de la metamorfosis), en donde las gónadas aún no se habían diferenciado en testículos. Sin embargo, la supervivencia de las neohembras era muy baja con este procedimiento (1.3%). Por lo tanto, se aplicó un segundo paso cruzando neohembras adultas con machos adultos normales para obtener una progenie exclusivamente de machos, para realizar la andrectomía en muchos organismos de una manera más eficiente (Nagamine *et al.*, 1980a; Sagi y Cohen, 1990; Aflalo *et al.*, 2006).

La reversión del sexo de hembra a macho (para obtener neomachos) se obtuvo mediante la implantación de una o dos GA. El tejido se insertó quirúrgicamente dentro de la comisura ventral, entre el cefalotórax y el abdomen en hembras inmaduras y maduras. Los resultados mostraron que el 81% de los langostinos tenían apéndices masculinos y testículos que conectaban con los conductos deferentes. Además, en la región anterior de la gónada, había lóbulos espermatozógenos, y el ovario presentó una regresión y una inhibición de la vitelogénesis (Nagamine *et al.*, 1980b).

Posteriormente se observó que la fisiología de un macho activo y la reversión casi completa de las características sexuales secundarias dependían del tamaño y la edad en la implantación de tejido de GA en hembras muy jóvenes. De una manera óptima, las hembras receptoras tenían 6.5–7.5 mm de longitud del cefalotórax, alrededor de 30 días después de la metamorfosis. Después de crecer, estos neomachos conservaron los gonoductos femeninos, pero por lo demás en cuanto a morfología, eran indistinguibles de los machos normales (Malecha *et al.*, 1992).

En otras especies de langostinos, como es el caso de *Cherax quadricarinatus*, se observó una intersexualidad en donde la mitad del órgano genital era masculino y la otra mitad era femenino. Sin embargo, los caracteres externos secundarios fueron masculinos en ambos lados (Sagi *et al.*, 1996).

Cabe mencionar que en especies de *Cherax*, ciertos híbridos interespecíficos mostraron progenie exclusivamente, o mayoritariamente de machos (Lawrence, 2004).

Las técnicas anteriores de reversión sexual se modernizaron a través de la interferencia de ARN (iARN), en donde ocurre el silenciamiento o la inactivación postranscripcional de un gen que puede desempeñar un papel clave en la diferenciación sexual, lo que permite analizar o corroborar su función. Las bases de esta técnica se pueden consultar en Fire *et al.* (1998) y su aplicación en la reversión sexual de langostinos en Ventura y Sagi (2012), Ventura *et al.* (2012), y Rosen *et al.* (2010).

Existen algunos bioensayos reportados en la literatura de langostinos tratados con la hormona 17 β -Estradiol (E2) para la obtención de neohembras (Cai *et al.*, 2023a) y de 17 α -metiltestosterona (MT) para la obtención de neomachos (Cai *et al.*, 2023b), en donde se ha observado una desviación significativa en la proporción de sexos. Sin embargo, no se ha obtenido una reversión completa de todos los individuos. Dichos estudios no se abarcan en este documento.

3.2 Reversión sexual en camarones penaeidos

A principios de la década de los 90s, el único reporte científico que indicaba una reversión sexual incompleta en *L. vannamei*, fue una publicación de dos casos raros de hermafroditismo que podrían estar relacionados con la endogamia en el cultivo (Pérez Farfante y Robertson, 1992).

En cuanto a la reversión sexual en camarones penaeidos, ya sea mediante la técnica de andrectomía o la implantación de AG, no se han tenido resultados exitosos en ninguna especie, y es por ello que no existen reportes científicos al respecto. Ambas técnicas fueron realizadas por nuestro grupo de investigación en *L. vannamei* en el CIBNOR sin ningún resultado exitoso. De igual manera, diseñamos y probamos el ARN de interferencia y tampoco obtuvimos una reversión sexual de macho a hembra (Vázquez-Islas, 2014).

Bioensayos con la hormona 17 α -metiltestosterona (MT)

No se reportan bioensayos utilizando MT para revertir el sexo de hembra a macho en camarones penaeidos. Sin embargo, y con seguridad, diferentes bioensayos de reversión sexual en penaeidos con MT se han realizado por diferentes grupos de investigación. Sin embargo, es evidente que los resultados no han sido satisfactorios, y por lo tanto, no han sido publicados.

Bioensayos con la hormona 17 β -Estradiol (E2)

En larvas zoeas, mysis y postlarvas (pl1 a pl70) de *Penaeus penicillatus* (Alcock) (Zhongqing, 1990) y *L. vannamei* (González-Gómez, 2001) se sometieron a tratamientos hormonales con E2: dieta oral con pellets, y por inmersión, respectivamente, con la finalidad de revertir machos a hembras. Sin embargo, esta hormona no desvió la proporción sexual de 1:1 en estas especies. En otro estudio en nauplios de *Penaeus semisulcatus* (W. De Haan), sometidos por inmersión a una concentración de 50 μ g/L de E2, se obtuvo un 72% de hembras, comparado con el control que mostró una proporción de alrededor del 50% (Akta y Genc, 2011). Sugestya *et al.* (2018) sometió por inmersión (E2 a 1.0 mg/L) de pl1 hasta pl30 en *L. vannamei*, obteniendo un 100% de hembras. En postlarvas de *Penaeus*



merguiensis (pl1-pl50) alimentadas con una dieta conteniendo 1600 mgE2/kg, se obtuvo también un 100% de hembras (Ikhwanuddin *et al.*, 2019). Un estudio similar en *P. monodon* utilizando una dieta con 1000 mgE2/kg, resultó en un 80% de hembras (Hafiz *et al.*, 2012). La investigación más reciente en la literatura con el uso de E2 para la reversión sexual de macho a hembra en *L. vannamei*, reportó un 70% de hembras, sometiendo a postlarvas (pl1-pl80) a un tratamiento por inmersión conteniendo 2000 µg/L (Wang *et al.*, 2025).

Como se observa en todos los estudios anteriores, existen muchas discrepancias en la efectividad de la reversión sexual con E2, misma que requerirá ser investigada con más precisión en estudios posteriores.

Por otro lado, es evidente que los tratamientos con E2 provocan mortalidad, la cual también es muy variable en todos los estudios, por lo que es posible que exista una mortalidad diferencial por sexo; es decir, que los machos sean más susceptibles de morir en comparación con las hembras. En este sentido, se debe de resaltar que el único estudio que ha utilizado un marcador molecular ligado al sexo es el de Wang *et al.* (2025), teniendo la certeza del genotipo sexual de los camarones. Por lo tanto, validando la desviación observada en la proporción de los sexos.

4. Efectos neuroendocrinos de E2 en la reversión sexual de *L. vannamei*

En un estudio reciente (Wang *et al.*, 20025) se analizó la expresión diferencial transcriptómica del sistema neuroendocrino, incluyendo los siguientes tejidos: los ganglios del pedúnculo ocular, el cerebro, los ganglios torácicos y el cordón nervioso ventral. Se compararon machos normales como controles (MC), los machos tratados con E2 sin reversión sexual (ME) y las neohembras (NH). El grupo de machos tratados pero que no se revirtieron a hembras (ME) mostró una inhibición en su crecimiento en comparación a los machos control (MC), lo cual pudo estar provocado por un daño neuronal. Por otro lado, en el grupo NH, se encontró una regulación negativa en las vías de unión y señalización neuronal (neuronas-receptores), lo cual sugiere una disrupción o perturbación en el desarrollo de tejidos y estructuras morfológicas asociadas al sexo. En contraste, se encontró una activación en la producción de esteroides (esteroidogénesis), y principalmente una inhibición de la señalización de la insulina, quizás inhibiendo los receptores involucrados en el péptido que se transcribe en la glándula androgénica, lo que provocó la reversión sexual.

5. Consideraciones finales y perspectivas en *L. vannamei*

- 1) Los camarones penaeidos tienen un sistema de determinación sexual WZ/ZZ (la hembra es el sexo heterogamético), y la fisiología sexual masculina está bajo el control de la glándula androgénica.
- 2) ¿Qué mecanismo sexual precede al desarrollo de la GA para provocar la masculinidad, y qué precede y anula un sistema sexual GA masculino? No está entendido del todo. A la fecha se sugiere que se trata de una perturbación neuroendocrina, provocada por la hormona estradiol, que inhibe la señalización a los receptores de la insulina, muy posiblemente relacionada con la transcripción del péptido de la glándula androgénica.
- 3) La biotecnología de ARNi requiere de más investigación para conocer la función de los genes en camarón.
- 4) La producción de híbridos interespecíficos en penaeidos requiere de más investigación.
- 5) La inducción de camarones tetraploides para la producción natural de triploides requiere de más investigación, principalmente por la esterilidad y el posible desvío hacia una mayor proporción de hembras.
- 6) El 17β -estradiol (E2) tiene el potencial de inducir la inversión sexual de macho a hembra. Sin embargo, el uso del 17α -metilttestosterona (MT) en la reversión sexual de hembra a macho para obtener neomachos requiere de más investigación.
- 7) El cultivo monosexual de hembras de *L. vannamei* dependerá de la producción de neomachos, que después de ser cruzados con hembras normales, un cuarto de la progenie tendrá un genotipo WW (super hembra), que, al ser cruzadas con machos normales, resultará en una progenie exclusiva de hembras. Lo anterior representa un gran reto de investigación científica para lograr el cultivo monosexual de hembras de *L. vannamei*.

Agradecimientos

Nuestro aprecio y agradecimiento a la Dra. Grecia Vázquez Islas y al Dr. Rodolfo Garza Torres por su contribución al estudio de la diferenciación sexual en penaeidos.



Literatura citada

- Aflalo, E.D., T.T.T. Hoang, V.H. Nguyen, Q. Lam, D.M. Nguyen, Q.S. Trinh, S. Raviv, y A. Sagi. 2006. A novel two-step procedure for mass production of all-male populations of the giant freshwater prawn *Macrobrachium rosenbergii*. *Aquaculture* 256 (1-4): 468-478.
- Aktas, M., y M.A. Genc. 2011. The effects of 17 β -estradiol on growth, survival and feminization of green tiger Shrimp, *P. semisulcatus* (Decapoda: Penaeidae). *Journal of Animal and Veterinary Advances* 10(5): 562-565.
- Alfaro J. 1994. Ultrastructure of the androgenic gland, spermatogenesis and oogenesis in marine shrimps (Decapoda: Penaeidae). *Revista de Biología Tropical* 42 (Suppl. 2): 121-129.
- Austin, C.M., y M. Meewan. 1999. A preliminary study of primary sex ratios in the freshwater crayfish, *Cherax destructor* Clark. *Aquaculture* 174 (1-2): 43-50.
- Benzie, J.A.H., M. Kenway, y E. Ballment. 2001. Growth of *Penaeus monodon* x *Penaeus esculentus* tiger prawn hybrids relative to the parental species. *Aquaculture* 193 (3-4): 227-237.
- Cai, P., H. Yuan, Z. Gao, H. Qiao, W. Zhang, S. Jiang, Y. Xiong, Y. Gong, Y. Wu, S. Jin y H. Fu. 2023a. 17 β -estradiol induced sex reversal and gonadal transcriptome analysis in the oriental river prawn (*Macrobrachium nipponense*): mechanisms, pathways, and potential harm. *International Journal of Molecular Science* 24(10):8481.
- Cai, P., H. Yuan, Z. Gao, P. Daka, H. Qiao, W. Zhang, S. Jiang, Y. Xiong, Y. Gong, Y. Wu, S. Jin y H. Fu. 2023b. Sex reversal induced by dietary supplementation with 17 α -methyltestosterone during the critical period of sex differentiation in oriental river prawn (*Macrobrachium nipponense*). *Animals (Basel)* 13(8):1369.
- Campos-Ramos R., F.J. Magallón-Barajas, G. Portillo-Clark, M.A. Porchas-Cornejo, y J. Naranjo-Páramo. 1994. Crecimiento y sobrevivencia de machos y hembras de camarón café *Penaeus californiensis* con macroalgas de *Caulerpa sertularioides*. En: *Memorias del X Symposium Internacional de Biología Marina*. Ensenada, Baja California. Junio 13-17 de 1994, pp. 132. Universidad Autónoma de Baja California, México.
- Campos-Ramos, R., R. Garza-Torres, D.A. Guerrero-Tortolero, A.M. Maeda-Martínez, y H. Obregón-Barboza. 2006. Environmental sex determination, external sex differentiation, and structure of the androgenic gland in the Pacific white shrimp *Litopenaeus vannamei* (Boone). *Aquaculture Research* 37 (15): 1583-1593.

- Campos-Ramos, R., y D.A. Guerrero-Tortolero. 2019. Sex reversal and determination and sex control in shrimp and prawn. En: Sex Control in Aquaculture, Volume II, Chapter 36, First Edition. Edited by Han-Ping Wang, Francesc Piferrer, Song-Lin Chen, and Zhi-Gang Shen. © 2019 John Wiley & Sons Ltd. Published 2019 by John Wiley & Sons Ltd.
- Charniaux-Cotton, H. 1953. Étude du déterminisme des caractères sexuels secondaires par castration chirurgicale et implantation d'ovaire chez un Crustacé Amphipode (*Orchestia gammarella*). Comptes Rendus Hebdomadaire des Séances de l'Académie des Sciences Paris 236: 141-143.
- Charniaux-Cotton, H. 1954. Découverte chez un Crustacé Amphipode (*Orchestia gammarella*) d'une glande endocrine responsable de la différenciation des caractères sexuels primaires et secondaires mâles. Comptes Rendus Hebdomadaire des Séances de l'Académie des Sciences Paris 239: 780-782.
- Charniaux-Cotton, H. 1960. Sex determination. In: Talbot, H.W. (ed). The Physiology of Crustacea, Vol. I, Metabolism and Growth. Academic Press, New York, USA. pp.441-447.
- Charniaux-Cotton, H. 1962. Androgenic gland of crustaceans. General and Comparative Endocrinology 1 (Suppl. 1): 241-247.
- Chow, S., y P.A. Sandifer. 1991. Differences in growth, morphometric traits and male sexual maturity among Pacific white shrimp, *Penaeus vannamei*, from different commercial hatcheries. Aquaculture 92: 165-178.
- Coman, F.E., M.J. Sellars, B.J. Norris, G.J. Coman, y N.P. Preston. 2008. The effects of triploidy on *Penaeus* (*Marsupenaeus*) *japonicus* (Bate) survival, growth and gender when compared to diploid siblings. Aquaculture 276 (1-4): 50-59.
- Curtis, C.M., y C.M. Jones. 1995. Observations on monosex culture of redclaw crayfish *Cherax quadricarinatus* von Martens (Decapoda: Parastacidae) in earthen ponds. Journal of the World Aquaculture Society 26 (2): 154-159.
- Dumas, S., y R. Campos-Ramos. 1999. Triploidy induction in the Pacific white shrimp *Litopenaeus vannamei* (Boone). Aquaculture Research 30 (8): 621-624.
- Fire, A., S. Xu, M.K. Montgomery, S.A. Kostas, S.E. Driver, y C.C. Mello. 1998. Potent and specific genetic interference by double-stranded RNA in *Caenorhabditis elegans*. Nature 391 (6669): 806-811.
- Garcia, B.F., V.A. Mastrochirico-Filho, J. Gallardo-Hidalgo, G.R. Campos-Montes, T. Medrano-Mendoza, P.V. Rivero-Martínez, A. Caballero-Zamora, D.T. Hashimoto y J.M. Yáñez. 2024. A high-density linkage map and sex-determination loci in Pacific white shrimp (*Litopenaeus vannamei*). BMC Genomics 5:25(1):565.



- Garza-Torres, R., A.M. Maeda-Martínez, D.A. Guerrero-Tortolero, H. Obregón-Barboza, y R. Campos-Ramos. 2011. Description of meiosis in female and male Pacific white shrimp *Litopenaeus vannamei* (DECAPODA: PENAEIDAE). *Journal of Crustacean Biology* 31(1): 75-81.
- Garza-Torres, R., R. Campos-Ramos, y A.M. Maeda-Martínez. 2009. Organogenesis and subsequent development of the genital organs in female and male Pacific white shrimp *Penaeus* (*Litopenaeus*) *vannamei*. *Aquaculture*. 296(1-2): 136-142.
- Ginsburger-Vogel, T., y H. Charniaux-Cotton. 1982. Sex determination. En: Abele, L.G. (ed). *The Biology of Crustacea*. Academic Press, New York, pp. 257-281.
- González-Gómez, G. 2001. Evaluación del efecto de la hormona esteroideal 17 β -oestradiol en el sexo del camarón blanco, *Litopenaeus* (*Penaeus*) *vannamei*, y la artemia, *Artemia* sp. Tesis de Licenciatura. Universidad Autónoma de Baja California Sur, y Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste S.C., La Paz, Baja California Sur, México.
- Hafiz, M., M. Hidayah, A. YUSDIANATU, M. AMBAK, A. ABOL-MUNAFI, y M. IKHWANUDDIN. 2012. Effect of estrogen hormone, 17 β -estradiol on feminization, survival rate and growth rate of tiger shrimp, *Penaus monodon* (Fabricius, 1798) postlarvae. *Borneo Science* 30:70-80.
- Haldane, J.B.S. 1922. Sex ratio and unisexual sterility of hybrid animals. *Journal of Genetics* 12 (2): 101-109.
- Hansford, S.W. y D.R. Hewitt. 1994. Growth and nutrient digestibility by male and female *Penaeus monodon*: evidence of sexual dimorphism. *Aquaculture* 125 (1-2): 147-154.
- Ikhwanuddin. M., H. Bahar, H. Ma, y H. Manan. 2019. Effect of estrogen hormone, 17 β -estradiol on feminization of banana shrimp, *Penaeus merguensis* (de Man, 1888) postlarvae and the identification of the age of external sex differentiation. *Aquaculture Reports* 13: 100177.
- Lawrence, C.S. 2004. All-male hybrid (*Cherax albidus* \times *Cherax rotundus*) yabbies grow faster than mixed-sex (*C. albidus* \times *C. albidus*) yabbies. *Aquaculture* 236 (1-4): 211-220.
- Li F., y J. Xiang. 1997. Preliminary studies on form, structure and function of androgenic gland in *Penaeus chinensis*. *Chinese Science Bulletin* 42 (6): 499-503.
- Li, F., J. Xiang, X. Zhang, L. Zhou, C. Zhang y C. Wu. 2003. Gonad development characteristics and sex ratio in triploid Chinese shrimp (*Fenneropenaeus chinensis*). *Marine Biotechnology* 5 (6): 528-535.
- Li, Y., K. Byrne, E. Miggianno, V. Whan, S. Moore, S. Keys, P. Crocos, N. Preston, y S. Lehnert. 2003. Genetic mapping of the kuruma prawn *Penaeus japonicus* using AFLP markers. *Aquaculture* 219 (1-4), 143-156.

- Malecha, S.R., P.A. Nevin, P. Ha, L.E. Barck, Y. Lamadrid-Rose, S. Masuno, y D. Hedgecock. 1992. Sex-ratios and sex-determination in progeny from crosses of surgically sex-reversed freshwater prawns, *Macrobrachium rosenbergii*. *Aquaculture* 105 (3-4): 201-218.
- Mohan, R y M.S.M. Siddeek. 1995. Biology of the Indian white shrimp, *P. indicus* H. Milne Edwards (Decapoda; Penaeidae) in the Gulf of Masira, Sultanate of Oman. *Archiv für Hydrobiologie* 135 (2): 259-270.
- Nagamine, C., A.W. Knight, A. Maggenti, y G. Paxman, 1980b. Masculinization of female *Macrobrachium rosenbergii* (de Man) (Decapoda, Palaemonidae) by androgenic gland implantation. *General and Comparative Endocrinology* 41 (4): 442-457.
- Nagamine, C., A.W. Knight, A. Maggenti, y G. Paxman. 1980a. Effects of androgenic gland ablation on male primary and secondary sexual characteristics in the Malaysian prawn *Macrobrachium rosenbergii* (de Man) with first evidence of induced feminization in a non- hermaphroditic decapod. *General and Comparative Endocrinology* 41 (4): 423-441.
- Nakamura, K., N. Matsuzaki, y K.I. Yonekura. 1992. Organogenesis of genital organs and androgenic gland in the kuruma prawn. *Nippon Suisan Gakkaishi* 58 (12): 2261-2267.
- Parnes, S., I. Khalaila, G. Hulata, y A. Sagi. 2003. Sex determination in crayfish. Are intersex crayfish *Cherax quadricarinatus* (Von Martens) genetically females. *Genetical Research* 82 (2): 107-116.
- Pérez Farfante, I., y L. Robertson. 1992. Hermaphroditism in the penaeid shrimp *Penaeus vannamei* (Crustacea: Decapoda:Penaeidae). *Aquaculture* 103 (3-4): 367-376.
- Pérez-Enríquez, R., R. Llera-Herrera, P.G. Torres, y S. Avila. 2020. A fast sex detection method for the whiteleg shrimp *Litopenaeus vannamei* by post-PCR high resolution melting (HRM). *Aquaculture* 520: 734-784
- Pérez-Rostro, C.I., y A.M. Ibarra. 2003. Quantitative genetic parameter estimates for size and growth rate traits in Pacific white shrimp, *Penaeus vannamei* (Boone 1931) when reared indoors. *Aquaculture Research* 34 (7): 543-553.
- Pongtippatee, P., K. Laburee, P. Thaweethamsewee, R. Hiranphan, S. Asuvapongpatana, W. Weerachatanukul, T. Srisawat, y B. Withyachumnarnkul. 2012. Triploid *Penaeus monodon*: sex ratio and growth rate. *Aquaculture* 356-357: 7-13.
- Rosen, O., R. Manor, S. Weil, O. Gafni, A. Linial, E.D. Aflalo, T. Ventura, y A. Sagi. 2010. A sexual shift induced by silencing of a single insulin-like gene in crayfish: ovarian upregulation and testicular degeneration. *PLoS One* 5 (12), e15281.
- Sagi, A, y D. Cohen. 1990. Growth, maturation and progeny of sex-reversed *Macrobrachium rosenbergii* males. *World Aquaculture Report* 21 (4): 87-90.



- Sagi, A., E. Snir, y I. Khalaila. 1997. Sexual differentiation in decapod crustaceans: role of the androgenic gland. *Invertebrate Reproduction and Development* 31 (1): 55-61.
- Sagi, A., I. Khalaila, A. Barki, G. Hulata, y I. Karplus. 1996. Intersex red claw crayfish, *Cherax quadricarinatus* (von Martens): functional males with pre-vitellogenic ovaries. *The Biological Bulletin* 190 (1): 16-23.
- Sagi, A., Z. Ráanan, D. Cohen, y Y. Wax. 1986. Production of *Macrobrachium rosenbergii* in monosex population: yield characteristics under intensive monoculture conditions in cages. *Aquaculture* 51 (3-4): 265-275.
- Sellars, M.J., A. Wood, B. Murphy, R.M. McCulloch, y N.P. Preston. 2012. Triploid Black Tiger shrimp (*Penaeus monodon*) performance from egg to harvest age. *Aquaculture* 324-325, 242-249.
- Sellars, M.J., A. Wood, T.J. Dixon, L.M. Dierens y G.J. Coman. 2009. A comparison of heterozygosity, sex ratio and production traits in two classes of triploid *Penaeus* (*Marsupenaeus*) *japonicus* (Kuruma shrimp): Polar Body I vs II triploids. *Aquaculture* 296 (3-4): 207-212.
- Staelens, J., D. Rombaut, I. Vercauteren, B. Argue, J. Benzie, y M. Vuylsteke. 2008. High-density linkage maps and sex-linked markers for the black tiger shrimp (*Penaeus monodon*). *Genetics* 179 (2): 917-925.
- Sugestya, I., M., Widodo, y A. Soeprijanto. 2018. Effect of 17β -estradiol on feminization, growth rate and survival rate of pacific white shrimp (*Litopenaeus vannamei*, Boone 1931) postlarvae. *Journal of Experimental Life Science* 8(1): 37-42.
- Vázquez-Islas, G. 2014. Aspectos reproductivos en machos del camarón blanco del Pacífico *Litopenaeus vannamei* enfocados en la fisiología de la glándula androgénica y en la expresión del gen Lv-IAG, así como en el balance energético del espermatóforo, concomitantes con el ciclo de muda. Tesis Doctor en Ciencias, CIBNOR, La Paz BCS, México, 297 pp.
- Vázquez-Islas, G., D.A. Guerrero-Tortolero, R. Garza-Torres, P. Álvarez-Ruiz, H. Mejía-Ruiz, y R. Campos-Ramos. 2015. Quantitative analysis of hypertrophy and hyperactivity in the androgenic gland of eyestalk-ablated male Pacific white shrimp *Litopenaeus vannamei* during molt stages. *Aquaculture* 439: 7-13.
- Vázquez-Islas, G., R. Garza-Torres, D.A. Guerrero-Tortolero, y R. Campos-Ramos. 2014. Histology of the androgenic gland and expression of the insulin-like androgenic gland hormone precursor gene in the genital organ of Pacific white shrimp *Litopenaeus vannamei*. *Journal of Crustacean Biology* 34(3): 293-299.
- Ventura, T., E.D. Aflalo, S. Weil, K. Kashkush, y A. Sagi. 2011. Isolation and characterization of a female-specific DNA marker in the giant freshwater prawn *Macrobrachium rosenbergii*. *Heredity* 107 (5): 456-461.

- Ventura, T., R. Manor, E.D. Aflalo., S. Weil, O. Rosen, y A. Sagi. 2012. Timing sexual differentiation: full functional sex reversal achieved in *Macrobrachium rosenbergii* through silencing of a single insulin-like gene. *Biology of Reproduction* 86 (3): 90.
- Ventura, T., y A. Sagi. 2012. The insulin-like androgenic gland hormone in crustaceans: From a single gene silencing to a wide array of sexual manipulation- based biotechnologies. *Biotechnology Advances* 30 (6): 1543-1550.
- Wang, T., S. Li, Y. Yu, y F. Li. 2025. Sex reversal induced by 17 β -estradiol may be achieved by regulating the neuroendocrine system of the Pacific white shrimp *Penaeus vannamei*. *BMC Genomics* 26: 86 (2025).
- Wang, Y., Y. Yu, S. Li, X. Zhang, J. Xiang, y F. Li. 2020. Sex-specific transcriptome sequencing of zoea I larvae and identification of sex-linked genes using bulked segregant analysis in Pacific white shrimp *Litopenaeus vannamei*. *Marine Biotechnology* 22: 423-32.
- Wickins, J.F., y T.W. Beard. 1974. Observations on the breeding and growth of the giant freshwater prawn *Macrobrachium rosenbergii* (de Man) in the laboratory. *Aquaculture* 3 (2): 159-174.
- Yu, Y., X. Zhang, J. Yuan, Q. Wang, S. Li, H. Huang, F. Li y J. Xiang. 2017. Identification of sex-determining loci in Pacific White Shrimp *Litopenaeus vannamei* using linkage and association analysis. *Marine Biotechnology* (NY) 19(3):277-286.
- Zhang, L., C. Yang, Y. Zhang, L. Li, X. Zhang, Q. Zhang, y J. Xiang. 2006. A genetic linkage map of Pacific white shrimp (*Litopenaeus vannamei*): sex-linked microsatellite markers and high recombination rates. *Genetica* 131 (1): 37-49.
- Zhongqing, W. 1990. The sexual proportion of *P. penicillatus* under the treatment of 17 beta estradiol. *Marine Sciences/ Haiyang Kexue*. Qingdao (2): 53-56.
- Zúñiga-Panduro, M.J., R. Casillas-Hernández, R. Garza-Torres, D.A. Guerrero-Tortolero, J.M. Grjalva-Chon, y R. Campos-Ramos. 2014. Abnormalities and possible mosaicism during embryonic cell division after cold shock in zygotes of the Pacific white shrimp, *Litopenaeus vannamei*, related to failure of induction of tetraploidy and triploidy. *Journal of Crustacean Biology* 34 (3): 367-376.

**Cita**

Campos-Ramos R. y D.A. Guerrero-Tortolero. Avances en la determinación sexual, reversión sexual, y control sexual en el camarón blanco del Pacífico *Litopenaeus vannamei*. Recursos Naturales y Sociedad, 2025. Vol. 11 (3): 103-122. <https://doi.org/10.18846/renaysoc.2025.11.11.03.0006>

Sometido: 6 de mayo de 2025

Aceptado: 1 de septiembre de 2025

Editores asociados: Dr. Crisalejandra Rivera-Pérez

Editora ejecutiva: Dra. Crisalejandra Rivera-Pérez

Diseño gráfico editorial: Ing. Francisca Elizabeth Villegas Carrasco

The Fish Swim Bladder: A High-Value Nutritional Product?

La vejiga natatoria de los peces: ¿producto de alto valor nutricional?

Honorio Cruz-López^{1*}; Lus M. López²

Resumen

La vejiga natatoria es un órgano versátil en los peces óseos, esencial para la regulación de la flotabilidad y, en ciertas especies, para la señalización acústica. Más allá de sus funciones fisiológicas, en el presente texto se destaca la importancia cultural de la vejiga natatoria seca, conocida como "Maw". Valorada en las sociedades asiáticas, Maw se asocia con supuestos beneficios para la salud, incluyendo propiedades regenerativas y preventivas; además es un símbolo de riqueza, posición social y prestigio. El perfil nutricional de la vejiga natatoria de peces marinos de Baja California revela su riqueza en colágeno y aminoácidos funcionales. Si bien, su contenido de aminoácidos esenciales no es óptima para las necesidades dietéticas humanas, su composición sugiere su posible aplicación en suplementos o productos alimenticios funcionales.

Palabras claves: Totoaba, Curvina golfina, Maw, alimentos funcionales

¹ Escuela Nacional de Estudios Superiores, Unidad Mérida-UNAM, Ucu 97357 México.

² Facultad de Ciencias Marinas, Universidad Autónoma de Baja California (UABC), Ensenada 22860, México.

*Autor de correspondencia: hcl@enesmerida.unam.mx; (646) 1904296



Abstract

The swim bladder is a versatile organ in bony fish, essential for regulating buoyancy and, in certain species, for acoustic signaling. Beyond its physiological functions, this article highlights the cultural importance of the dried swim bladder, commonly referred to as "Maw." Valued in Asian societies, Maw is associated is believed to offer health benefits, including regenerative and preventative properties, and is also a symbol of wealth, social status, and prestige. The nutritional profile of the swim bladder of marine fish from Baja California reveals its high collagen content and abundant functional amino acids. Although its essential amino acid content is not optimal for human dietary needs, its composition suggests its potential application in dietary supplements or functional food products.

Keywords: Totoaba, Gulf corvina, Maw, functional foods

¿Qué es la vejiga natatoria de los peces?

La vejiga natatoria también llamada vejiga de gas, es un órgano elástico ubicado bajo la columna vertebral en la mayoría de los peces óseos. Representa aproximadamente el 2% de la masa corporal total del organismo, aunque su morfología varía de acuerdo con la especie (Fig. 1). Este órgano desempeña un papel multifuncional: regula la flotabilidad mediante el equilibrio hidrostático en la columna de agua, permitiendo al pez ascender o descender con mínimo gasto energético (Pelster 2011). Además, en ciertas especies, participa en la comunicación acústica, ya sea como receptor o generador de sonidos, lo que sugiere también una función importante en la reproducción (Parmentier y Fine 2016).

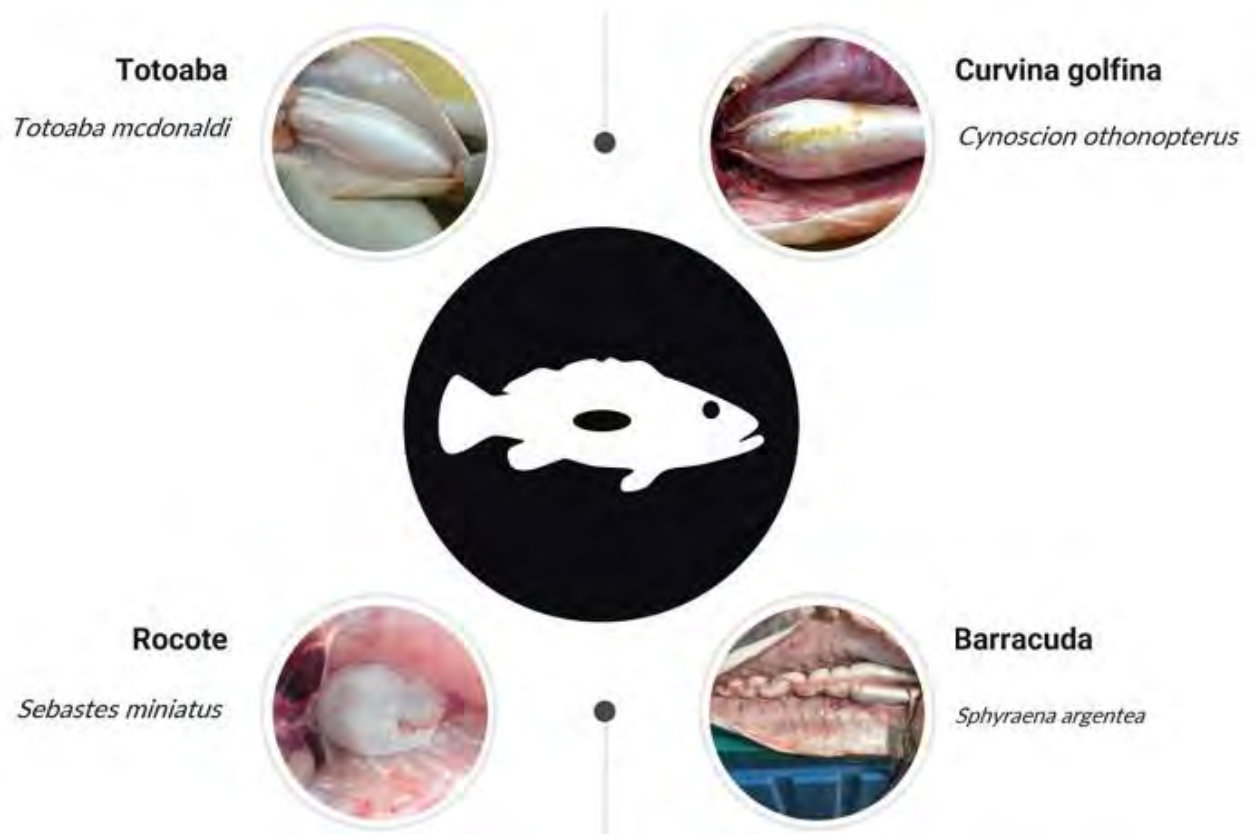


Figura 1. Vejiga natatoria: su forma más o menos oval, pero varía entre especies.

Historia como producto marino de alto valor

En el ámbito gastronómico y cultural, las vejigas natatorias secas (deshidratadas), conocidas como “Maw”, han sido históricamente consideradas un manjar de alto nivel nutricional en países asiáticos, especialmente en Hong Kong y el sur de China (Tuuli *et al.* 2016; Yu *et al.* 2024). Su consumo se asocia con atributos nutricionales y medicinales, incluyendo propiedades regenerativas y preventivas (Lin 1939). Al igual que otros productos como el pepino de mar, las aletas de tiburón o el abulón, el Maw simboliza estatus social, riqueza y prestigio en la cultura china (Sadovy de Mitcheson *et al.* 2019). La demanda comercial se concentra en especies pertenecientes a las familias Sciaenidae, Percidae, Ariidae, Latidae y Diodontidae (Clarke 2004; Tuuli *et al.* 2016; Zeng *et al.* 2018). El valor económico depende de factores como tamaño, grosor, textura, origen geográfico y sexo del ejemplar. Por ejemplo, la variedad “Man Yue” (*Corvina* de bronce, *Otolithoides biauritus*) alcanza precios entre 1,800 a 3,000 USD por kilogramo (Tuuli *et al.* 2016). Por otro lado, en México, la vejiga natatoria (llamada también “buche”), es obtenida de especies como la curvina golfina (*Cynoscion othonopterus*), cuya pesca se destina tanto a la venta de filetes como de buche. No obstante, destaca el caso de la totoaba (*Totoaba macdonaldi*), especie endémica del Golfo de



California cuya captura está prohibida desde 1975 (NOM-059-SEMARNAT-2010). Pese a ello, por su vejiga natatoria (con valores de hasta 100,000 USD/kg), sigue siendo objeto de pesca ilegal para su exportación a mercados asiáticos (Sadovy de Mitcheson *et al.* 2019). La totoaba tiene similitudes morfológicas con la bahaba (*Bahaba taipingensis*), endémica de China; siendo las mayores representantes de la familia Sciaenidae —longitud aproximada de 2 metros— (Sadovy de Mitcheson *et al.* 2019). Ambas especies están clasificadas por la CITES (Convención sobre el Comercio Internacional de Especies Amenazadas de Fauna y Flora Silvestres) como vulnerable (totoaba) y en peligro crítico de extinción (bahaba).

La totoaba es cultivada a través de las Unidades de Manejo para la Conservación de la Vida Silvestre (UMA) que está regulada por la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT), operando bajo un modelo que integra la reproducción en cautiverio, la repoblación de ejemplares en su hábitat natural y la comercialización regulada del filete.

¿Podemos usar la vejiga natatoria como alimento?

La vejiga natatoria presenta un contenido proteico destacado (alrededor del 90% en peso seco), con el colágeno como proteína dominante. Además, contiene una diversidad de nutrientes entre ellos glicosaminoglicanos, ácidos grasos omega-3 y minerales esenciales como sodio, fósforo, calcio y zinc (Lin 1939; Eun *et al.* 1994; Pan *et al.* 2018). Estudios recientes han explorado el potencial nutricional de la vejiga natatoria de peces marinos de Baja California, revelando un perfil bioquímico prometedor (Fig. 2), pero con limitaciones en el contenido de aminoácidos esenciales (Cruz-López *et al.* 2021, 2023). Un análisis detallado identificó 18 aminoácidos, entre los cuales la glicina sobresale como el más abundante, seguido de ácido glutámico, prolina y arginina (Fig. 3A) con ligeras variaciones entre especies. Destaca la presencia de hidroxiprolina, aminoácido exclusivo del colágeno, que podría servir como marcador para su identificación. El contenido de aminoácidos esenciales (AAE) y no esenciales (AANE) de la vejiga natatoria de totoaba, curvina golfina y el filete del atún y salmón se observa en la Fig. 3B. Sin embargo, la relación entre AAE y AANE en estas vejigas es de 0.2 — 0.3, cifra significativamente inferior al 0.98 — 1.1 registrado en proteínas en el músculo de pescado (McLean *et al.* 2024). Este dato sugiere que, aunque son ricas en proteínas, no satisfacen los requerimientos de aminoácidos esenciales para la dieta humana. No obstante, su valor radica en los aminoácidos funcionales, asociados a propiedades bioactivas. La glicina y la arginina, por ejemplo, están vinculadas a la síntesis de antioxidantes, la regulación inmunológica y la reducción del riesgo de enfermedades cardiovasculares (Wu 2009). Estos compuestos, junto con su bajo contenido lipídico, posicionan a la vejiga natatoria como un ingrediente potencial para suplementos

nutricionales o alimentos funcionales basados en colágeno, más que como fuente primaria de proteína. De hecho, estudios recientes han obtenido compuestos que exhiben actividades biológicas incluyendo antioxidante, antiinflamatorio, cicatrización de heridas, antienvjecimiento, entre otros (Yu *et al.* 2024).

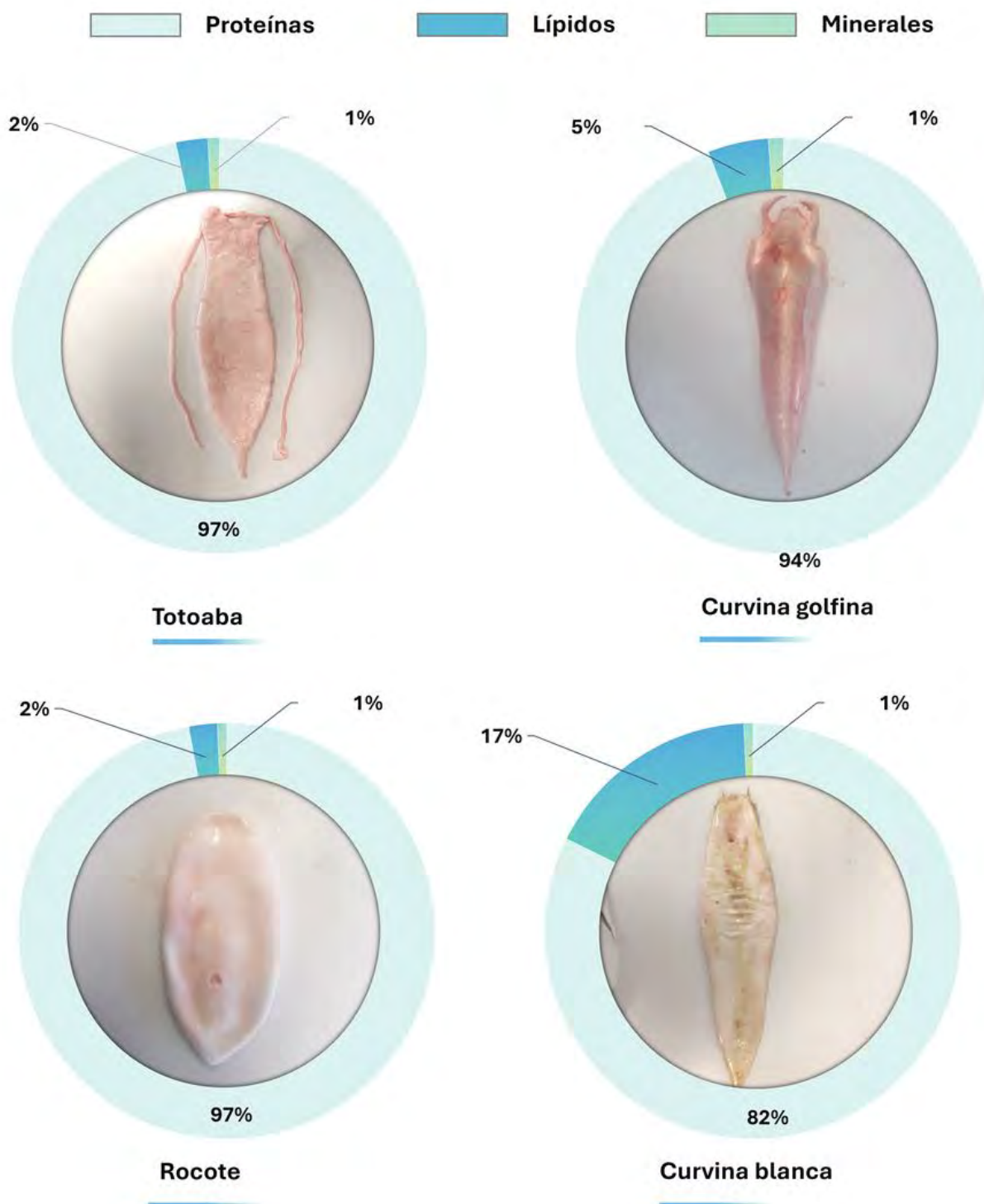


Figura 2. Composición proximal de la vejiga natatoria de peces marinos.

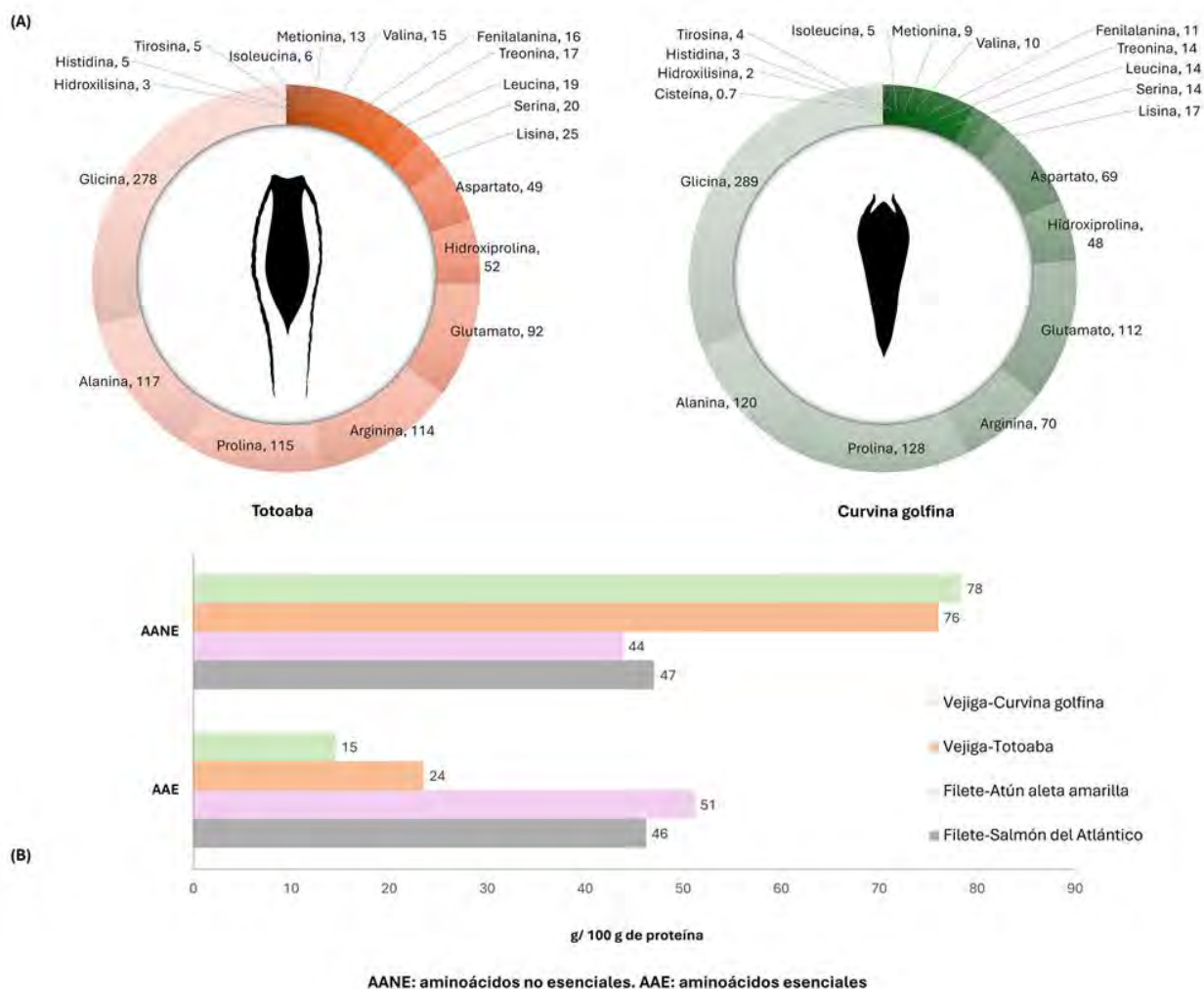


Figura 3. Composición de aminoácidos en la vejiga natatoria (A) y comparación de AAE y AANE en la vejiga natatoria y filete de pescado (B). Los valores en ambas figuras representan g/ 100 g de proteína, en peso seco.

Perspectivas y Consideraciones

Aunque no es una fuente primaria de proteína completa, la vejiga natatoria puede considerarse un producto de alto valor funcional o nutraceutico debido a su riqueza en biomoléculas activas. Además, para equilibrar su perfil aminoacídico se podría combinar con otras fuentes proteicas lo que pueden derivar en alimentos funcionales enriquecidos. En el contexto de México, la vejiga natatoria representa una oportunidad para diversificar la cadena de valor acuícola y pesquera, siempre que su aprovechamiento se alinee con criterios científicos, éticos y ambientales. La colaboración multidisciplinaria (sector académico, industria y gobierno) será clave para transformar este recurso subutilizado en un motor para el desarrollo sostenible de compuestos bioactivos con aplicaciones como nutraceuticos, farmaceuticos o cosmética, entre otras.

Agradecimientos

Al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías (CONAHCYT #291837), la Unidad de Biotecnología en Piscicultura UMA (DGVS-CR-IN-1084-B.C./09). HCL beneficiario de una beca (2017-2021) de CONAHCYT (CVU: 362129). A los egresados de la Facultad de Ciencias Marinas UABC; Yadira Cortes Santiago, Pedro Méndez, Castro Romel Borbón Ojeda.

Literatura Citada

- Clarke S. 2004. *Understanding pressures on fishery resources through trade statistics: a pilot study of four products in the Chinese dried seafood market*. Fish and Fisheries (5):53–74.
- Cruz-López, H., S. Rodríguez-Morales, L.M. Enríquez-Paredes *et al.* 2021. *Comparison of collagen characteristics from the skin and swim bladder of Gulf corvina (Cynoscion othonopterus)*. Tissue and Cell (72): 101593.
- Cruz-López H, S. Rodríguez-Morales, L.M. Enríquez-Paredes *et al.* 2023. *Swim bladder of farmed Totoaba macdonaldi: a source of value-added collagen*. Marine Drugs (21): 173.
- Eun, J.B., H.J. Chung y JO Hearnberger. 1994. *Chemical composition and microflora of channel catfish (Ictalurus punctatus) Roe and swim Bladder*. Journal of Agricultural and Food Chemistry (42): 714–717.
- Lin, S.Y. 1939. *Fish air-bladders of commercial value in China*. The Hong Kong Naturalist: a Quarterly Illustrated Journal Principally for Hong Kong and South China (91): 108–118.
- McLean E, K. Alfrey, D. Gatlin, G. Gaylord y F. Barrows. 2024. *Muscle amino acid profiles of eleven species of aquacultured animals and their potential value in feed formulation*. Aquaculture and Fisheries (9): 642-652.
- Pan, Y., P. Wang, F. Zhang, *et al.* 2018. *Glycosaminoglycans from fish swim bladder: isolation, structural characterization and bioactive potential*. Glycoconjugate Journal (35): 87–94.
- Parmentier, E., y M.L. Fine. 2016. *Fish Sound Production: Insights*. In: Suthers, R., Fitch, W., Fay, R., Popper, A. (eds) Vertebrate sound production and acoustic communication. Springer Handbook of Auditory Research, 53. Springer Cham 19–49.
- Pelster, B. 2011. *Buoyancy, locomotion, and movement in fishes: Swim bladder function and buoyancy control in fishes*. In: Encyclopedia of Fish Physiology 526–534.



- Sadovy de Mitcheson, Y., To AW lun, NW. Wong, et al. 2019. *Emerging from the murk: threats, challenges and opportunities for the global swim bladder trade*. Reviews in Fish Biology and Fisheries (29): 809–83.
- Tuuli, C.D., Y.S. de Mitcheson y N.G. Wai-Chuen. 2016. *Molecular identification of croaker dried swim bladders (maw) on sale in Hong Kong using 16S rRNA nucleotide sequences and implications for conservation*. Fisheries Research (174): 260–269.
- Wu, G. 2009. *Amino acids: metabolism, functions, and nutrition*. Amino Acids (37): 1–17.
- Yu, H., E. Mubango, K. Wu, H. Luo y H. Hong. 2024. *Unraveling the potential of blue foods: A comprehensive review on the extraction, bioactive properties, and applications of proteins and biopeptides from fish swim bladder*. Trends in Food Science & Technology (144): 104345.

Semblanza de los autores

- **Dr. Honorio Cruz López** su actividad académica se centra en revalorización de biorresiduos de la pesca y acuicultura. Pertenece al SNII nivel candidato.
- **Dra. Lus M. López** su actividad académica se centra en el área de nutrición acuícola. Pertenece al SNII nivel II.

Cita

Cruz-López, H. y L. M. López. La vejiga natatoria de los peces: ¿producto de alto valor nutricional?. Recursos Naturales y Sociedad, 2025. Vol. 11 (3): 124-131.
<https://doi.org/10.18846/renaysoc.2025.11.11.03.0007>

Sometido: 1 de abril de 2025

Aceptado: 15 de agosto de 2025

Editor asociado: Dr. Fausto Valenzuela Quiñonez

Editora ejecutiva: Dra. Crisalejandra Rivera-Pérez

Diseño gráfico editorial: Ing. Francisca Elizabeth Villegas Carrazco

Microplastics: Silent pollution threatening the Gulf of California

Microplásticos: La contaminación silente que amenaza al Golfo de California

T. Enríquez Espinoza¹, Arturo Sánchez Paz¹,
T. Encinas García¹, José Fernando Mendoza Cano^{1*}

Resumen

Los plásticos son el tercer material de producción más utilizado actualmente y son considerados un producto habitual y esencial en la vida cotidiana. No obstante, debido a que solamente entre 9-12% de todos los residuos de plástico generados en el mundo se reciclan, la mayor parte de estos acaba en vertederos o en la naturaleza. Al exponerse a las condiciones ambientales, los residuos plásticos se fragmentan en partículas pequeñas o microplásticos (MPs) de las cuales algunas flotarán en la superficie de nuestros océanos. El Golfo de California es uno de los ecosistemas oceánicos más productivos del mundo, y una de las regiones socioeconómicamente más importantes del país con actividades significativamente relevantes como pesca, acuicultura y turismo. Actualmente, son pocos los estudios enfocados en evaluar la presencia y abundancia de MPs en el Golfo de California y sus diferentes especies marinas que en él habitan. Este artículo tiene el objetivo de presentar el escenario actual que enfrenta esta importante región de México con respecto a la amenaza que representan los MPs al ambiente y organismos.

Palabras claves: Golfo de California, contaminación marina, microplásticos, plásticos.

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: fmendoza@cibnor.mx Tel. +52 (662) 2-13-15-93 / +52 (662) 213-15-93



Abstract

Plastics are the third most widely used production material today and are considered a common and essential product in everyday life. However, since only 9-12% of all plastic waste generated worldwide is recycled, most of it ends up in landfills or in nature. When exposed to environmental conditions, plastic waste fragments into small particles or microplastics (MPs) of which some will reach the surface of our oceans. The Gulf of California is one of the most productive ocean ecosystems in the world, and one of the most socioeconomically important regions of the country with significantly relevant activities such as fishing, aquaculture and tourism. Currently, there are few studies focused on evaluating the presence and abundance of MPs in the Gulf of California and the different marine species inhabiting it. This article aims to present the current scenario that this important region of Mexico faces with respect to the threat posed by MPs to the environment and organisms.

Keywords: Gulf of California, marine pollution, microplastics, plastisphere.

Introducción

Después del concreto y el acero, los plásticos son el tercer material de producción más utilizado actualmente (Hossain *et al.*, 2021), esto quizá, debido a que los plásticos, por lo general, son artículos duraderos, versátiles, flexibles, baratos y fácilmente disponibles en la actualidad y considerados un producto habitual y esencial en la vida cotidiana. Por otro lado, han aportado innegables beneficios tales como conservación de los alimentos y bebidas, contribuyen por su ligereza, al ahorro de energía mediante la reducción del gasto combustible y por ende en la disminución de gases de efecto invernadero, además, son excelentes aislantes térmicos y eléctricos, por lo que son usados ampliamente en la industria eléctrica y de construcción. Debido a lo anterior, la producción de este material pasó de 1.5 millones de toneladas métricas en 1950 a 390.7 millones de toneladas métricas en 2021 (Haque *et al.*, 2023), no obstante, solamente entre 9-12% de todos los residuos de plástico generados en el mundo se reciclan y la mayor parte de estos (80%) acaba en vertederos o en la naturaleza. En el medio ambiente, a medida que los residuos plásticos se exponen a las condiciones ambientales, se rompen o fragmentan sucesivamente en partículas pequeñas o microplásticos (MPs). Según la bibliografía, se calcula que cerca de 4.83 billones de MPs (partículas de 0.1 a 5 mm de tamaño) flotan en la superficie de nuestros océanos (Eriksen *et al.*, 2014).

Acuario del mundo e importancia socioeconómica

Declarado Patrimonio de la Humanidad por la UNESCO desde 2005, el Golfo de California (GC) es un ecosistema caracterizado por su biodiversidad, alta productividad biológica y endemismo de organismos marinos. También conocido como Mar de Cortés o Mar Bermejo, es una extensión del Océano Pacífico y se sitúa entre la península de Baja California y los estados de Sonora y Sinaloa, en la zona noroeste de México. El GC es un mar subtropical interior largo de al menos 1,100 km de longitud y su anchura oscila entre 80 y 200 km, con una superficie aproximada de 160,000 km² (Calmus *et al.*, 2017). Debido a que la entrada al GC es profunda y amplia (~2.5 y ~200 km, respectivamente), las masas de agua superficial provenientes de la corriente de California (fría y de salinidad intermedia), la corriente tropical superficial (cálida y salinidad menor) y el agua del GC, pueden fluir libremente entre el Golfo y el Océano Pacífico (Castro *et al.*, 2017). Así, las variaciones de profundidad, temperatura y salinidad generan corrientes impulsando una enorme productividad biológica. Mientras que la producción primaria neta promedio en ecosistemas marinos es de ~100 g·cm⁻²·año⁻¹, la productividad primaria integrada promedio para todo el GC es de ~300 g·cm⁻²·año⁻¹ (Escalante-Almazán *et al.*, 2013), convirtiéndolo en uno de los ecosistemas oceánicos más productivos del mundo solamente comparable con la del Mar Rojo. No obstante, al igual que sucede con otros grandes ecosistemas a nivel mundial, se halla expuesto a diversas presiones de origen antropogénico tales como sobrepesca, contaminación, cambio climático, pérdida de biodiversidad y hábitats (Páez-Osuna *et al.*, 2017), ya que concentra actividades productivas de cuatro estados de la República Mexicana (Baja California, Baja California Sur, Sonora y Sinaloa), así, este mar al soportar el 70% de la pesca en México, contribuir con 900 millones de dólares a la economía del país y recibir alrededor de 2 millones de turistas anualmente, surge como una de las regiones socioeconómicamente más importantes del país (Sans Aguilar, 2018). De acuerdo con el informe más reciente del estado de la pesca y acuicultura mundial de la FAO (2024), durante 2022 México fue el segundo mayor productor de camarón de cultivo (~200,000 toneladas) de América Latina (séptimo a nivel mundial tras China, Vietnam, Ecuador, India, Indonesia y Tailandia). Cabe mencionar que la producción de camarón de los estados comprendidos en la zona del GC representó casi 88% de la producción total de camarón en México (CONAPESCA, 2020).

Microplásticos en el Golfo de California

La contaminación por microplásticos en los ríos, mares y océanos, tiene su origen, por lo general, en nuestras casas, es decir, más del 80% de nuestros residuos plásticos terminarán y se acumularán en vertederos y en la naturaleza (fig. 1). Ciertamente, el GC recibe anualmente aproximadamente 2



millones de turistas, y por ende, al ser las playas un recurso natural que brinda servicios y contribuye al crecimiento económico del país, la contaminación por plástico de las playas (disposición inadecuada de basura por turistas o residentes), la pesca, la acuicultura y el tráfico marítimo pudieran explicar cómo surgen los microplásticos en el mar. Un estudio reciente en playas mexicanas, comprendidas en las cinco regiones marinas del país, señala que la concentración de microplásticos varió de 31.7 a 545.8 MPs/m², cabe destacar que la región del Golfo de California fue la que manifestó una concentración media más alta (Álvarez-Zeferino *et al.*, 2020). Similarmente, López-Velázquez *et al.* (2024) reportaron recientemente concentraciones altas de MPs en playas de la costa de Chiapas (268.8- 750.4 MPs/m²).



Figura 1. Representación del uso de plásticos en la vida cotidiana (imagen fue generada con el uso de ImageFx).

No obstante, una vez que los MPs llegan al medio marino, su flotabilidad determinará su distribución; MPs con mayor densidad, como el policloruro de vinilo (PVC), tienen más probabilidades de hundirse en el agua de mar (Cook *et al.*, 2020), sin embargo, MPs como el polietileno (PE) y el polipropileno (PP), que son menos densos que el agua de mar, flotarán y serán transportados a grandes distancias por el viento y corrientes superficiales (Andrady, 2011). Los estudios enfocados a estimar la abundancia de MPs en agua de mar del GC son escasos, sin embargo, recientemente un estudio analizó la abundancia de MPs en muestras de agua de mar superficial recolectadas en cuatro lugares alrededor de un destino turístico en el Golfo de California (Bahía de Kino, Sonora) antes y después del receso laboral de *Semana Santa*, los resultados indican que, la concentración de microplásticos (7–22 MPs/L) en algunos sitios de muestreo, aumentó de 2 a 4 veces durante las vacaciones de

primavera, pudiendo estar influenciada por la afluencia de turistas (Sánchez Paz *et al.*, 2025), adicionalmente Rios-Mendoza *et al.* (2021), reportan valores de 1.7–2.0 MPs ·m⁻³ en aguas superficiales recolectadas a la entrada del Golfo de California en Mazatlán, Sinaloa. Variaciones en la abundancia, tamaño y tipos de MPs (fibras, fragmentos y esferas) en los estudios científicos pueden variar debido a los métodos de colección de muestras empleados, condiciones ambientales, volúmenes (agua o arena) y métodos de determinación. En todo caso, es importante señalar que las microfibras son el tipo de desecho antropogénico más abundante (85%) en el ambiente marino especialmente en las costas (Browne *et al.*, 2011), la razón pudiera explicarse por estudios que demuestran que al menos 700,000 microfibras de una prenda (principalmente poliéster) son liberadas al medio ambiente durante un proceso de lavado en casa (Mishra *et al.*, 2019). Ahora bien, como se mencionó anteriormente, variables como flotabilidad, factores fisicoquímicos y la degradación microbiana hacen que algunos MPs se depositen en el fondo marino (fig. 2), así, estudios recientes en sedimentos que rodean arrecifes del Golfo de California evidencian la elevada abundancia de MPs (3-7 MPs/ g de sedimento), siendo las microfibras el tipo de MPs más abundante (Arreola-Alarcón *et al.*, 2022).



Figura 2. Representación de fragmentos plásticos en sedimentos del Golfo de California (imagen fue generada con el uso de ImageFx).

Finalmente, es importante mencionar que el Golfo de California es refugio de diversos mamíferos marinos, de hecho, es aquí donde se encuentra el hogar de posiblemente las últimas 8-13 “vaquitas marinas” (*Phocoena sinus*). Análisis de agua y arena en áreas que rodean el espacio marino de



protección (Alto Golfo de California y Delta del Río Colorado) de esta marsopa en peligro de extinción, evidencian la presencia de MPs (fragmentos y fibras) sugiriendo que parte de los MPs en las playas y en el área de refugio de la vaquita marina podrían provenir de zonas urbanas cercanas al Golfo de California y de actividades como la pesca (Cruz-Salas et al., 2023).

Microplásticos en organismos marinos

Según la Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas, el Golfo de California alberga al menos 32 especies de cetáceos (ballenas y delfines) y tres especies de pinnípedos (lobos marinos y focas), de hecho, en esta región marina, es posible observar el 75% de las especies de mamíferos marinos de México y un tercio de las especies del mundo. Desafortunadamente, los mamíferos marinos (cetáceos y pinnípedos) son considerados indicadores clave de la salud de los ecosistemas marinos, y muchas especies enfrentan serias amenazas para su conservación debido a diversos factores de estrés originados por actividades antropogénicas (Zantis et al., 2021). Los mamíferos marinos son vulnerables a la exposición a microplásticos presentes en el medio marino, a través de la ingestión directa del agua de mar (ballenas barbadas como la ballena gris pueden filtrar hasta 80,000 litros de agua por bocanada) e ingestión indirecta de presas contaminadas con MPs (transferencia trófica), por tal motivo, estudios en cetáceos y pinnípedos, varados, capturados accidentalmente o cazados, han evidenciado la presencia de MPs en el tracto gastrointestinal de estos organismos (Zantis et al., 2021). Un estudio en el GC abordó la ingestión de MPs por leones marinos, tras la revisión de heces se identificaron 294 partículas, de las cuales el 34% eran sintéticas o semisintéticas, a pesar de que no se pudo establecer la vía exacta de ingestión, los resultados sugieren que los MPs podrían estar entrando al organismo de los pinnípedos por transferencia trófica o ingestión accidental durante la alimentación (Ortega-Borchardt et al., 2023).

Por otro lado, Pinho et al. (2022) evidenciaron la presencia de partículas plásticas en tractos gastrointestinales de la raya redonda del Pacífico, un pez cartilaginoso bentónico, el cual se alimenta de principalmente de organismos mediante su boca ventral succionando a sus presas. Además, revela un patrón en la presencia de polímeros (poliamida o nailon, polietileno, polipropileno y poliacrílico) tanto en los sedimentos como en el tracto gastrointestinal; asimismo, relacionan la presencia de estos polímeros con las actividades humanas llevadas a cabo en esta zona del GC, concretamente a la pesca intensiva artesanal e industrial, ya que se utilizan para la elaboración de redes de pesca.

Los peces constituyen una parte esencial de las cadenas tróficas marinas, dependiendo de su tamaño, especie y hábitat son presas de diversos organismos. Entre sus principales depredadores se encuentran peces más grandes (tiburones, atunes o meros); mamíferos marinos (delfines, focas y orcas); aves marinas (pelícanos, gaviotas, alcatraces); reptiles (cocodrilos y serpientes marinas); invertebrados mayores (calamares, pulpos y crustáceos) y además los principales depredadores de peces a nivel global, los seres humanos. La presencia de partículas de plástico en tractos gastrointestinales de peces (sardina, lisa, pez aguja, jurel del Pacífico, pámpano, pargo, mojarra, barbudo azul y corvina) de un sistema estuarino tropical del Golfo de California ha sido evidenciada por Salazar-Pérez *et al.* (2021), asimismo, todas las partículas plásticas encontradas (~1400) consistían en fibras (microfibras de 0.2- 4.49 mm y mesofibras de 5.4 a 19.86 mm), los polímeros identificados por espectroscopia ATR-FTIR fueron poliamida (51.2%), polietileno (36.6%), polipropileno (7.3%) y poliacrílico (4.9%).

Dentro de los organismos marinos, es importante incluir a las aves que conforman un grupo heterogéneo de especies adaptadas a la vida acuática: patas palmeadas (pelícanos, patos y gaviotas) o patas zancudas (garzas y flamencos), algunas especies de aves pueden permanecer en el mar durante casi toda su vida, otras lo visitan únicamente para alimentarse o reproducirse. Coria y Ventura (2007), mencionan que existen registros de 56 especies de aves marinas en el Golfo de California, 26 de ellas son migratorias, 10 son residentes y seis de ellas son cuasiendémicas (no son estrictamente endémicas, pero muestran una fuerte preferencia por esa zona). Actualmente, la evidencia científica o académica que demuestre la presencia de MPs en aves que habitan el GC es pobre o nula, sin embargo, al estar estrechamente relacionados los peces y las aves marinas en los ecosistemas acuáticos, especialmente a través de las relaciones tróficas (diversas especies de aves se alimentan casi exclusivamente de peces, crustáceos y moluscos), y al haber registros de MPs en peces del GC, cabe esperar la presencia de MPs en las aves marinas del GC. Recientemente, un estudio demostró que, de 16 especies de aves marinas monitoreadas, la gaviota fue la que presentó mayor incidencia de MPs en su contenido estomacal, además que los fragmentos plásticos translúcidos y blancos fueron los más ingeridos (Basto *et al.*, 2019). Resultados semejantes se reportaron en aves marinas que habitan el Mar Negro, la especie que más ingiere MPs son las gaviotas, mientras que en los cormoranes “*pato buzo*” no se encontró evidencia de partículas plásticas (Ciucă *et al.*, 2025). En conclusión, las aves marinas pueden confundir los plásticos con alimento por una combinación de factores que involucran tanto su biología como las características del entorno en el que habitan. Su sentido de la vista puede ser engañado por el aspecto, el color o el brillo de los plásticos flotantes, que muchas veces se asemejan a sus presas naturales como peces,



crustáceos y moluscos, y que al ser ingeridos provocan obstrucciones digestivas, desnutrición e intoxicaciones.

Ahora bien, como ya hemos mencionado, los MPs pueden encontrarse y afectar a una amplia gama de organismos marinos, desde una ballena (30 metros) hasta una sardina (10 centímetros). No obstante, es importante destacar que en el Golfo de California habitan, entre otros, numerosos organismos invertebrados, los cuales representan más del 95% de todas las especies animales conocidas. Estos invertebrados desempeñan un papel esencial en las redes tróficas, ya que sirven de alimento para diversas especies, y algunos de ellos tienen además un alto valor comercial al ser consumidos directamente por los seres humanos. Los moluscos bivalvos debido a que son organismos filtradores tienen potencial riesgo de contaminación por MPs, de hecho, un estudio realizado en la península de Baja California, en la costa del Pacífico de México, por Lozano-Hernández *et al.* (2021), demostró la presencia de MPs en cultivos de ostión, así como que, del total de las partículas plásticas encontradas en el sistema digestivo y otros órganos, el 93% eran fibras de tipo poliéster, poliacrilonitrilo y rayón (polímeros usados principalmente en la industria textil), estos valores de MPs son relativamente bajos en comparación con otros reportes de presencia de MPs en diferentes partes del mundo; lo cual sugiere que su consumo no representa un riesgo para la salud humana. No obstante, es importante continuar con los monitoreos ambientales y en organismos bivalvos.

Otro de los organismos del GC en los que se ha reportado la presencia de MPs es en el crustáceo, camarón blanco del Pacífico, en el cual se han encontrado partículas plásticas en tractos gastrointestinales, branquias y exoesqueletos tanto de camarones cultivados como silvestres. Valencia-Castañeda *et al.* (2022) reportaron MPs en camarones silvestres capturados en la laguna costera el Huizache Caimanero en el sureste del Golfo de California. Esta laguna recibe descargas rurales, semi-urbanas, agrícolas y acuícolas; las cuales pueden contribuir a que los MPs estén presentes en dicha región. Por su parte, Páez-Osuna *et al.* (2023) reportaron MPs en camarón blanco silvestre de la laguna Santa María-La Reforma en el Golfo de California, y encontraron que las concentraciones de MPs eran más bajas o comparables con las reportadas en otros crustáceos silvestres. También pudieron observar que los MPs ingeridos por estos crustáceos se acumulan principalmente en el tracto digestivo y en las branquias. Recientemente se demostró que las post-larvas y juveniles de camarón ingieren principalmente microfibras, especialmente aquellas de color transparente, azul y negro (Valencia-Castañeda *et al.*, 2024), por otro lado, los autores reflexionan acerca del uso de plásticos o membranas en los diferentes sistemas de cultivo (extensivos, semi-intensivos e intensivos), en donde la abundancia de MPs está estrechamente ligada al tipo de

sistema de cultivo o nivel de tecnificación, ya que el uso de plásticos son necesarios durante todo el proceso de cría, cultivo y cosecha (revestimientos de invernaderos, estanques, aireadores, alimentadores automáticos, bombas de agua y redes).

Finalmente, es importante abordar sobre los pequeños crustáceos que forman parte del zooplancton, los cuales habitan en casi todos los ambientes acuáticos del planeta (aguas dulces hasta los océanos más profundos) y que además son un eslabón clave en la cadena trófica ya que son alimento para peces, crustáceos y moluscos. Un estudio reciente en el Pacífico Central Mexicano demuestra la presencia de MPs en diferentes grupos taxonómicos de zooplancton, además que los fragmentos fueron los MPs más abundantes (54.2%), seguidos de fibras (34.2%) y esferas (11.4%), por otro lado, sugieren que las especies omnívoras tienen más probabilidades de ingerir MPs, posiblemente debido a su capacidad de flexibilidad en la búsqueda de alimento y a sus estrategias alimentarias oportunistas (Zavala-Alarcón *et al.*, 2023). En el GC, un estudio analizó la presencia e ingestión de MPs en copépodos adultos colectados de 2003 a 2016, los resultados indican que la ingestión de MPs no aumentó con el tiempo, sin embargo, indican que las microfibras transparentes fueron el color más abundante en los organismos (López-Mendoza *et al.*, 2025). Los copépodos son quizá los organismos marinos que más fácilmente ingieren MPs (Isinibilir *et al.*, 2020), siendo uno de los pasos más importantes en la transferencia de MPs a la cadena alimentaria, por otro lado, los copépodos responden a señales químicas, en especial al sulfuro de dimetilo (DMS), el cual es un compuesto volátil secretado por algunas algas y que actúa como indicador de la presencia de alimento. Procter *et al.* (2019), demostraron que los copépodos consumen hasta 3 veces más MPs cuando están impregnados de DMS simulando el olor de su alimento.

Microorganismos en microplásticos

Durante el transcurso de los párrafos anteriores, abordamos entre otras cosas el origen de los MPs, el cómo afectan a diversos organismos marinos, desde invertebrados hasta mamíferos marinos, cómo se integran a la cadena alimentaria y su potencial efecto en la biodiversidad y la salud de los ecosistemas marinos. Sin embargo, es transcendental señalar que los MPs interactúan con los microorganismos y sustancias químicas presentes en el medio marino (Tang, 2022), de hecho, los MPs, son un sustrato novedoso y favorable para la colonización de microorganismos (bacterias, diatomeas, hongos y virus) mediante la rápida formación de una biopelícula taxonómicamente distinta a la del agua circundante (Amaral-Zettler *et al.*, 2020), a esta asociación MPs-microorganismos, se le conoce como *plastisfera* (fig. 3). Así, el término *plastisfera* es utilizado para describir la vida asociada con los residuos plásticos en muchos entornos acuáticos y se puede definir



como el sistema ecológico resultante, caracterizado por diversos microorganismos que prosperan en una matriz plástica (Li et al., 2024). Reportes científicos indican que más de 1,000 especies diferentes de microbios son capaces de habitar un solo microplástico de 5 mm y que, además, la *plastisfera* puede actuar como medio de transporte de microorganismos e introducir especies invasoras a diferentes ecosistemas, esto debido a que favorece la supervivencia y viabilidad de los microbios (Stabnikova et al., 2021). Finalmente, es evidente la presencia de protozoarios (*Toxoplasma gondii*, *Cryptosporidium parvum* y *Giardia entérica*), bacterias (*Aeromonas salmonicida*, *V. campbelli*, *V. alginolyticus* y *V. coralliilyticus*) y virus (*Caudoviricetes*, *Herpesvirales*, *Poxvirus* y *Whispovirus*), patógenos asociados a MPs y que además son reconocidos por la Organización Mundial de la Salud y Organización Mundial de Sanidad Animal (Viršek et al., 2017; Zhang et al., 2022; Lacerda et al., 2024).

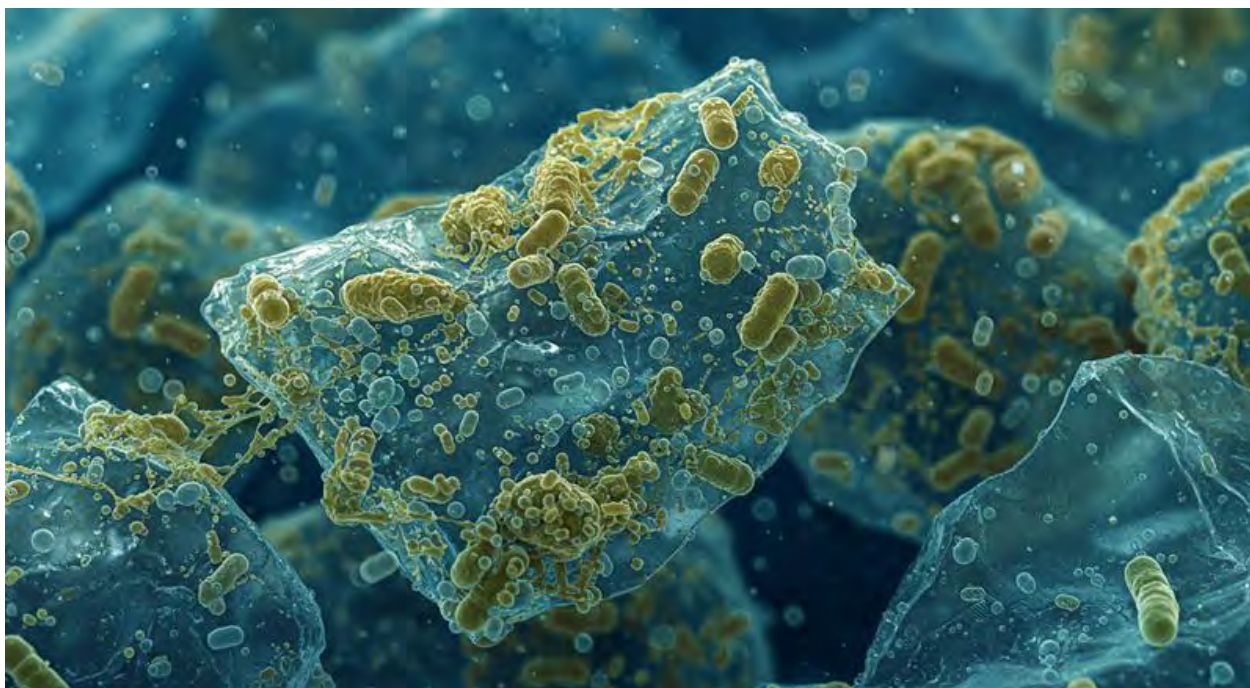


Figura 3. Representación de la plastisfera o colonización de microorganismos a microplásticos (imagen fue generada con el uso de ImageFx).

Consideraciones finales y perspectivas

Los mares reciben millones de toneladas de microplásticos y estudios del Golfo de California exponen la presencia de MPs en organismos marinos afectándolos fisiológicamente. Es necesario seguir analizando y monitoreando la presencia de MPs en sistemas costeros, así como en organismos silvestres y cultivados para consumo humano. Por otro lado, los MPs en el medio marino, al ser colonizados por microorganismos pueden actuar como vectores al introducir en los diferentes ecosistemas, especies invasoras o patógenas con potencial impacto en la salud humana y animal. Pese a su relevancia, como agentes contaminantes, tóxicos y vehículo de patógenos, se desconoce la diversidad y abundancia de microorganismos asociados a MPs (plastisfera), sin embargo, actualmente en el Laboratorio de Virología de la Unidad Hermosillo del CIBNOR, se están desarrollando investigaciones enfocadas en la caracterización de la diversidad, abundancia y papel ecológico de la plastisfera en Golfo de California mediante análisis metagenómico, además de evaluar la presencia, diversidad y abundancia de microorganismos potencialmente patógenos asociados a MPs y su impacto en la sanidad acuícola.

Agradecimientos

Agradecemos el apoyo y contribución proporcionada por el personal de la Unidad Hermosillo del CIBNOR, especialmente al Ing. Juan Vega Peralta, Rosa María Valenzuela, Ing. Rodolfo Barraza, Alfredo Barreras Torres y Estephanie Anaïd Santos Martínez.

Literatura citada

- Álvarez-Zeferino, J.C., S. Ojeda-Benítez, A.A. Cruz-Salas, C. Martínez-Salvador y A. Vázquez-Morillas. 2020. *Microplastics in mexican beaches*. Resources, Conservation and Recycling 155: 104633.
- Amaral-Zettler, L.A., E.R. Zettler y T.J. Mincer. 2020. *Ecology of the plastisphere*. Nature Reviews Microbiology 18: 139–151.



- Andrady, A.L. 2011. *Microplastics in the marine environment*. Marine Pollution Bulletin 62(8): 1596-1605.
- Arreola-Alarcón, I.M., H. Reyes-Bonilla, J.S. Sakthi, F. Rodríguez-González y M.P. Jonathan. 2022. *Seasonal tendencies of microplastics around coral reefs in selected Marine Protected National Parks of Gulf of California, Mexico*. Marine Pollution Bulletin 175: 113333.
- Basto, M.N., K.R. Nicastro, A.I. Tavares, C.D. McQuaid, M. Casero, F. Azevedo y G.I. Zardi. 2019. *Plastic ingestion in aquatic birds in Portugal*. Marine Pollution Bulletin 138: 19-24.
- Browne MA, P. Crump, S.J. Niven, E. Teuten, A. Tonkin, T. Galloway y R. Thompson. 2011. *Accumulation of microplastic on shorelines worldwide: sources and sinks*. Environmental Science Technology 45(21): 9175-9.
- Calmus, T., A. Burquez y A. Martinez-Yrizar. 2017. *El Golfo de California: un océano joven, región megadiversa, vínculo entre tectónica y ecología*. Cienc. UANL(85): 59-64.
- Castro, R., C.A. Collins, T.A. Rago, T. Margolina y L.F. Navarro-Olache. 2017. *Corrientes, transportes y variabilidad termohalina en la entrada al golfo de California (19-21 de abril de 2013)*. Ciencias Marinas 43(3): 173-190.
- Ciucă, A., M. Manea, L. Barbeș y E. Stoica. 2025. *Marine birds' plastic ingestion: a first study at the Northwestern Black Sea coast*. Estuarine Coastal and Shelf Science 313: 109032.
- CONAPESCA. 2020. Anuario Estadístico de Acuacultura y Pesca. Comisión Nacional de Acuacultura y Pesca. Mazatlán, Sinaloa, México. 287 pp.
- Cook S., H.L. Chan, S. Abolfathi, G.D. Bending, H. Schäfer y J.M. Pearson. 2020. *Longitudinal dispersion of microplastics in aquatic flows using fluorometric techniques*. Water Research 170: 115337.
- Coria, E. y J. Ventura. 2007. *Área de protección de flora y fauna islas del Golfo de California*. Gaceta Informativa No. 20.
- Cruz-Salas, A.A., J.C. Alvarez-Zeferino, J. Tapia-Fuentes, S.L.D. Lobato-Rocha, A. Vázquez-Morillas, S. Ojeda-Benítez y S.E. Cruz-Sotelo. 2023. *Presence of Microplastics in the Vaquita Marina Protection Zone in Baja California, Mexico*. Microplastics 2(4): 422-436.
- Eriksen, M., L.C.M. Lebreton y H.S Carson. 2014. *Plastic pollution in the world's oceans: More than 5 trillion plastic pieces weighing over 250,000 tons afloat at sea*. PLoS One 9(12): e111913.

- Escalante-Almazán, F.I., J.E. Valdéz-Holguín, S. Álvarez-Borrego y J.R. Lara-Lara. 2013. *Temporal and spatial variation of sea surface temperature, chlorophyll a, and primary productivity in the Gulf of California*. Ciencias Marinas 39(2): 85-97.
- FAO. 2024. *El estado mundial de la pesca y la acuicultura*. FAO. Roma, Italia. 278 pp.
- Haque, M.K, M. Uddin y T. Kormoker. 2023. *Occurrences, sources, fate and impacts of plastic on aquatic organisms and human health in global perspectives: What Bangladesh can do in future?* Environmental Geochemistry and Health 45: 5531-5556.
- Hossain, M.U., S.T Ng, y Y. Dong. 2021. *Strategies for mitigating plastic wastes management problem: A lifecycle assessment study in Hong Kong*. Waste Management 131: 412-422.
- Isinibilir, M., L. Svetlichny, T. Mykitchak, E.E. Türkeri , K.M. Eryalçın, O. Doğan, G. Can, E. Yüksel y A.E. Kideys. 2020. *Microplastic Consumption and Its Effect on Respiration Rate and Motility of Calanus helgolandicus From the Marmara Sea*. Frontiers in Marine Science 7: 603321.
- Lacerda, A.L., J.F. Briand, V. Lenoble, E.Q. Oreste, F. Kessler, y M.L. Pedrotti. 2024. *Assessing the Plastisphere from Floating Plastics in the Northwestern Mediterranean Sea, with Emphasis on Viruses*. Microorganisms 12(3): 444.
- Li, C., M. R. Gillings, C. Zhang, Q. Chen, D. Zhu, J. Wang, K. Zhao, Q. Xu, P. H. Leung, X. Li, J. Liu y L. Jin. 2024. *Ecology and risks of the global plastisphere as a newly expanding microbial habitat*. The Innovation 5(1): 100543.
- López-Mendoza, D., E. Coria-Monter, M.A. Monreal-Gómez, E. Durán-Campos, D.A. Salas de Leon, A. Montoya-Melgoza y F. Rocha-Díaz. 2025. *Microplastic ingestion by copepods in a coastal environment of the Gulf of California, Mexico*. Latin American Journal of Aquatic Research 53(3): 400-410.
- López-Velázquez, K., K.G. Duque-Olivera, D.A. Santiago-Gordillo, E.R. Hoil-Canul, J.L. Guzmán-Mar, M. Villanueva-Rodríguez, J.G. Ronderos-Lara, C. Castillo-Quevedo y J.L. Cabellos-Quiroz. 2024. *Microplastics on sandy beaches of Chiapas, Mexico*. Regional Studies in Marine Science 70: 103381.
- Lozano-Hernández, E.A., N. Ramírez-Álvarez, L.M. Rios-Mendoza, J.V. Macías-Zamora, J.L. Sánchez-Osorio y F.A. Hernández-Guzmán. 2021. *Microplastic concentrations in cultured oysters in two seasons from two bays of Baja California, Mexico*. Environmental Pollution 290: 118031.
- Mishra, S., C.C Rath y A.P. Das. 2019. *Marine microfiber pollution: A review on present status and future challenges*. Marine Pollution Bulletin 140: 188-197.



- Ortega-Borchardt, J.A., N. Ramírez-Álvarez, L.M. Rios-Mendoza, J.P. Gallo-Reynoso, I.D. Barba-Acuña, J. García-Hernández, J. Égido-Villarreal y T. Kubenik. 2023. *Detection of microplastic particles in scats from different colonies of California sea lions (Zalophus californianus) in the Gulf of California, Mexico: A preliminary study*. Marine Pollution Bulletin 186: 114433.
- Páez-Osuna, F., G. Valencia-Castañeda, O. Rodríguez-Valenzuela y M. G. Frías-Espiricueta. 2023. Microplastics and heavy metals in shrimp *Litopenaeus vannamei* from the SAMARE lagoon, Gulf of California: Is it a case of combined MP's-Zn pollution in gills? Environmental pollution 336: 122479.
- Páez-Osuna, F., S. Álvarez-Borrego, A.C. Ruiz-Fernández, J. García-Hernández, M.E. Jara-Marini, M.E. Bergés-Tiznado, A. Piñón-Gimate, R. Alonso-Rodríguez, M.F. Soto-Jiménez, M.G. Frías-Espiricueta, J.R. Ruelas-Inzunza, C.R. Green-Ruiz, C.C. Osuna-Mrtínez y J.A. Sanchez-Cabeza. 2017. *Environmental status of the Gulf of California: a pollution review*. Earth-Science Reviews 166: 181-205.
- Pinho, I., F. Amezcua, J.M. Rivera, C. Green-Ruiz, T.J. Piñón-Colin y F. Wakida. 2022. *First report of plastic contamination in batoids: Plastic ingestion by Haller's Round Ray (Urobatis halleri) in the Gulf of California*. Environmental Research 211: 113077.
- Procter, J., F.E. Hopkins, E.S. Fileman y P.K. Lindeque. 2019. *Smells good enough to eat: Dimethyl sulfide (DMS) enhances copepod ingestion of microplastics*. Marine Pollution Bulletin 138: 1-6.
- Rios-Mendoza, L.M., J.F. Ontiveros-Cuadras, D. Leon-Vargas, A.C. Ruiz-Fernández, M. Rangel-García, L.H. Pérez-Bernal y J.A. Sanchez-Cabeza. 2021. *Microplastic contamination and fluxes in a touristic area at the SE Gulf of California*. Marine Pollution Bulletin 170: 112638.
- Salazar-Pérez, C., F. Amezcua, A. Rosales-Valencia, L. Green, J.E. Polloreña-Melendrez, M.A. Sarmiento-Martínez, I. Tomita-Ramírez, B.D. Gil-Manrique, M.Y. Hernandez-Lozano, V.M. Muro-Torres, C. Green-Ruiz, T.D.J. Piñon-Colin, F.T. Wakida y M. Barletta. 2021. *First insight into plastics ingestion by fish in the Gulf of California, Mexico*. Marine Pollution Bulletin 171: 112705.
- Sánchez-Paz, A., T. Encinas-García, L. Ávila-Félix y F. Mendoza-Cano. 2025. *Microplastics in surface waters surrounding a touristic beach at the Gulf of California, Mexico*. International Journal of Environmental Health Research 1-12.
- Sans-Aguilar, C.A. 2018. *El Golfo de California en su totalidad como aguas interiores o territoriales mexicanas*. Revista del Centro de Estudios Superiores Navales 39(1): 95-126.

- Stabnikova, O., V. Stabnikov, A. Marinin, M. Klavins, L. Klavins y A. Vaseashta. 2021. *Microbial Life on the Surface of Microplastics in Natural Waters*. Applied Sciences 11(24): 11692.
- Tang, K.H.D. 2022. *Abundance of Microplastics in Wastewater Treatment Sludge*. Journal of Human, Earth and Future. 3: 138–146.
- Valencia-Castañeda, G., J.A. Medina-López, M.G. Frías-Espericueta y F. Páez-Osuna. 2024. *Farmed stage (age)-dependent accumulation and size of microplastics in Litopenaeus vannamei shrimp reared in a super-intensive controlled system*. Science of The Total Environment 918: 170575.
- Valencia-Castañeda, G., K. Ibáñez-Aguirre, U. A. Rebolledo, M. V. Capparelli y F. Páez-Osuna. 2022. *Microplastic contamination in wild shrimp Litopenaeus vannamei from the Huizache-Caimanero Coastal lagoon, SE Gulf of California*. Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology 109: 425–430.
- Viršek, M.K., M.N. Lovšin, Š. Koren, A. Kržan y M. Peterlin. 2017. *Microplastics as a vector for the transport of the bacterial fish pathogen species Aeromonas salmonicida*. Marine Pollution Bulletin 125(1-2): 301-309.
- Zantis, L.J., L.E. Carroll, S.E. Nelms y T. Bosker. 2021. *Marine mammals and microplastics: A systematic review and call for standardization*. Environmental Pollution 269: 116142.
- Zavala-Alarcón, F.L., J.P. Huchin-Mian, M.P. González-Muñoz y E.R. Kozak. 2023. *In situ microplastic ingestion by neritic zooplankton of the central Mexican Pacific*. Environmental Pollution 319: 120994.
- Zhang, E., M. Kim, L. Rueda, C. Rochman, E. VanWormer, J. Moore y K. Shapiro. 2022. *Association of zoonotic protozoan parasites with microplastics in seawater and implications for human and wildlife health*. Scientific Reports 12: 6532.

**Cita**

Enríquez Espinoza, T., A. Sánchez-Paz, T. Encinas García y F. Mendoza Cano. Microplásticos: La contaminación silente que amenaza al Golfo de California. Recursos Naturales y Sociedad, 2025. Vol. 11 (3): 133-148. <https://doi.org/10.18846/renaysoc.2025.11.11.03.0008>

Sometido: 12 de agosto de 2025

Aceptado: 10 de noviembre de 2025

Editora asociada: Dra. Crisalejandra Rivera Pérez

Editora ejecutiva: Dra. Crisalejandra Rivera-Pérez

Diseño gráfico editorial: Ing. Francisca Elizabeth Villegas Carrazco

**Shrimp shells and heads:
A source of chitosan with potential use in the food industry**

**Cáscaras y cabeza de camarón:
Fuente de quitosano con uso potencial
en la industria alimentaria**

**Cynthia Esmeralda Lizárraga Velázquez¹, Amada Yerén Escobedo-Lozano¹,
Jazmín Crucita Hernández Ruíz¹, José Reyes Valdés Díaz^{1*}**

Resumen

Las cáscaras y cabezas de camarón representan un foco de contaminación ambiental, pero a su vez son fuentes importantes de quitosano. El quitosano es un biopolímero reconocido por su propiedad antimicrobiana y su capacidad para mitigar los efectos negativos causados por la obesidad y la diabetes. La propiedad antimicrobiana del quitosano está relacionada con la capacidad del biopolímero para inhibir el crecimiento de hongos y bacterias. Dicha propiedad es aprovechada para preservar alimentos perecederos mediante la prolongación de su vida útil. En cambio, la capacidad de mitigar los efectos negativos causados por la obesidad y la diabetes se relaciona con sus efectos hipoglucémico (disminución de azúcar en sangre) e hipolipidémico (disminución de lípidos en sangre). Por ello, el quitosano se ha usado como un suplemento alimenticio en humanos y modelos animales con problemas de obesidad y diabetes. Sin duda, la revalorización de las cáscaras y cabezas de camarón para la obtención de quitosano permitiría la obtención de productos de alto valor agregado y mejoras en las condiciones ambientales. Por lo tanto, el aprovechamiento de residuos de camarón como fuente de quitosano tiene como propósitos reducir la contaminación ambiental que provoca su desperdicio, ofrecer una alternativa sustentable para preservar alimentos agrícolas y de origen animal, y contribuir al bienestar de pacientes con problemas de diabetes y/u obesidad.

¹Tecnológico Nacional de México. Instituto Tecnológico de Mazatlán. Corsario 1, 203 Urías, CP 82070, Ciudad de Mazatlán Sinaloa, México.

* Autor de correspondencia: jose.vd@mazatlan.tecnm.mx



En este trabajo, se describen brevemente algunos estudios sobre las principales aplicaciones del quitosano como película (recubrimiento) comestible en la preservación de frutas y carnes, así como algunos estudios sobre el efecto del consumo de quitosano sobre los niveles de lípidos, glucosa e insulina en sangre de ratones y humanos con diabetes y/u obesidad.

Palabras clave: Antimicrobiano, antidiabético, quitosano, camarón, vida útil.

Abstract

Shrimp shells and heads represent a source of environmental contamination, but they are also important sources of chitosan. Chitosan is a biopolymer recognized for its antimicrobial properties and ability to mitigate the adverse effects caused by obesity and diabetes. Chitosan's antimicrobial properties are related to the biopolymer's ability to inhibit the growth of fungi and bacteria. This property is related to preserving perishable foods by extending their shelf life. In contrast, its ability to mitigate the adverse effects caused by obesity and diabetes is related to its hypoglycemic (lowered blood sugar) and hypolipidemic (lowered blood lipid) effects. Hence, chitosan has been used as a dietary supplement in humans and animal models with obesity and diabetes. Undoubtedly, the revaluation of shrimp shells and heads for producing chitosan would allow for the production of high-value-added products and improved environmental conditions. Therefore, using shrimp waste as a source of chitosan aims to reduce environmental pollution caused by its waste, offer a sustainable alternative for preserving agricultural and animal-based foods, and contribute to the well-being of patients with diabetes and/or obesity. This paper briefly describes some studies on the main applications of chitosan as an edible film (coating) in the preservation of fruits and meats, as well as studies on the effect of chitosan consumption on blood lipid, glucose, and insulin levels in mice and humans with diabetes and/or obesity.

Keywords: Antimicrobial, antidiabetic, chitosan, shrimp, shelf life.

Antecedentes

Producción de residuos

En México la producción de camarón tanto de altamar como de acuicultura osciló en 227,000 toneladas en 2023, lo que ubicó al país en el segundo lugar de producción de camarón en Latinoamérica después de Ecuador con una producción de 1.2 millones de toneladas. En México, el estado de Sinaloa ocupa el primer lugar en la lista de productores de camarón. Este producto alimenticio de gran valor nutritivo es vendido en diferentes presentaciones (congelado entero, congelado sin cabeza, empanizado con o sin cabeza, fresco con o sin cabeza) y consumido por la población en diversos platillos, ya sea completo o pelado. Durante todo el procesamiento del camarón, es decir desde su captura hasta su consumo se generan residuos (cáscaras y cabezas) de entre el 50 y el 60% del peso total del camarón. Si se considera una producción de camarón anual en aumento superior a las 227,000 toneladas, la cantidad de residuos generados equivaldría a más de 136,200 toneladas anuales que no son aprovechados en su totalidad. Generalmente los residuos de camarón son descartados al mar por las propias embarcaciones, depositados en contenedores de basura (Ver Figura 1) hasta su llegada a rellenos sanitarios o incinerados. El descarte de los residuos genera problemas de contaminación ambiental, por ejemplo, 1 kg de residuos de camarón produce alrededor de 0.781.9 kg equivalentes de CO₂ (gas de efecto invernadero) (Chang *et al.* 2017) y esta cifra puede ser mayor si los residuos van al mar o son incinerados, por ello, es imperante que estos sean aprovechados. Al respecto, los residuos de camarón han sido aprovechados como aditivos en la formulación de alimentos para el sector agropecuario, ya que estos residuos son fuente importante de proteínas, lípidos, minerales y polisacáridos (azúcares no digeribles) (Ver Figura 2). Los polisacáridos se encuentran entre las biomoléculas más importantes. La quitina es un polisacárido estructural y es la segunda biomolécula más abundante después de la celulosa. A partir de la quitina se obtiene quitosano, el cual es biodegradable y biocompatible con los organismos vivos, incluyendo al humano, y se puede consumir sin riesgo alguno.



Figura 1. Residuos de camarón depositados en contenedores de basura.



Figura 2. Composición de los residuos de camarón y aplicaciones del quitosano.

Producción de quitosano

La quitina que de manera natural forma parte de la cáscara y cabeza de camarón se hace reaccionar químicamente para obtener el quitosano cuyo nombre químico es poli [β -(1-4)-2-amino-2-desoxi-D-glucopiranos] y dependiendo del método de extracción se tienen características fisicoquímicas específicas que definen su aplicación. Los métodos para su obtención, que existen son: el método químico y el biológico (Ortega Cardona y Aparicio Fernández, 2020). El método químico es un método convencional y el mayormente utilizado por su alto rendimiento, el cual consiste en secar y licuar los residuos de camarón para obtener partículas pequeñas, que luego se hacen reaccionar con soluciones de ácido clorhídrico diluido para eliminar minerales, posteriormente con soluciones básicas de hidróxido de sodio diluidas para eliminar proteínas y finalmente se hacen reaccionar con solución de hidróxido de sodio concentrado para la obtención de quitosano. Las reacciones anteriores se llevan a cabo a temperaturas entre 75 – 120 °C, con agitación constante. En cada una de las reacciones, los residuos de camarón se lavan con agua destilada para eliminar los ácidos y álcalis utilizados (agua residual). Cabe aclarar que el agua residual que se genera en el proceso de obtención del quitosano es un foco de contaminación ambiental. Por ello, en el Instituto Tecnológico de Mazatlán se adicionó una etapa de tratamiento de agua residual al proceso de obtención de quitosano. Esto con el propósito de purificar el agua residual y utilizarla nuevamente en el proceso de extracción de quitosano y convertir el método químico en un proceso cerrado y sustentable (método químico verde) (Escobedo-Lozano y Quiñones-Osuna, 2017).

Existen otros métodos alternativos para la obtención de quitosano que se han desarrollado a nivel de laboratorio para minimizar el uso de químicos. Por ejemplo, los métodos biológicos que pueden ser de dos tipos: los microbiológicos y los enzimáticos. En los primeros se utilizan fermentaciones con microorganismos para separar los minerales y proteínas y así obtener la quitina. En los enzimáticos se utilizan diversas enzimas para la eliminación de los nutrientes mencionados anteriormente (Tabla 1). Sin embargo, para la obtención de quitosano en ambos métodos se utilizan álcalis, por lo que no están exentos de utilizar químicos. Además, estos métodos no se han podido escalar a nivel industrial, a diferencia del método convencional, ya que tanto las enzimas como los microorganismos requieren de muchos cuidados, equipamiento costoso, personal calificado; además, las fermentaciones son muy largas y el rendimiento es bajo (Rossi *et al.* 2024).

**Tabla 1.** Microorganismos y enzimas utilizados en los métodos biológicos.

Métodos biológicos		Referencia
Microorganismos	<i>Lactobacillus plantarum</i> , <i>pentosus</i> y <i>helveticus</i> , <i>pseudomonas aeuroginosa</i> , <i>bacillus subtilis</i> , <i>cereus</i> y <i>lactis</i> , probióticos naturales, bacterias ácido-lácticas como <i>pediococcus acidilactic</i> , <i>exiguobacterium acetylicum</i> .	Lizárraga-Velázquez et al. 2025
Enzimas	Dispasa, alcalasa, bromelina, proteasas digestivas, enzimas endógenas, tripsina, papaína y pepsina.	Lizárraga-Velázquez et al. 2025

El quitosano, al ser un producto inocuo, se ha convertido en una molécula bioactiva prometedora en los diversos sectores industriales como el farmacéutico, agrícola, textil, cosmético, ambiental y alimentario. En este último sector, el quitosano tiene potencial para ser usado en la preservación de alimentos. Múltiples investigaciones demuestran que la fabricación de películas de quitosano, como recubrimiento comestible de alimentos perecederos, prolonga la vida útil de estos a través de su propiedad antimicrobiana. Además, también se ha demostrado que el quitosano presenta propiedades antiobesogénica y antidiabética al utilizarlo como suplemento alimenticio en animales y humanos.

Aplicaciones del quitosano en la preservación de alimentos

El quitosano es un polímero capaz de prolongar la vida útil de algunos alimentos altamente perecederos. La capacidad de prolongar la vida útil de los alimentos se debe a su capacidad para inhibir el crecimiento de hongos y bacterias en los alimentos. Los efectos del quitosano sobre el crecimiento fúngico y bacteriano se pueden atribuir a su carácter catiónico (carga positiva), donde los grupos amino libres, con carga positiva en medio ácido, interactúan con los residuos negativos de las macromoléculas expuestas en la pared celular fúngica y bacteriana. Todo esto modifica la permeabilidad de la membrana plasmática de hongos y bacterias y en consecuencia altera sus principales funciones, como la eliminación de desechos y la entrada de nutrientes a la célula,

inhibiendo así el crecimiento y el desarrollo de estos microorganismos (Luo *et al.* 2023; Ramos-Guerrero *et al.* 2020).

Preservación de productos cárnicos

La carne es importante en la dieta humana pues aporta nutrientes esenciales como proteínas, aminoácidos esenciales, vitaminas (principalmente del complejo B), minerales y grasas, que son necesarios para el buen funcionamiento del cuerpo humano y preservación de la salud. Información nacional, demuestra que las carnes de pollo, de res y de cerdo son las carnes preferidas por los consumidores mexicanos, por ejemplo, se estima que un mexicano consume alrededor de 27.8 kg de carne de pollo, 17.7 kg de carne de res y 18 kg de carne de cerdo por año. Los nutrientes que poseen los tres tipos de carnes benefician la nutrición de los consumidores, y a su vez son estos mismos los que convierten a las carnes en alimentos altamente perecederos a 1) la contaminación bacteriana (bacterias que encuentran en la carne los nutrientes para crecer); 2) la oxidación de grasas por contacto con el oxígeno ambiental (causa del sabor rancio) y 3) la acción de enzimas (degradación de nutrientes) propias de la carne. El deterioro de la carne por los factores anteriores causa la aparición de olores y sabores extraños e indeseables, que provocan que la carne sea un producto inaceptable por los consumidores e incluso, un problema de salud pública. Por lo tanto, el uso de tecnologías inocuas (seguras para la salud) que eviten el deterioro de la carne mediante la inhibición del crecimiento microbiano son fundamentales.

El quitosano es un biopolímero natural, biocompatible, biodegradable e inocuo, que recientemente ha sido usado como película y recubrimiento comestible en combinación con otras tecnologías o sustancias para preservar el deterioro de las carnes de pollo, de res y de cerdo (Ver Figura 3). Por ejemplo, Duran y Kahve (2020) demostraron que la aplicación de una película comestible de quitosano sobre la carne de res y el posterior envasado al vacío por un periodo de almacenamiento de 45 días a 4 °C, inhibieron el aumento de los recuentos de bacterias mesófilas aerobias totales (microorganismos que crecen en presencia de oxígeno a temperaturas entre 20 y 45 °C) y bacterias acidolácticas; así como también inhibieron por completo el crecimiento de la bacteria *Staphylococcus aureus* (bacteria causante de intoxicación alimentaria) y la formación de productos que causan rancidez (descomposición de grasas). Dong *et al.* (2025) reportaron que el uso de un recubrimiento con una película de quitosano modificado con la unión de lisina (aminoácido) en su estructura, previene el deterioro de la carne de pollo mediante la inhibición del crecimiento de bacterias patógenos (bacterias que causan daño a la salud al ser consumidas) y el incremento de la comunidad de bacterias benéficas en condiciones de almacenamiento de 4 °C por 8 días. Además,



se ha reportado que el uso de una película de quitosano con adición de un péptido (fragmentos de proteína de 2-10 aminoácidos) antimicrobiano, preserva la vida útil de la carne de cerdo mediante la conservación de su frescura, la inhibición del crecimiento de bacterias patógenas (*Escherichia coli* y *S. aureus*), el retraso de la oxidación de grasas y de la percepción de olores desagradables en condiciones de almacenamiento de 4 °C por 20 días (Luo et al. 2023).



Figura 3. Aplicación del quitosano como recubrimiento para la conservación de carnes y frutas.

Preservación de frutas

En los últimos años, han surgido cambios en las tendencias alimentarias, ya sea por salud, cuidado del medio ambiente o exigencias en los estereotipos físicos a cumplir; motivos por los cuales las personas incluyen en su alimentación a las frutas; por lo que su demanda ha ido en aumento. Las frutas al igual que los productos cárnicos son ricos en nutrientes, lo que las convierte en alimentos susceptibles a patógenos (bacterias y/o hongos que pueden causar intoxicación alimentaria) que causan la pudrición de ésta. Por lo tanto, la corta vida útil de las frutas, aunado a las pérdidas pre y postcosecha (frutas que se pierden por deterioro durante la cosecha, transporte, almacenamiento y comercialización) representan pérdidas económicas entre el 30 y 50% del total de los costos de producción, lo que se traduce en problemas económicos para los productores de frutas (Bautista-Baños et al. 2017). Por ello, es fundamental encontrar alternativas que ayuden a prolongar la vida útil y reducir las pérdidas pre y postcosecha de las frutas por causa del deterioro. Al respecto, se ha hecho uso de desinfectantes o insecticidas. Sin embargo, el uso de productos químicos sintéticos es criticado debido a que su consumo es considerado no seguro (peligroso para la salud) (OMS, 2022). Actualmente diversas investigaciones muestran que el uso de productos naturales como el quitosano para alargar la vida útil de las frutas es una alternativa prometedora.

El quitosano se ha utilizado con éxito para preservar la fresa y algunas frutas tropicales (Ver Figura 3). Por ejemplo, el recubrimiento de quitosano modificado con la unión de ácido fumárico (agente antibacteriano y potente antioxidante) en su estructura y aplicado en fresas almacenadas a 10 °C por 8 días, reduce la pérdida de peso de la fruta (pérdida de agua como indicador de calidad) y el porcentaje de las frutas deterioradas, mediante la inhibición del crecimiento de bacterias mesófilas aerobias totales y de hongos y levaduras (Khan *et al.* 2019). Además, el quitosano también se ha usado en la prolongación de la vida útil de frutas tropicales como el plátano, la guanábana y el mango. Por ejemplo, algunos investigadores (Castañeda-Ramírez *et al.* 2016; Bautista-Baños *et al.* 2017) han reportado que el recubrimiento de quitosano evita la proliferación de hongos causantes de la pudrición de las frutas durante la postcosecha. López-Mora *et al.* (2013) reportaron que el uso de recubrimiento comestible de quitosano reduce en un 50% la extensión de la enfermedad del mango Tommy Atkins (conocida como mancha negra), causada por el hongo *Alternaria alternata*, mediante la inhibición de su crecimiento, germinación y esporulación, en condiciones de almacenamiento a 12 °C por 15 días. Por otra parte, Ramos-Guerrero *et al.* (2020) demostraron que la aplicación de una película de quitosano a guanábanas inhibe completamente el crecimiento del hongo *Collectotricum gloeosporioides*, causante de la enfermedad antracnosis (mancha negra causante de la pudrición de la guanábana), y reduce la pérdida de peso de la fruta. Asimismo, Uscocovich-Álvarez *et al.* (2024) indicaron que el recubrimiento comestible de quitosano en plátanos reduce el crecimiento de hongos y levaduras, mejorando la luminosidad de las cáscaras de plátano (indicador de calidad). Además, un estudio reciente señaló que el recubrimiento basado en quitosano, en combinación con cera de abeja y glicerol, preserva las características físicas (color) y fisiológicas (pérdida de peso y firmeza de la fruta) de la uchuva, almacenada durante 15 días a temperatura ambiente (Vaca Portillo y Osorio Mora, 2023).

Aditivo funcional

Recientemente, se ha reportado que el quitosano juega un papel importante en la mitigación de los efectos negativos que desencadenan la obesidad y la diabetes. La obesidad es un problema crónico caracterizado por el exceso de grasa corporal debido a la acumulación de grasa en el tejido y la disminución del gasto energético. Se considera una verdadera epidemia del siglo XXI, con un aumento en la demanda de atención médica. Una de las complicaciones más graves de la obesidad es la resistencia a la insulina (hormona que ayuda a la captación y control del azúcar en la sangre), ya que está directamente relacionada con la aparición de diabetes tipo 2 (altos niveles de azúcar en la sangre) (Lizárraga-Velázquez *et al.* 2020).



Los principales tratamientos para pacientes diabéticos son los cambios en el estilo de vida y la administración de fármacos como metformina y, si es necesario, inyecciones de insulina. Estos tratamientos suelen ser costosos, por lo tanto, los pacientes diabéticos a menudo incorporan plantas medicinales o sus tés como complemento a la metformina. Esto ha generado un creciente interés en la búsqueda de compuestos naturales como posibles agentes antidiabéticos. Al respecto, Wang *et al.* (2017) indicaron que la suplementación dietética de quitosano disminuye los niveles de lípidos en la sangre y lípidos oxidados en el hígado de ratones con hiperlipidemia (exceso de grasa en sangre). Por otra parte también se ha reportado que el uso de quitosano como suplemento alimenticio inhibe la necrosis (muerte) de células cardíacas en ratas diabéticas (Amiri *et al.* 2022). Estudios en humanos han revelado que el consumo de quitosano por al menos 13 semanas reduce los niveles de glucosa en sangre en ayunas y la hemoglobina glucosilada (nivel promedio de glucosa en sangre en los últimos 2-3 meses) en pacientes obesos y con diabetes (Guo *et al.* 2020). Por lo tanto, el interés de la industria de alimentos por la producción de quitosano como aditivo alimentario ha incrementado en los 5 últimos años. En este sentido, el laboratorio de moléculas bioactivas del Instituto Tecnológico de Mazatlán desarrolló una tortilla de maíz suplementada con espirulina *Arthrospira platensis* (microalga vendida en el mercado como suplemento dietético y considerada como un superalimento) y quitosano, extraído de cáscaras y cabezas de camarón con potencial antidiabético. Actualmente, el análisis de la determinación del efecto antidiabético de la tortilla fortificada con quitosano se encuentra en proceso. Sin duda, la producción de quitosano ha ido en aumento debido a sus múltiples propiedades. Sin embargo, la información disponible sobre la aplicación de éste como aditivo alimentario es limitada.

Consideraciones finales y perspectivas

El quitosano es un biopolímero que puede extraerse de las cáscaras y cabezas de camarón (bajo o nulo costo, debido a que se consideran como basura) mediante un método químico verde sencillo (proceso químico amigable con el medio ambiente descrito en este trabajo). La adopción de dicho método de extracción y la aplicación posterior del quitosano como recubrimiento de frutas podría ser una opción prometedora, tanto para productores agrícolas, como para aquellas personas que comercializan la fruta en pequeños o grandes establecimientos, con el propósito de reducir o evitar el crecimiento de hongos o bacterias, aumentando así su vida en anaquel. Por otra parte, el uso del quitosano como aditivo alimentario en la elaboración de alimentos convencionales adicionados con

este biopolímero, requiere de estudios clínicos en humanos. No obstante, al ser el quitosano un compuesto inocuo (seguro de consumir) representa una opción segura como aditivo alimentario o incluso como suplemento alimenticio para pacientes diabéticos y con obesidad. No obstante, es importante que los pacientes mencionados que deseen usar el quitosano como suplemento alimenticio lleven una dieta saludable e incluyan el ejercicio en su vida diaria. Cabe resaltar que el quitosano al igual que otros compuestos bioactivos (compuestos que ofrecen beneficios a la salud de los consumidores), por sí solos no pueden combatir una enfermedad o usarse como sustitutos de medicamentos.

Agradecimientos

Los autores agradecen al Tecnológico Nacional de México por el financiamiento del proyecto “Potencial antioxidante y antidiabético de tortillas de maíz fortificadas con quitosano y espirulina” (Clave 19925.24-P), del cual derivó este estudio.

Literatura citada

- Amiri, H., M. Aghbashlo, M. Sharma, J. Gaffey, L. Manning, S. Masoud, M. Basri, J.F. Kennedy, V.K. Gupta y M. Tabatabaei. 2022. *Chitin and chitosan derived from crustacean waste valorization streams can support food systems and the UN Sustainable Development Goals*. Nature Food 3 (10): 822-828. <https://doi.org/10.1038/s43016-022-00591-y>
- Bautista-Baños S., R.I. Ventura-Aguilar, Z. Correa-Pacheco, y M.L. Corona-Rangel. 2017. *Quitosano: un polisacárido antimicrobiano versátil para frutas y hortalizas en poscosecha - una revisión*. Revista Chapingo. Serie Horticultura 23 (2): 103-122. <https://doi.org/10.5154/r.rchsh.2016.11.030>
- Castañeda-Ramírez, J.C., V. Laurel-Ángeles, J. Espinoza-Zamora, R. Salcedo-Hernández, M. López-Ramírez, y N. De la Fuente-Salcido. 2016. *Efecto del quitosano para el biocontrol de hongos fitopatógenos identificados molecularmente de frutas y hortalizas en Guanajuato*. Investigación y Desarrollo en Ciencia y Tecnología de Alimentos 1(2): 207-213.



- Chang, C. C., K. C. Chang, W. C. Lin y M. H. Wu. 2017. *Carbon footprint analysis in the aquaculture industry: Assessment of an ecological shrimp farm*. Journal of Cleaner Production, 168, 1101-1107. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.09.109>
- Dong, B., Y. Wang, L. Han, G. Cui, Y. Lin, Z. Su, y G. Zhao. 2025. *Preparation, characterization and antimicrobial properties of double lysine-modified chitosan and its preservation ability in chicken meat refrigeration*. Food Chemistry 479: 143787. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2025.143787>
- Duran, A. y H.I. Kahve. 2020. *The effect of chitosan coating and vacuum packaging on the microbiological and chemical properties of beef*. Meat Science 162: 107961. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2019.107961>
- Guo, W., L. Yi, B. Zhou, y M. Li. 2020. *Chitosan modifies glycemic levels in people with metabolic syndrome and related disorders: meta-analysis with trial sequential analysis*. Nutrition Journal 19(1): 130. <https://doi.org/10.1186/s12937-020-00647-4>
- Khan, I., C.N. Tango, R. Chelliah y D.H. Oh. 2019. *Development of antimicrobial edible coating based on modified chitosan for the improvement of strawberries shelf life*. Food Science and Biotechnology 28(4): 1257-1264. <https://doi.org/10.1007/s10068-018-00554-9>
- Lizárraga-Velázquez, C.E., N. Leyva-López, C. Hernández, E.P. Gutiérrez-Grijalva, J.A. Salazar-Leyva, I. Osuna-Ruiz, E. Martínez-Montaña, J. Arrizon, A. Guerrero, A. Benitez-Hernández y A. Ávalos-Soriano. 2020. *Antioxidant molecules from plant waste: extraction techniques and biological properties*. Processes 8(12): 1566. <https://www.mdpi.com/2227-9717/8/12/1566>
- Lizárraga-Velázquez, C.E., Ovando-Martínez, M. Hernández, C. Benitez-Hernández, A. y Cabanillas-Bojórquez, L.A. 2025. *Bioactive compounds extraction from marine animals by biotechnology process*. pp. 69-89. En: Heredia, J.B., Gutiérrez-Grijalva, E.P. y Cabanillas-Bojórquez, L.A. (Eds.). Bioactive compounds extraction from marine resources and wastes. Springer Nature. Singapur. 277 pp. https://doi.org/10.1007/978-981-96-1253-6_4
- López-Mora, L. I., P. Gutiérrez-Martínez, S. Bautista-Baños, L.F. Jiménez-García y H. A. Zavaleta-Mancera. 2013. *Evaluación de la actividad antifúngica del quitosano en Alternaria alternata y en la calidad del mango 'Tommy Atkins' durante el almacenamiento*. Revista Chapingo 19 (3): 315-331. <https://doi.org/10.5154/r.rchsh.2012.07.038>
- Lozano, A. Y. E. y J. R. Osuna. 2017. *Tratamiento del agua residual que se obtiene del proceso de la obtención de la quitina-proteína-quitosano de los desechos de camarón*. Revista Iberoamericana de Polímeros y Materiales 18 (6): 280-290.

- Luo, X., Y. Peng, Z. Qin, W. Tang, G.J. Duns, W. Dessie, N. He y Y. Tan. 2023. *Chitosan-based packaging films with an integrated antimicrobial peptide: Characterization, in vitro release and application to fresh pork preservation*. International Journal of Biological Macromolecules 231: 123-209. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2023.123209>.
- Organización Mundial de la Salud. 2022. Residuos de los plaguicidas en los alimentos. En: <https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/pesticide-residues-in-food>. (consultado el 21/03/2025).
- Ortega Cardona, C. y X. Q. Aparicio Fernández. 2020. *Una alternativa sustentable para el empaque de alimentos*. RDU [Internet] 21 (5): 1-9.
- Ramos-Guerrero, A., R. González-Estrada, G. Romanazzi, L. Landi y P. Gutiérrez-Martínez. 2020. *Effects of chitosan in the control of postharvest anthracnose of soursop (Annona muricata) fruit*. Revista Mexicana de Ingeniería Química 19 (1): 99-108. <https://doi.org/10.24275/rmiq/Bio527>
- Rossi, N., C. Grosso y C. Delerue-Matos. 2024. *Shrimp Waste Upcycling: Unveiling the Potential of Polysaccharides, Proteins, Carotenoids, and Fatty Acids with Emphasis on Extraction Techniques and Bioactive Properties*. Marine Drugs 22 (4): 153. <https://www.mdpi.com/1660-3397/22/4/153>
- Uscocovich-Álvarez, Á. A., J. M. Baquerizo-Figueroa, L. S. Rojas-Urbe, M. C. Santos-Falconez, I. M. Reinoso-Baque y E. G. Díaz-Camposano. 2024. *Efecto del recubrimiento con quitosano en la reducción microbiológica y conservación del color del banano poscosecha*. Revista Científica INGENIAR: Ingeniería, Tecnología e Investigación 7 (13): 227-240.
- Vaca Portillo, A. C. y O. Osorio Mora. 2023. *Recubrimiento a base de quitosano para optimizar la calidad de la uchuva (Physalis peruviana L.)*. Acta Agronómica 72 (2): 132-138. <https://doi.org/10.15446/acag.v72n2.106047>
- Wang, B., S. Zhang, X. Wang, S. Yang, Q. Jiang, Y. Xu y W. Xia. 2017. *Transcriptome analysis of the effects of chitosan on the hyperlipidemia and oxidative stress in high-fat diet fed mice*. International Journal of Biological Macromolecules 102: 104-110. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2017.03.187>



Semblanzas de los autores

- 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 Investigadoras e Investigadores (SNII-I) e investigador honorífico del Sistema Sinaloense de Investigadores y Tecnólogos. Posee 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 en 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. Es miembro del Sistema Sinaloense de Investigadores y Tecnólogos. 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 peces y desarrollo de alimentos funcionales.
- El **Ing. José Reyes Valdés Díaz** culminó sus estudios de licenciatura en el 1993 por la Universidad autónoma de Nuevo León. Es jefe del Departamento de Ciencias Básicas y tiene experiencia en fluidos compresibles y termodinámica.
- La **Lic. (M.A.N) (L.C.P) Jazmín Crucita Hernández Ruíz** maestra en la carrera de Ingeniería Bioquímica, egresada de la licenciatura en Contaduría Pública en el año 2014 en la Universidad Autónoma de Sinaloa. Cuenta con una Maestría en Administración de Negocios lo que le ha permitido asesorar proyectos de Innovación y producción de alimentos.

Cita

Lizárraga Velázquez C.E., A.Y. Escobedo-Lozano, J.C. Hernández Ruíz y J.R. Valdés Díaz. Cáscaras y cabeza de camarón: Fuente de quitosano con uso potencial en la industria alimentaria. Recursos Naturales y Sociedad, 2025. Vol. 11 (3): 150-164. <https://doi.org/10.18846/renaysoc.2025.11.11.03.0009>.

Sometido: 27 de marzo de 2025

Aceptado: 18 de agosto de 2025

Editor asociado: Dr. Arturo Sánchez Paz

Editor ejecutivo: Dr. Arturo Sánchez Paz

Diseño gráfico editorial: Ing. Francisca Elizabeth Villegas Carrasco

Yaaxché y chuun: two native tree species from
the Yucatan Peninsula and their potential as a source of natural fibers

Yaaxché y chuun: dos especies arbóreas nativas de la Península de Yucatán y su potencial como fuente de fibras naturales

Luis C. Gutiérrez-Pacheco¹ y Fulgencio Alatorre-Cobos^{2*}

Resumen

Actualmente existe un interés creciente a nivel mundial por las fibras naturales, buscando reducir la contaminación ambiental provocada por la elaboración y uso masivo de fibras sintéticas. Las fibras vegetales se obtienen principalmente de hojas o tallos de plantas herbáceas. Sin embargo, hay árboles que también sirven como fuente de fibras, y que son poco conocidos debido a su uso regional o una constante pérdida de su hábitat. En este trabajo se presenta una descripción del estado del arte del conocimiento de los usos tradicionales y potenciales de las fibras derivadas de dos tipos de árboles presentes en la Península de Yucatán, México, *yaaxché* (*Ceiba* spp.) y *chuun* (*Cochlospermum vitifolium*). Se detalla su importancia cultural, especialmente en la cultura maya, y su utilidad tradicional como materiales de relleno en almohadas, cojines y artesanías, además de sus aplicaciones potenciales en biomateriales y biotecnología. Para el caso de fibras de *C. vitifolium* se provee imágenes de microscopía electrónica de barrido, por primera vez, que permiten observar detalles de su anatomía y micro-relieve. La información aquí provista puede ser útil para fomentar su investigación, revalorización cultural y económica, y en turno su conservación a largo plazo.

Palabras clave: *Ceiba*, *Cochlospermum*, árboles, fibras naturales, mayas.

¹Centro de Investigación Científica de Yucatán A. C., Unidad de Biología Integrativa. Calle 43 No. 130 × 32 y 34, Col. Chuburná de Hidalgo, Mérida, C. P. 97205, Yucatán, México.

²SECIHTI-Centro de Investigación Científica de Yucatán A. C., Unidad de Biología Integrativa. Calle 43 No. 130 × 32 y 34, Col. Chuburná de Hidalgo, Mérida, C. P. 97205, Yucatán, México.

* Autor de correspondencia: E-mail: falatorreco@secihti.mx; Tel: +52 999 942 8330.



Abstract

Currently, there is an increasing worldwide interest in natural fibers aimed at reducing the environmental pollution caused by the manufacture and extensive use of synthetic fibers. Plant fibers are mainly obtained from fruits, leaves, and stems of herbaceous plants. However, some tree species can also serve as a fiber source; little is known about them due to their local use or the accelerated loss of their natural habitats. In this work, we present a state-of-the-art review of our knowledge of traditional and potential uses of fibers that come from *yaaxché* (*Ceiba* spp.) and *chuun* (*Cochlospermum vitifolium*), tree species from the Yucatan Peninsula, Mexico. The cultural relevance of these species for the Mayan people, including their traditional uses as filling materials for pillows, cushions, and handicrafts, as well as their potential uses in biomaterials and biotechnology fields, is provided. In the case of *C. vitifolium*, micrographs obtained using electronic scanning microscopy allow us to reveal the fiber anatomy and microrelief for the first time. The information provided in this paper could encourage research on *Ceiba* and *Cochlospermum* fibers, along with cultural and economic revalorizations and, in turn, their long-term conservation.

Key words: Ceiba, *Cochlospermum*, trees, natural fibers, Mayans.

Introducción

El uso de fibras naturales es una práctica antropocéntrica tan antigua como la especie humana misma en el planeta, pues la elaboración de vestimenta y calzado, recipientes para guardar y transportar alimentos y bienes está ligada tanto a la vida nómada como a la sedentaria de las primeras civilizaciones (Vela, 2020). En México, las primeras evidencias arqueológicas de cestos y esteras, tejidos con técnicas de espiral y trenzado, datan del 7000-400 a. C, hallados en las cuevas de Ocampo y Romero, en Tamaulipas (Zaldivar, 2009; Vela, 2020). En Oaxaca, las evidencias arqueobotánicas indican que hacia el año 10,800 a. C., los pobladores utilizaban fibras de maguey (*Agave* sp.) entrelazadas. Hacia los años 9,000 a 7,000 a. C., aparecieron los primeros utensilios, cordeles, redes y sandalias elaborados con fibras de plantas maguey y yuca (*Yucca* sp.); sin embargo, el uso masivo de las fibras vegetales se incrementó con el auge del vestido y la consecuente elaboración de los primeros textiles en México hacia los años 1,300 a 800 a. C.

Actualmente el mercado mundial de fibras naturales está al alza, en una búsqueda de usar biomateriales que tengan un menor impacto contaminante sobre el ambiente. El algodón (*Gossypium hirsutum* L.) es una de las fibras naturales que dominan el mercado mundial, dado su amplio uso en la industria textil; en este mercado también sobresale el lino (*Linum usitatissimum* L.), cuyas fibras son ampliamente apreciadas, con un alto valor económico. México es centro de origen del algodón, y también sobresale como productor mundial con cerca de 200 mil hectáreas sembradas con este cultivo, especialmente en los estados del norte como Chihuahua, Baja California Norte, Coahuila, Tamaulipas, Sonora y Durango (Agricultura, 2025).

En nuestro país, sin embargo, hay una amplia variedad de especies vegetales que han servido como fuente de fibras naturales desde tiempos prehispánicos, ya sea como textiles o para cestería; algunas son de uso regional y muchas otras están en alguna categoría de riesgo de acuerdo con la NOM-059, por cambios en el uso de suelo donde crecen estas especies, o bien por el desconocimiento del procesamiento y uso lo cual conduce al abandono de su cultivo. Las fibras vegetales son obtenidas principalmente de plantas herbáceas, anuales, así que las que provienen de árboles son escasas. Aquí revisamos el caso de tres especies de árboles que son fuentes de fibras y elementos de la cultura maya en la Península de Yucatán.

Las fibras “voladoras” del yaaxché y del chuun

Las fibras de origen vegetal se obtienen principalmente de hojas o tallos suaves de plantas herbáceas u arbustivas, usualmente con un ciclo de vida anual. Los árboles no suelen ser fuente de fibras, sin embargo, en el continente americano hay varias especies que rompen esta regla. Un ejemplo son los árboles conocidos comúnmente como pochotes o ceibas, que pertenecen a la familia Malvaceae y al género *Ceiba*. Estos árboles, fácilmente reconocidos por su gran tamaño y porte, son originarios de regiones húmedas y subhúmedas de América, del Neotrópico, de donde se dispersaron a África occidental y al sureste asiático, donde ahora son comunes en los cafetales y plantaciones de cacao (Chan *et al.*, 2022; Gómez-Maqueo y Gamboa-deBuen, 2022).

En México existen cuatro especies del género *Ceiba*; dos están presentes en la Península de Yucatán: *C. aesculifolia* (Kunth) Britt & Baker y *C. pentandra* (L.) Gaertn (Rico-Gray *et al.*, 1991; Guía-Ramírez *et al.*, 2020) (Figura 1A-J). En esta región, ambas especies prosperan en suelos calcáreos y son conocidas como *yaaxché*. *C. pentandra*, la cual, junto con su valor utilitario, es una especie con un profundo arraigo en la cosmogonía maya, donde se le considera un árbol sagrado. Para los mayas



del Periodo Clásico, el *yaaxché* es un árbol inmenso, situado en el centro del universo, con raíces en el inframundo, un tallo que cruza la tierra de los humanos y una copa que alcanza el cielo (Tareau et al., 2022; Vizuet Salas et al., 2022). El árbol de *yaaxché* vuelve a estar presente en el colectivo popular maya como uno de los protagonistas en la leyenda de la *Xtabay*, quien es un ente maligno con atributos femeninos que se esconde detrás de un árbol de *yaxché* o ceiba. Ambas palabras para referirse a estas especies, ya sea en maya o español, están presentes en nombres de pueblos actuales o sitios arqueológicos de México y Guatemala, por ejemplo, Seybaplaya (Campeche), Yaxché (Yucatán) y Ceibal (Guatemala) (Benavides y Novelo, 2020). En contraste con *C. pentandra*, *C. aesculifolia*, también conocido comúnmente como algodónero silvestre, es un árbol de menor porte (Figura 1A), reconocido fácilmente por su tallo cubierto con abundantes aguijones cónicos y duros; a diferencia de una espina normal, los aguijones son tejido lignificado sin conexión al tejido vascular por lo que se pueden remover fácilmente del tronco (Guía-Ramírez et al., 2021). Otro rasgo importante que distingue a los dos tipos de *yaaxché* es su alta producción de fibras; algunos autores indican que *C. aesculifolia* produce más fibras que *C. pentandra* (Cano y Hellmuth, 2008). En ambas especies, las fibras se producen en el fruto, una cápsula que al secarse abre y deja escapar las fibras (Figura 1E, J), las cuales envuelven a la semilla, y son tan ligeras que flotan en el aire, recorriendo largas distancias y siendo una forma muy eficiente de dispersión de las semillas. De hecho, se presume que estos árboles llegaron a África desde América gracias a este sistema de dispersión, que le permitió alcanzar el mar y flotar hasta las costas del próximo continente (Chan et al., 2022).

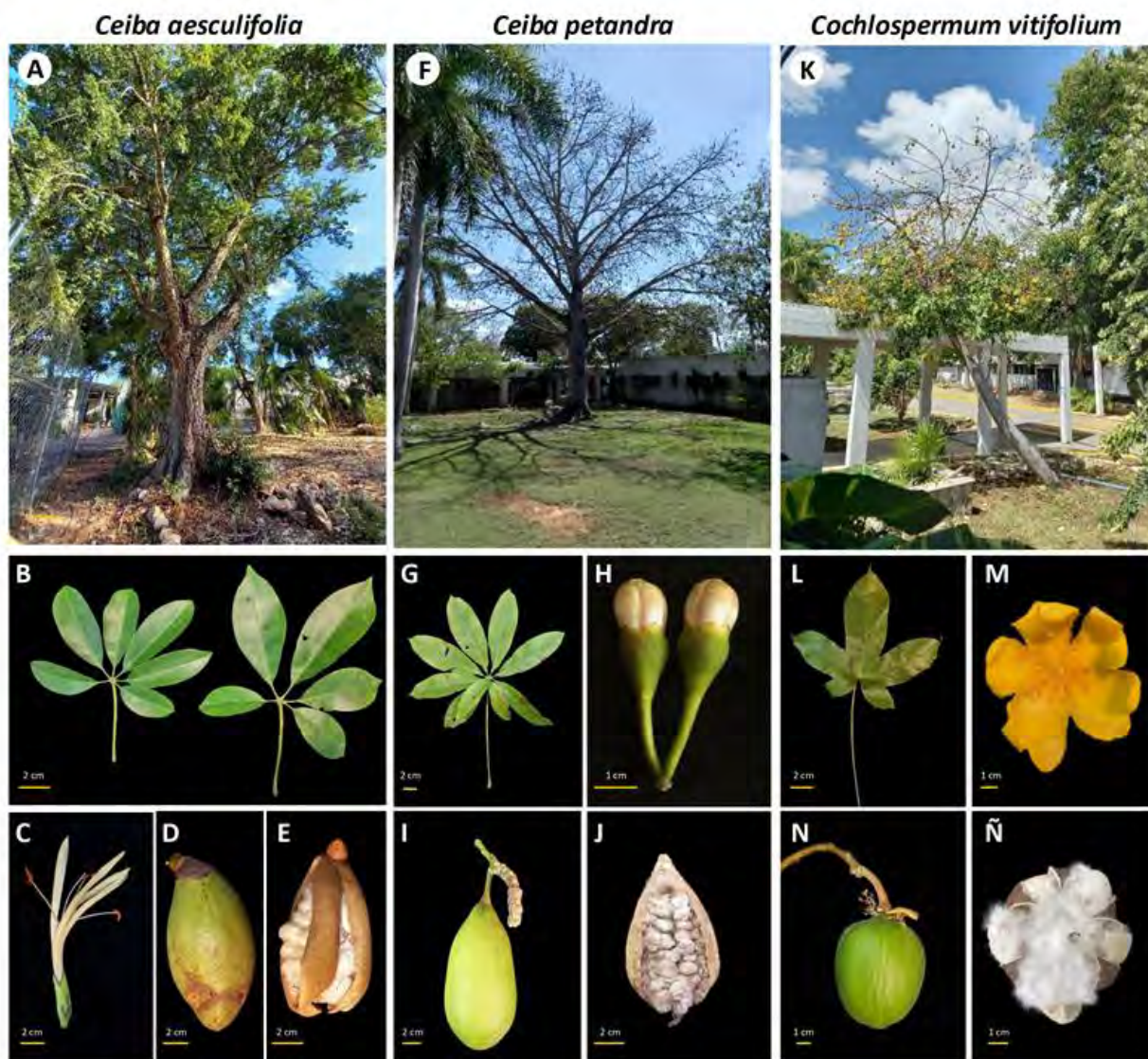


Figura 1. Árboles de *Ceiba aesculifolia* (A-E), *C. pentandra* (F-J) y *Cochlospermum vitifolium* (K-Ñ). Se muestran árboles adultos (A, F, K), hojas completamente desarrolladas (B, G, L), flores (C, H, M) y frutos cerrados (D, I, N) y deshicentes con las fibras expuestas (E, J, Ñ).



Bajo el microscopio es fácil apreciar la forma de la fibra del *yaaxché*: estructuras largas, blancas, huecas en su interior, con una superficie externa lisa, asemejando largos popotes (Figura 2A-H); en los paneles D y H de la figura 2 se ilustra cómo estas fibras son en realidad tricomas modificados unidos a la superficie del endocarpo del fruto (Gómez-Maqueo y Gamboa-deBuen, 2022). Los análisis de su composición química y propiedades mecánicas revelan que son ricas en celulosa (arriba del 60 %) (Alvarado Flores *et al.*, 2024), suaves, con una densidad baja, lo cual explica esa capacidad de “volar” cuando se desprenden de la cápsula (Carranza-Núñez *et al.*, 2021; Chan *et al.*, 2022). Son hidrofóbicas, es decir, repelen el agua, pero interesantemente tienen una afinidad muy alta por los aceites, grasas y diesel, por lo que podrían usarse como removedores en derrames petroleros en mares y ríos. La hidrofobicidad de las fibras se pueden eliminar si se tratan con algunos ácidos para convertir su celulosa a carboximetil celulosa, un biomaterial que absorbe mucha agua y tiene amplios usos tecnológicos. También, cuando las fibras del *yaaxché* se les trata con agentes químicos que modifican su superficie lisa, se convierten en superficies excelentes para adsorber o pegar metales pesados como el plomo. Aunque estas investigaciones recientes evidencian el potencial de uso de las fibras de *yaaxché* que pudieran tener en la biotecnología o biomateriales, ellas se han usado tradicionalmente desde siglos atrás. Las fibras se han usado para rellenar almohadas, cojines, colchones y chalecos salvavidas (Rico-Gray *et al.*, 1991; Gómez-Maqueo y Gamboa-deBuen, 2022). La hipoalergenicidad de las fibras del *yaaxché* las convierten en materiales ideales de relleno para personas que sufren de asma o alergias a plumas o lana. El tamaño corto de las fibras (1-2 cm de longitud) ha limitado su uso textil, sin embargo, se pueden mezclar con fibras de algodón o rayón en la elaboración de telas (Benavides y Novelo, 2020; Gómez-Maqueo y Gamboa-deBuen, 2022).

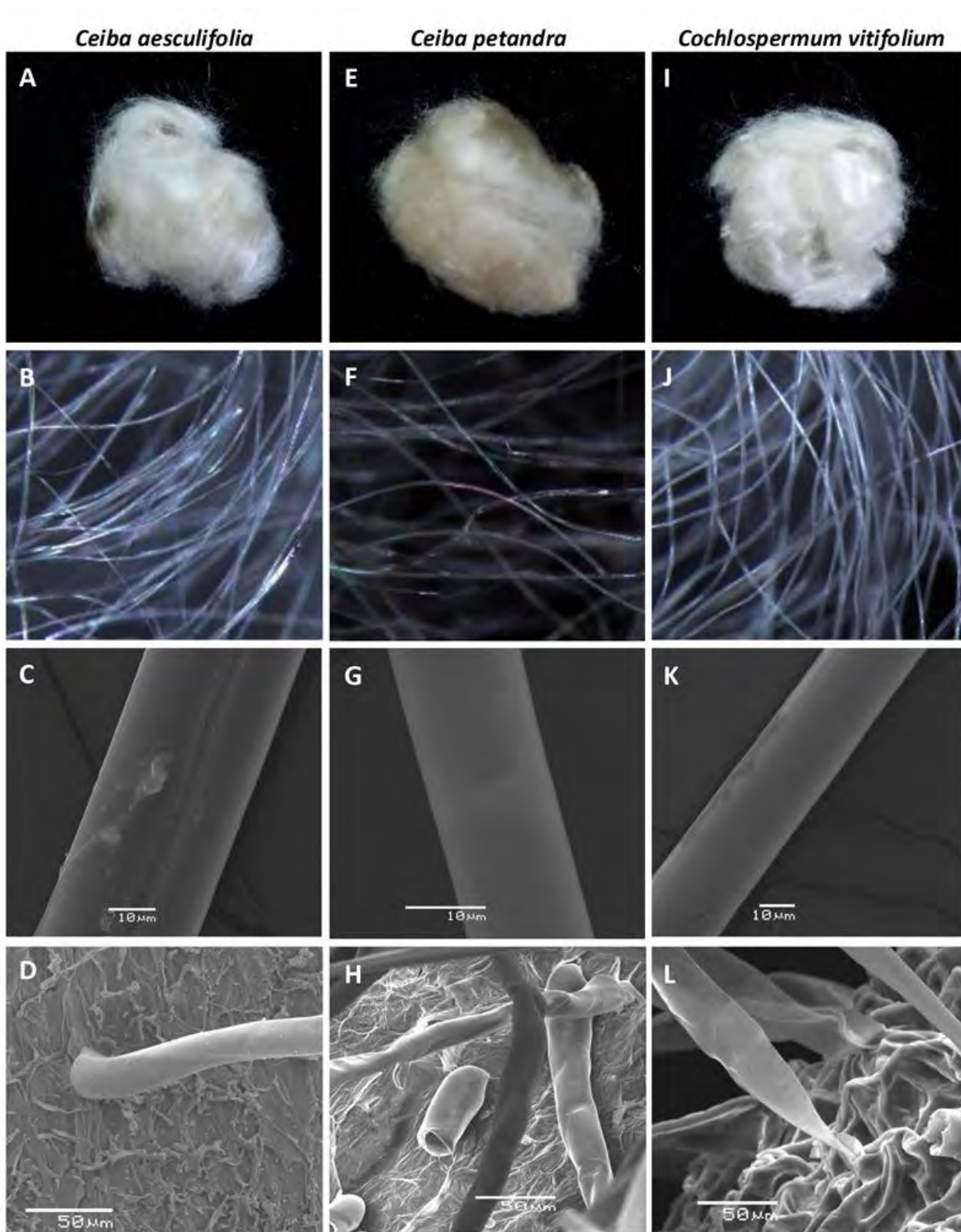


Figura 2. Fibras de *Ceiba aesculifolia* (A-D), *C. pentandra* (E-H) y *Cochlospermum vitifolium* (I-L). Las fibras colectadas de frutos secos (A, E, I) fueron observadas bajo el estereomicroscopio (B, F, J); los detalles de la superficie de la fibra (C, G, K) y cómo se unen al endocarpo (D, H) o a la testa de la semilla (L) fueron revelados usando el microscopio electrónico de barrido.



Otro árbol proveedor de fibras presente en la Península de Yucatán es *Cochlospermum vitifolium* (Willd.) Spreng., conocido en lengua maya como *chuun*, de la familia Bixaceae. Es un árbol de porte mediano (Figura 1K-Ñ), similar en altura a *C. aesculifolia*, pero sin aguijones en su tronco. Se distingue por tener flores grandes de hasta 10 cm de diámetro, amarillas y brillantes (Figura 1M), que aparecen de enero a abril, coincidiendo con la temporada en que el árbol pierde todas sus hojas. Es una especie típica de las selvas secas del Neotrópico; su distribución va desde el sur y occidente de México hasta Sudamérica (Cedano Maldonado y Villaseñor Ibarra, 2004; Johnson-Fulton y Watson, 2017). Su fruto es una cápsula ovoide (5-10 cm de largo), que abre al madurar liberando sus semillas envueltas en una fibra sedosa (Figura 1N-Ñ). Similarmente a lo que ocurre en algodón, las fibras del *chuun* son tricomas blancos adheridos a la testa de la semilla (Figura 2I, J, L) (Poppendieck, 2003); el hecho que la semilla tenga múltiples fibras en su cubierta externa, le permite dispersarse o “flotar” en el aire. Cuando se observan con un microscopio de alta resolución como lo es el microscopio electrónico de barrido, las fibras del *chuun* parecen listones (Figura 2K-L), muy distintos a las estructuras tubulares que hallamos en las fibras del *yaaxché*. Hasta ahora no existen trabajos reportados sobre la composición química o propiedades mecánicas de las fibras del *chuun*; sin embargo, al igual que el *yaaxché*, sus fibras se han usado como material de relleno de almohadas, cojines y muñecas de tela, no solo en México, sino también en países de Sudamérica, África y el sureste asiático (Cedano Maldonado y Villaseñor Ibarra, 2004; Johnson-Fulton, 2014).

Junto con su valor utilitario como fuente de fibras, el *yaaxché* y *chuun*, son apreciados en la medicina tradicional y forestal. En América, la corteza es usada para tratar lesiones de la piel, incluida la leishmaniasis, las flores para los dolores de cintura y cabeza, y la savia del tronco para tratar la conjuntivitis. En el sureste asiático, las hojas y tallos son usados para tratar la fiebre, dolores de garganta, asma y algunas enfermedades venéreas (Chan *et al.*, 2022; Tareau *et al.*, 2021). Estudios fitoquímicos en *C. pentandra* reportan que esta especie es rica en fenoles, flavonoides, alcaloides y taninos, los cuales pudieran explicar parcialmente sus propiedades medicinales (Baraniak y Kania-Dobrowolska, 2023). En el caso del árbol de *chuun*, al ser una especie menos extendida mundialmente, su uso es más local. En México, la corteza del *chuun* se usa para tratar heridas o rozaduras de la piel; el tronco para tratar la diabetes, hepatitis, infecciones vaginales, del hígado y contra mordeduras de serpientes (Cedano Maldonado y Villaseñor Ibarra, 2004; Sánchez-Delgado *et al.*, 2007). Similar a lo hallado en *yaaxché*, la presencia de flavonoides, esteroides y lignanos en *chuun* correlacionan con sus usos benéficos para tratar afecciones del hígado (Aguilar-Guadarrama y Ríos, 2018). Respecto a los usos forestales del *yaaxché* y *chuun*, resalta el uso de la madera para la elaboración de muebles, papel y su uso como leña por su poder calorífico (Walia *et al.*, 2009;

Adefisan *et al.*, 2019; Alvarado-Flores *et al.*, 2024). Por su tasa de crecimiento alta, la siembra de *C. pentandra* se ha extendido en muchas partes del mundo; sin embargo, no existen inventarios forestales que den cuenta de las superficies sembradas y rendimiento obtenidos, a excepción de algunos países asiáticos. Por ejemplo, la producción conjunta de Indonesia y Tailandia respecto a fibra ha sufrido una disminución considerable en los últimos 20 años, pero se mantiene cercana a las 50 mil toneladas por año (Gómez-Maqueo y Gamboa-deBuen, 2022).

Conclusiones

Los árboles al igual que muchas plantas herbáceas pueden ser fuentes de fibras. En el caso de los árboles *yaaxché* y *chuun*, estas fibras están presentes en el fruto, a manera de protección o como un mecanismo que les permite dispersar sus semillas con el aire. Dado que son fibras cortas su uso en la industria textil ha sido limitado, sin embargo, son excelentes materiales de relleno, con aplicaciones potenciales en la industria de los biomateriales y biotecnología. Esta expansión de sus usos puede ayudar a su revalorización económica y conservación en sus áreas naturales de crecimiento.

Agradecimientos

Se agradece el apoyo técnico de Silvia Andrade Canto y Angela Ku González (Laboratorio de Microscopía Electrónica de Barrido, CICY, Mérida, Yucatán) por su apoyo en la preparación de muestras y toma de micrografías en el microscopio electrónico de barrido, respectivamente.

Referencias

- Adefisan, O. O., & Oyelola, D. J. 2019. *Strength, sorption and chemical properties of Ceiba pentandra and Tectona grandis wood composite*. Arid Zone Journal of Engineering, Technology and Environment 15 (SPi2): 91-99.
- Agricultura, 2025. *El algodón de México, fibra suave y cultivo generoso*. En: <https://www.gob.mx/agricultura/articulos/el-algodon-de-mexico-fibra-suave-y-cultivo-generoso?idiom=es>. Consultado: 1-junio-2025.



- Aguilar-Guadarrama, A.B. & Rios, M.Y. 2018. Flavonoids, sterols and lignans from *Cochlospermum vitifolium* and their relationship with its liver activity. *Molecules* 23: 1952.
- Alvarado Flores, J. J., L. F. Pintor Ibarra, F. D. Mendez Zetina, J. G. Rutiaga Quiñones, J. V. Alcaraz Vera y M. L. Ávalos Rodríguez. 2024. *Pyrolysis and physicochemical, thermokinetic and thermodynamic analyses of Ceiba aesculifolia (Kunth) Britt and baker waste to evaluate its bioenergy potential*. *Molecules* 29 (18): 4388-4415.
- Baraniak, J., & Kania-Dobrowolska, M. 2023. *Multi-purpose utilization of kapok fiber and properties of Ceiba pentandra tree in various branches of industry*. *Journal of Natural Fibers* 20 (1): 2192542.
- Benavides, A. y S. Novelo. 2020. *Ceiba representations in the Chenes region*. *IMS Explorer* 48 (4): 1-8.
- Cano, Y., y N. M. Hellmuth. 2008. *Sacred tree Ceiba*. FLAAR. 18 pp.
- Cedano Maldonado, M., Villaseñor Ibarra, L. 2004. Usos y nombres comunes de las especies de *Cochlospermaceae* en México. *Etnobiología* 4: 73-88.
- Chan, E. W. C., S. W. Yeong, C. W. Wong, O. Y. M. Soo, A. C. Y. Phua y Y. K. Ng. 2022. *Ceiba pentandra (L.) Gaertn.: An overview of its botany, uses, reproductive biology, pharmacological properties, and industrial potentials*. *Journal of Applied Biology & Biotechnology* 11 (1): 1-7.
- Carranza-Nuñez, U., S. R. Vasquez-Garcia, N. Flores-Ramirez, H. A. Abdel-Gawwad, J. L. Rico, A. Arizbe-Santiago, J. Vargas y J. Cruz-de-León. 2021. *Physicochemical characterization of Natural fibers obtained from seed pods of Ceiba aesculifolia*. *Bioresources* 16 (2): 4200–4211.
- Cedano Maldonado, M. y L. Villaseñor Ibarra. 2004. *Usos y nombres comunes de las especies de Cochlospermaceae en México*. *Etnobiología* 4 (1): 73–78.
- Guía-Ramírez, S., T. M. Terrazas-Salgado, S. Aguilar-Rodríguez, L. Yáñez-Espinosa y J. D. Tejero-Díez. 2020. *Desarrollo de la corteza: Estudio comparativo en dos especies de Ceiba (Malvaceae)*. *Acta Botánica Mexicana* 128: e1781-1798.
- Gómez-Maqueo, X. y A. Gamboa-deBuen. 2022. *The biology of the genus Ceiba, a potential source for sustainable production of natural fiber*. *Plants* 11 (4): 521-535.
- Johnson-Fulton, S. B. 2014. *Systematics, biogeography, and ethnobotany of the pantropical family cochlospermaceae (Malvales)*. Ph. D. thesis, Miami University. E.U.A. 182 pp.
- Johnson-Fulton, S. B. y L. E. Watson. 2017. *Phylogenetic systematics of Cochlospermaceae (Malvales) based on molecular and morphological evidence*. *Systematic Botany* 42 (2): 271–282.

- Poppendieck, H. H. 2003. *Cochlospermaceae*. En: Kubitzki K., *et al.*, (Eds.). The families and genera of vascular plants, Vol. 5, Flowering Plants. Dicotyledons. Malvales, Capparales and Non-betain Caryophyllales. Springer-Verlag. Berlin, Alemania. 428 pp.
- Rico-Gray, V., A. Chemás y S. Mandujano. 1991. *Uses of tropical deciduous forest species by the Yucatecan Maya*. Agroforestry systems, 14: 149-161.
- Sánchez-Salgado, J. C., Ortiz-Andrade, R. R., Aguirre-Crespo, F., Vergara-Galicia, J., León-Rivera, I., Montes, S., Villalobos-Molina, R., Estrada-Soto, S. 2007. *Hypoglycemic, vasorelaxant and hepatoprotective effects of Cochlospermum vitifolium (Willd.) Sprengel: A potential agent for the treatment of metabolic syndrome*. Journal of Ethnopharmacology 109 (3): 400-405.
- Tareau, M.-A., A. Greene, G. Odonne y D. Davy. 2022. *Ceiba pentandra (Malvaceae) and associated species: Spiritual keystone species of the Neotropics*. Botany 100 (2): 127-140.
- Vela, E. 2020. *La cestería en México*. Arqueología mexicana 91: 40-70.
- Walia, Y. K., Kishore, K., Vasu, D., Gupta, D. K. 2009. *Physico-chemical analysis of Ceiba pentandra (Kapok)*. International Journal of Theoretical and Applied Sciences 1(2): 15-18.
- Vizuet Salas, A. 2022. *Yaaxché-Ceiba, mitos y leyendas del árbol sagrado del pueblo maya*. Instituto Nacional de los Pueblos Indígenas. CDMX, México, 29 pp.
- Zaldívar, MLL. 2009. *La cestería en México*. FONART, Ciudad de México, México. 31 p.

Semblanzas de los autores

- **Luis Carlos Gutiérrez Pacheco** es químico farmacéutico biólogo por la Universidad Autónoma de Yucatán. Tiene una maestría en ciencias en biotecnología de plantas por el Centro de Investigación Científica de Yucatán (CICY). Actualmente es técnico titular nivel B, adscrito a la Unidad de Biología Integrativa del CICY.
- **Fulgencio Alatorre Cobos** es ingeniero agrónomo especialista en fitotecnia por la Universidad Autónoma Chapingo. Obtuvo una maestría y un doctorado en ciencias en biotecnología de plantas por el Centro de Investigación Científica de Yucatán (CICY) y el Centro de Investigación y Estudios Avanzados del I.P.N. Unidad Irapuato, respectivamente. Actualmente es Investigador por México de la SECIHTI, adscrito a la Unidad de Biología Integrativa del CICY. Es miembro del Sistema Nacional de Investigadoras e Investigadores (SNII-II).

**Cita**

Gutiérrez-Pacheco, L.C., y F. Alatorre. Yaaxché y chuun: dos especies arbóreas nativas de la Península de Yucatán y su potencial como fuente de fibras naturales. Recursos Naturales y Sociedad, 2025. Vol. 11 (3): 166 - 177.

<https://doi.org/10.18846/renaysoc.2025.11.11.03.0010>.

Sometido: 27 de junio de 2025

Aceptado: 25 de agosto de 2025

Editor asociado: Dr. Arturo Sánchez Paz

Editor ejecutivo: Dr. Arturo Sánchez Paz

Diseño gráfico editorial: Ing. Francisca Elizabeth Villegas Carrasco

Campylobacter jejuni:
The silent fight of science in designing new vaccines

Campylobacter jejuni:
La batalla silenciosa de la ciencia
para el diseño de nuevas vacunas

Víctor Hernández¹, Carlos Angulo^{1,5}, Elizabeth Monreal-Escalante^{1,2,5*},
Bernardo Bañuelos-Hernández³, Reyna Romero^{4,5}

Resumen

Campylobacter jejuni es un patógeno gastrointestinal que afecta a pollos de engorda y provoca pérdidas económicas en la industria avícola. Además, este patógeno puede transmitirse a humanos que consumen pollo contaminado, provocando enfermedades gastrointestinales y posiblemente el síndrome de Guillain-Barré. Aunque se han llevado a cabo investigaciones científicas para el desarrollo de una vacuna eficaz en aves y humanos, aún no existe una vacuna comercial, preventiva o terapéutica. El presente artículo tiene como propósito ofrecer conocimientos generales sobre *C. jejuni* de manera sencilla, así como divulgar los resultados que se han generado en el CIBNOR en computadora (*in silico*) para el diseño de una vacuna multiepitópica contra este patógeno.

Palabras clave: Sistema inmune; bioinformática; gastroenteritis; inteligencia artificial.

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

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

³ Facultad de Veterinaria, Universidad De La Salle Bajío, Avenida Universidad 602, Lomas del Campestre, C.P. 37150, León, , Guanajuato. Mexico

⁴ Instituto Tecnológico de La Paz, Boulevard Forjadores de Baja California Sur 4720, 8 de octubre 2.ª Secc. La Paz, B.C.S., C.P. 23080, México.

⁵ Laboratorio Nacional CONAHCYT de Generación de Vacunas Veterinarias y Servicios de Diagnóstico. Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste, S.C. (CIBNOR), Instituto Politécnico Nacional 195, Playa Palo de Santa Rita Sur, La Paz, B.C.S. 23096, México

* Autor de correspondencia: emonreal@cibnor.mx



Abstract

Campylobacter jejuni is a gastrointestinal pathogen that affects broiler chickens and causes economic losses in the poultry industry. Additionally, this pathogen can be transmitted to humans who consume contaminated chicken, leading to gastrointestinal diseases and possibly Guillain-Barré syndrome. Although scientific research has been conducted to develop an effective vaccine for both poultry and humans, there is still no commercial vaccine, either preventive or therapeutic. This article purposes to provide general knowledge about *C. jejuni* in a simple way and to share the results generated at CIBNOR using computational methods (*in silico*) for the design of a multi-epitope vaccine against this pathogen.

Keywords: Immune system; bioinformatics; gastroenteritis; artificial intelligence.

Introducción

Campylobacter es un género de bacterias caracterizado por ser un bacilo Gram negativo, con uno o dos flagelos polares, y que posee una morfología en forma de hélice (Vandamme, 1991). Algunas especies de *Campylobacter* pueden infectar a los humanos, causando Campylobacteriosis, caracterizada por diarrea y patologías en el tracto gastrointestinal (Inglis *et al.* 2021). Una de las especies más importantes es *Campylobacter jejuni*, patógeno que infecta el intestino de pollos (Neal-Mckinney *et al.* 2014). Productos derivados de pollos contaminados con *C. jejuni* pueden transmitir enfermedades gastrointestinales y el síndrome de Guillain-Barré (GBS) (Yasmin *et al.* 2016). Las aves de corral son el principal reservorio de bacterias de fácil propagación debido a su sistema de producción comercial en el que los animales son hacinados en pequeños espacios. En estas condiciones, las aves pueden llegar a tener 1×10^8 Unidades Formadoras de Colonias (UFC)/g de *Campylobacter* en el intestino, es decir, cada gramo del ave puede contener 100 millones de células de esta bacteria. La contaminación natural en aves de corral sucede entre los pollos de 2 a 3 semanas y la bacteria continúa presente hasta el momento de su sacrificio (Dhillon *et al.* 2006; Negretti *et al.* 2020; Sahin *et al.* 2003). Para el control de infecciones masivas en las aves de corral son necesarias ciertas medidas, como higiene, bioseguridad, correcta nutrición en las parvadas, vacunación para disminuir la infección por *Campylobacter* con la finalidad de reducir uno de los riesgos de contagio al ser humano (Meunier *et al.* 2017). Estas medidas, incluida la vacunación, deben extenderse a las aves criadas en traspatio.

Actualmente, se desarrollan distintos métodos computacionales enfocados en analizar los sistemas inmunológicos para el diseño de vacunas que tienen como objetivo la identificación de proteínas conservadas y con índice de virulencia alto (Gorain *et al.* 2020; Neal-Mckinney *et al.* 2014). Un aspecto relevante en el diseño de vacunas es la identificación de antígenos (moléculas que reconoce el sistema inmune desencadenando una respuesta inmunitaria) específicos asociados a los factores de virulencia, sobre todo para las vacunas basadas en múltiples epítomos (región específica de un antígeno) (Behringer *et al.* 2011).

Antecedentes

Enfermedades gastrointestinales

Las enfermedades gastrointestinales son consideradas como un problema de salud pública a nivel mundial, afectando a personas de cualquier edad y entorno social. Sin embargo, se sabe que los grupos más vulnerables son adultos mayores y niños (Kaakoush *et al.* 2015). Las enfermedades gastrointestinales infecciosas más comunes son causadas por bacterias como *Escherichia coli*, *Salmonella*, *Shigella* y *Campylobacter*, inclusive por parásitos como *Giardia lamblia* y amebas. También son causadas por virus como Rotavirus y Virus Norwalk, al consumir agua y/o alimentos contaminados (Hernández *et al.* 2011).

Campilobacteriosis: la enfermedad

La Campilobacteriosis es una enfermedad gastrointestinal causada por especies de *Campylobacter*. En el humano, los primeros síntomas comienzan entre 2 y 5 días después de la infección y pueden durar entre 1 a 10 días (Cohen *et al.* 2020). Los síntomas más comunes causados por *Campylobacter* son diarrea, dolor abdominal, fiebre, dolor de cabeza, náuseas, vómito que perduran de 3 a 6 días (González-Hein *et al.* 2014).

También se han observado complicaciones post-Campilobacteriosis como hepatitis, pancreatitis, que en caso de mujeres embarazadas puede causar aborto, así como trastorno neurológico conocido como el síndrome de Guillain-Barré (OMS, 2020; Rojas *et al.* 2019).



El síndrome de Guillain-Barré y su relación con *C. jejuni*

El síndrome de Guillain-Barré (SGB) es considerado una polineuropatía (mal funcionamiento simultáneo de muchos nervios periféricos en todo el cuerpo), con variantes clínicas que, normalmente, se presentan como parálisis antecedita por una infección causada frecuentemente por una desmielinización (alteración que daña la capa protectora que rodea las fibras nerviosas) (Inglis *et al.* 2021). Es una enfermedad que cursa con parálisis aguda secundaria (dificultad para moverse o sostenerse) a la inflamación de nervios periféricos y raíces nerviosas que daña los músculos faciales, la deglución y la ventilación. SGB es una de las causas más frecuentes de parálisis flácida en niños sanos, y tiene una incidencia anual de 0.6 a 2.4 casos por 100,000 habitantes a nivel mundial (Mendoza *et al.* 2010).

Se han identificado diferentes anticuerpos que actúan en contra de gangliósidos involucrados en el daño de la mielina (lipoproteína que constituye la vaina de las fibras nerviosas) y en su producción por las células de Schwann (células gliales que se encuentran en el sistema nervioso periférico y que producen la mielina), se cree que son generados como parte de una reacción cruzada contra las proteínas de los axones (transportadores de impulsos nerviosos) dentro de la acción de la respuesta inmune contra agentes infecciosos como *C. jejuni* (Yuki *et al.* 2004). Aproximadamente dos tercios de los pacientes con SGB presentan antecedentes de infección del tracto respiratorio o gastrointestinal, siendo *Campylobacter* sp. el agente infeccioso más frecuentemente asociado a esta enfermedad (Inglis *et al.* 2021). El aislamiento de *C. jejuni* en los pacientes con SGB ha sido descrito en un rango de 26 a 30 %, y se ha identificado en un 70 % de los pacientes que presentan un cuadro diarreico 12 semanas previo al inicio de los síntomas neurológicos (Mendoza *et al.* 2010).

Historia y biología de bacterias *Campylobacter*

Kaakoush *et al.* (2015) reportaron que el género *Campylobacter* fue establecido en el año 1936 tras el cambio de nombre de *Vibrio fetus* a *Campylobacter fetus*, formando así la especie de este género. El género *Campylobacter* es perteneciente a la familia Campylobacteraceae, orden Campylobacteriales, clase Epsilonproteobacteria y al filo Protobacteria. Hasta el 2014, el género *Campylobacter* estaba integrado por 26 especies, 2 especies provisionales y 9 subespecies. Las distintas especies de *Campylobacter* son bacterias caracterizadas por ser Gram negativas en espiral, poseen una forma de bastón o curvadas con un solo flagelo polar, flagelos bipolares o sin flagelo, según la especie (Forsythe, 2000; Rojas *et al.* 2019). Estas no son formadoras de esporas, de un tamaño aproximado de 0.2-0.8 µm, son quimioorganotrofos (organismos que obtienen su energía

mediante la oxidación de compuestos orgánicos como azúcares, grasas y proteínas) y sus fuentes de energía las obtienen a partir de aminoácidos o intermediarios del ciclo del ácido tricarboxílico (ciclo de Krebs) (Vandamme *et al.* 2010).

Especies de Campylobacter que están asociadas a enfermedades gastrointestinales

Dentro de las especies de *Campylobacter* relacionadas con enfermedades gastrointestinales se encuentran *Campylobacter fetus*, *C. coli* y *C. jejuni*. (Shrestha *et al.* 2023). *C. fetus* es una bacteria microaerofílica (resistente a bajas concentraciones de oxígeno) que puede causar abortos espontáneos en bovinos y ovinos, representa una grave amenaza para la salud humana ya que la ingesta de productos lácteos y carnes derivados de estos animales es la principal vía de transmisión de la bacteria (Zhao *et al.* 2012). En general, *C. jejuni* es más frecuente en aves de corral, mientras que *C. coli* se presenta comúnmente en cerdos. *C. jejuni* puede coexistir con *C. coli* en los cerdos, pero normalmente en niveles de 10 a 100 veces más bajos que *C. coli* (Gabbert *et al.* 2023). *C. jejuni* y *C. coli* son causas establecidas de diarrea en humanos. La infección con una dosis baja como 800 UFC puede causar diarrea. Sin embargo, la dosis requerida de *C. jejuni* para el desarrollo de Campilobacteriosis puede ser tan baja como 360 UFC (Hara y Takatori, 2011).

Campylobacter jejuni, conocimientos generales

C. jejuni es una bacteria microaerofílica (tolera 3% de oxígeno y 15% de CO₂), no fermentadora. Sin embargo, también es considerada una bacteria mesófila/termófila por algunos autores, puesto que crece en el rango de 37 a 42 °C (Forsythe, 2000). Es una bacteria oxidasa positiva (Rojas *et al.* 2019), que expuesta al oxígeno atmosférico o situaciones de estrés puede cambiar a una forma esférica (Fig. 1) (Lapierre, 2013; Snelling, 2005).



Dentro del intestino



Expuesto al medio ambiente



Figura 1. Adaptación de *C. jejuni* al ambiente. Forma de espiral con un flagelo en óptimas condiciones (intestino). Forma esférica en situaciones de estrés (presencia de oxígeno, y cambios de temperatura). Cultivable pero no viables (CBNV).

En los países más industrializados, este patógeno ha sido una de las principales causas de gastroenteritis. Por ejemplo, en Alemania en el año 2012 se notificaron al menos 62,626 casos de infecciones por este patógeno (Hoppe *et al.* 2013). Una complicación causada por Campilobacteriosis provoca diarrea, vómito, fiebre alta, causando una deshidratación grave (Blaser, 2005). Hope *et al.* (2013) reportaron estudios donde asocian la Campilobacteriosis con el desarrollo potencial de algunas enfermedades neurológicas, como es el caso del síndrome de Guillain-Barré. La cepa clínica patógena de *C. jejuni* NCTC11168 es una de las más estudiadas, debido a que ha sido modelo de laboratorio para estudios sobre su patogénesis desde su aislamiento en el año 2000 (Yasmin *et al.* 2016). *C. jejuni* es capaz de adherirse a superficies mucosas como el intestino de mamíferos y aves (Snelling, 2005). Un ejemplo son las aves de engorda, los pollos sanos llevan al menos 1×10^8 UFC en sus tractos digestivos (Dhillon, 2006; Negretti, 2020; Sahin, 2003). Los alimentos contaminados son una causa importante de infecciones aisladas, puesto que la carne de aves de corral preparada incorrectamente es la principal fuente de infección (Rosenqvist *et al.* 2015).

Patogénesis: la generación de daño

La infección causada por *C. jejuni* se inicia por la ingestión de agua o alimentos contaminados. El primer paso del proceso de infección es cuando la bacteria ingresa al intestino del hospedero. Como paso siguiente, atraviesa el moco gastrointestinal colonizando así la capa mucosal que cubre el epitelio del yeyuno e íleon (partes del intestino delgado). Después, la bacteria se adhiere a los enterocitos intestinales donde expresa diferentes factores de virulencia como la liberación de

toxinas, principalmente enterotoxinas y citotoxinas causando respuesta inflamatoria e inducción a diarrea sanguinolenta durante 7 días. La presencia de sangre y leucocitos en las heces indica el poder invasivo de la bacteria (Fig. 2) (Snelling, 2005; Teagle *et al.* 2019).

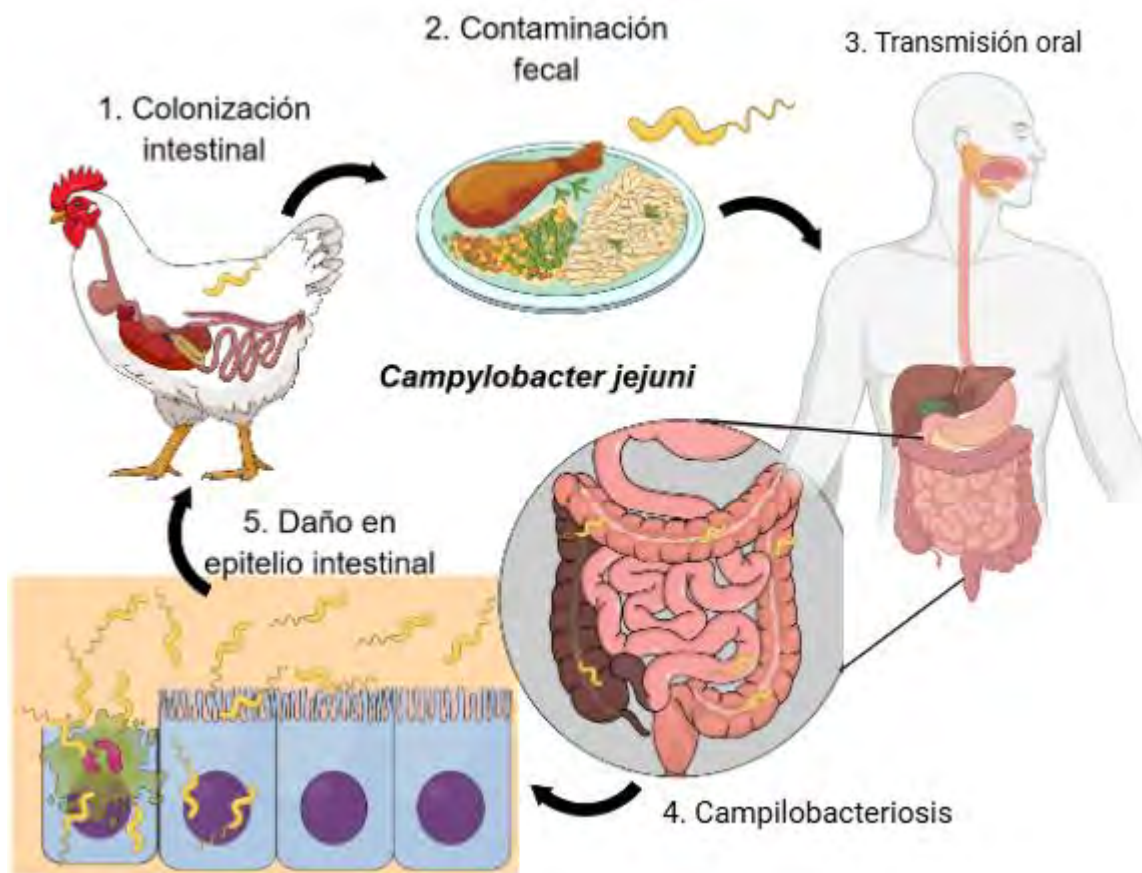


Figura 2. Proceso de propagación e infección por *C. jejuni*. **Colonización:** *C. jejuni* coloniza el tracto intestinal de las aves de corral como reservorio natural. **Contaminación fecal:** Las heces fecales de las aves infectadas contaminan alimentos y agua durante el proceso de los productos derivados de los pollos de engorda (carne). **Transmisión oral:** Derivado a la contaminación de productos avícolas, los humanos consumen alimentos contaminados por *C. jejuni* debido a un mal manejo. **Campilobacteriosis:** *C. jejuni* en el sistema gastrointestinal humano, infecta el intestino delgado y colon, causando principalmente diarrea y dolor abdominal. **Daño en el epitelio intestinal:** esta bacteria daña células epiteliales provocando síntomas de inflamación y los síntomas clínicos de la infección.

La autoridad Europea de Seguridad Alimentaria (EFSA, por sus siglas en inglés) reportó en 2013 que la enfermedad gastrointestinal causada por *C. jejuni* no es común con inóculos bacterianos por debajo de 10,000 UFC, es decir, si por mala fortuna se ingiere algún alimento contaminado con menos de 10,000 UFC las probabilidades de desarrollar una enfermedad gastrointestinal son bajas. Sin embargo, en caso de desarrollarse, la enfermedad gastrointestinal puede complicarse con colitis ulcerativa aguda, artritis reactiva, artritis séptica, síndrome de Guillain-Barre y meningitis (Cervantes, 2007).



Diferencias genéticas entre aislados de *C. jejuni*

La variabilidad genética (diversidad en la frecuencia de genes) en aislados de *C. jejuni* genera diferencias en el fenotipo (características observables) y el potencial de adaptación bacteriana. A niveles metabólicos se denota a detalle por la capacidad variable de las cepas para usar glutamina y asparagina como nutrientes gracias a la variación alélica en los genes que codifican la Gamma-glutamyltranspeptidasa (GGT) y una asparaginasa periplásmica influyendo en la infección bacteriana (Hofreuter *et al.* 2008; Negretti, 2020). De igual forma, las diferentes cepas de *C. jejuni* secretan isoformas (diferentes versiones de la misma proteína) de sus proteínas que difieren en su capacidad para inducir la apoptosis (muerte celular programada) de la célula hospedera, como lo es la proteína FspA (Hofreuter *et al.* 2008).

Las bacterias poseen unas estructuras denominadas flagelos que les permiten su movilidad. Variaciones mínimas en la composición de los genes que controlan estos flagelos provocan cambios en la proteína que los forma (flagelina). Estos cambios pueden afectar cómo el sistema inmune reconoce a la bacteria y su capacidad de adherencia a superficies (Van Putten *et al.* 2009).

Los factores de virulencia de *C. jejuni*: lo que define su capacidad de enfermar

Los factores de virulencia son moléculas producidas por microorganismos patógenos que les confieren la capacidad de invadir, infectar y modular la respuesta inmune de su hospedero a su favor (De La Calle Rodríguez *et al.* 2012). *C. jejuni* posee factores de virulencia, como adherencia, invasión, motilidad (capacidad que tienen los organismos y/o células para poder moverse de forma independiente), quimiotaxis (movimiento celular o de organismos unicelulares provocado por estímulos químicos) y toxinas de distensión citoletal (toxina proteica compuesta por tres subunidades producida por bacterias gramnegativas) que dañan el ADN y bloquea el ciclo celular de sus hospederos provocando la muerte celular. Un ejemplo de estos es la membrana externa, la cual contiene lipopolisacáridos (LPS) con actividad endotoxigénica (capacidad de ciertas moléculas para inducir respuesta inflamatoria en el organismo). La cápsula de las bacterias es una de las estructuras importantes, ya que actúa como capa protectora. Esta capa les permite adherirse a otras células y entrar en cualquier organismo vivo y causar enfermedades. Además, ciertas partes de la cápsula son similares a diferentes compuestos cerebrales, lo que puede confundir el sistema inmune y provocar enfermedades neuronales como el síndrome de Guillain-Barré (González-Hein *et al.* 2014; Koga *et al.* 2015; Negretti *et al.* 2020). Por otro lado, Teagle *et al.* (2019) describen que, el flagelo juega un papel muy importante para la colonización (permanencia y crecimiento de bacterias

en un sitio determinado en un organismo), la virulencia (medida en la que una bacteria invade un organismo, multiplicarse y causar daño provocando infección y enfermedad) y la invasión de las células epiteliales, actuando también como aparato de secreción para antígenos de invasión. El sistema de N-glicosilación es un proceso que modifica algunas proteínas de las bacterias haciéndolas dañinas. Estas modificaciones ayudan a las bacterias a causar infecciones invadiendo el sistema inmune. Por otro lado, la toxina CDT (toxina de distensión citoletal), uno de los factores de virulencia más importantes, está conformada por 3 subunidades: CdtA, CdtB y CdtC. CdtA y CdtC se ligan a receptores (molécula de reconocimiento y unión de otras moléculas en el exterior o interior de la célula) desconocidos de la superficie de la célula hospedera, mientras que CdtB se dirige al núcleo donde la toxina destruye la doble cadena de ADN y detiene el ciclo celular, actuando como una DNAsa (proteína que degrada el ADN) causando daño directo al ADN (González *et al.* 2014).

¿Cómo responde *C. jejuni* al estrés?

C. jejuni no tiene regulador Rpos (regulador de la respuesta general al estrés en bacterias Gramnegativas) cuya función es regular la respuesta a varios tipos de estrés ambiental. Aunado a esto, algunos estudios han demostrado que *C. jejuni* puede presentar una respuesta adaptativa a condiciones aerobias y ácidas en otras etapas de su crecimiento (Murphy *et al.* 2003). Como respuesta al choque de temperatura, *C. jejuni* posee 24 proteínas que se encargan de “defenderse” de los incrementos de temperatura (Ramírez *et al.* 2012). Así, se ha demostrado que en algunas cepas de *C. jejuni* expuestas a 46 °C se induce una severa reducción en su crecimiento, haciendo imposible su aislamiento de las heces de pollos infectados. Dichos hallazgos indican que estas proteínas juegan roles diferentes tanto en la termo-tolerancia como en la colonización del intestino del hospedero (Brás *et al.* 1999). Por otro lado, *C. jejuni* puede sobrevivir a temperaturas bajas como 4 °C, y aunque no se puede replicar, sí puede llevar procesos de generación de ATP (energía), síntesis proteica y actividad de catalasa (capacidad de la enzima catalasa para descomponer el peróxido de hidrógeno en sustancias menos reactivas o inofensivas) (Ramírez *et al.* 2012).

La comunicación química entre bacterias de *C. jejuni* y su capacidad de moverse

Fernández y Alonso (2010) definen la quimiotaxis como un sistema de transducción de señales que posee *C. jejuni* para detectar estímulos ambientales y así responder a ellos con diferentes acciones como desplazamiento. Otras moléculas y compuestos por los cuales *C. jejuni* realiza quimiotaxis son la L-Fructosa y la bilis, destacando la capacidad que tienen algunas especies de *Campylobacter* para colonizar la vesícula biliar en algunos animales (Ramírez *et al.* 2012).



Por otro lado, *C. jejuni* se moviliza utilizando uno o dos flagelos bipolares que hacen más fácil la colonización de células humanas. Esta bacteria necesita de los flagelos para infectar el intestino delgado y para trasladarse hasta el colon. El flagelo está formado por el cuerpo basal, el gancho y el filamento. Este último está compuesto por dos proteínas flagelina, la más grande denominada FlaA y una flagelina de menor tamaño FlaB que son codificadas por los genes *flaA* y *flaB*, respectivamente (Cróinin, 2012). La flagelina glicosilada es pieza fundamental en la aproximación y adherencia a las células del epitelio intestinal.

La capacidad de adhesión de C. jejuni al intestino es el primer paso para invadir y colonizar

Después de que ocurre la ingestión de la bacteria, *C. jejuni* invade el epitelio del intestino delgado y el colon, que es dependiente de la motilidad mediada por flagelos polares y adhesinas de la membrana externa como PEB1a, PEB3, MOMP y CadF (Yasmin, 2016). Por lo tanto, los ligandos bacterianos (moléculas producidas por bacterias) que están expuestos a la superficie juegan un papel importante en la medición de la adhesión e invasión (Mahdavi et al. 2014). Se sabe que existe una relación entre la gravedad de los síntomas clínicos y el grado a que los aislados de dicha bacteria se adhieren a las células cultivadas. Dasti et al. (2010) reportaron que se han usado una variedad de células de origen humano y no humano para poder caracterizar la interacción de *C. jejuni* con células hospederas, demostrando que las líneas celulares del epitelio intestinal humano denominadas INT407 y CaCo⁻² son buenos modelos para imitar las condiciones encontradas por *C. jejuni in vivo*. Como resultado, se han identificado factores de adhesión o unión de *C. jejuni*, incluyendo la proteína de membrana externa de unión a fibronectina CadF, la proteína de unión periplásmica PEB1 y la lipoproteína JlpA expuesta a la superficie. CadF es expresada por todas las cepas de *C. jejuni* y *C. coli*, y regula la adhesión celular uniéndose a la proteína de la matriz fibronectina. Por lo tanto, CadF se puede confirmar como un factor de total importancia asociado a la patogenicidad (Krause et al. 2007).

Por otra parte, debido a que *Campylobacter* no cuenta con otros sistemas de secreción como otras bacterias entéricas, en la invasión participan las proteínas Cia (antígenos de invasión) que son secretadas por el filamento del flagelo. CiaB es la proteína principal para la internalización de la célula epitelial. Estas proteínas están involucradas en el reclutamiento de estructuras de la célula huésped (Konkel et al. 2004).

La toxicidad de C. jejuni

Se considera que la CDT es uno de los factores de virulencia más importantes que posee *C. jejuni* puesto que actúa directamente sobre los enterocitos (células del tracto gastrointestinal), induciendo la interrupción del ciclo celular en la fase G2 de la mitosis y provocando la muerte celular y la activación de la respuesta inflamatoria. En realidad, CDT es un complejo de tres toxinas: CdtA, CdtB y CdtC (González *et al.*, 2014). Estas toxinas se unen a la membrana de las células del hospedero y finalmente dañan el ADN. La CdtB es la subunidad activa, mientras que CdtA y CdtC son componentes de unión. Sin embargo, CdtB induce a la célula del epitelio a secretar IL-8 (interleucina proinflamatoria) que interviene en el proceso inflamatorio (Fernández y Alonso, 2010).

Respuesta inmune (defensa) contra C. jejuni

La infección por *C. jejuni* provoca gastroenteritis, diarrea o disentería. El origen de la disentería se da por la inflamación de la mucosa del colon. Hu *et al.* (2012) indicaron que la respuesta de las quimiocinas (proteínas pequeñas que actúan como señales químicas atrayendo a ciertos tipos de células hacia lugares específicos del cuerpo) de la mucosa intestinal es importante en las primeras etapas de la inflamación causada por bacterias. Las quimiocinas atraen a los fagocitos y linfocitos de la sangre al lugar de infección, regulando así la maduración de los leucocitos y el desarrollo de tejidos linfoides locales. Las familias de quimiocinas CC (quimiocinas con cisteínas adyacentes, implicadas en la inflamación crónica, alergias y enfermedades autoinmunes) y CXC (quimiocinas con cisteínas separadas por un aminoácido, atraen principalmente neutrófilos y promueven la formación de vasos sanguíneos) juegan un papel importante en la interacción bacteria-hospedero (Liao, 1995). Las quimiocinas CXC incluyen interleucina-8 (IL-8), oncogén- α relacionado con el crecimiento, proteína 10 inducible por interferón gamma (IFN- γ) y monoquina. La IL-8 y el oncogén alfa atraen principalmente a los neutrófilos a los sitios de inflamación. La proteína 10 inducible por IFN- γ y MIG (monokin induced by IFN-Gamma) promueven la quimiotaxis de monocitos y linfocitos T activados in vivo (células del sistema inmune) (Fig. 3) (Hu *et al.* 2012).

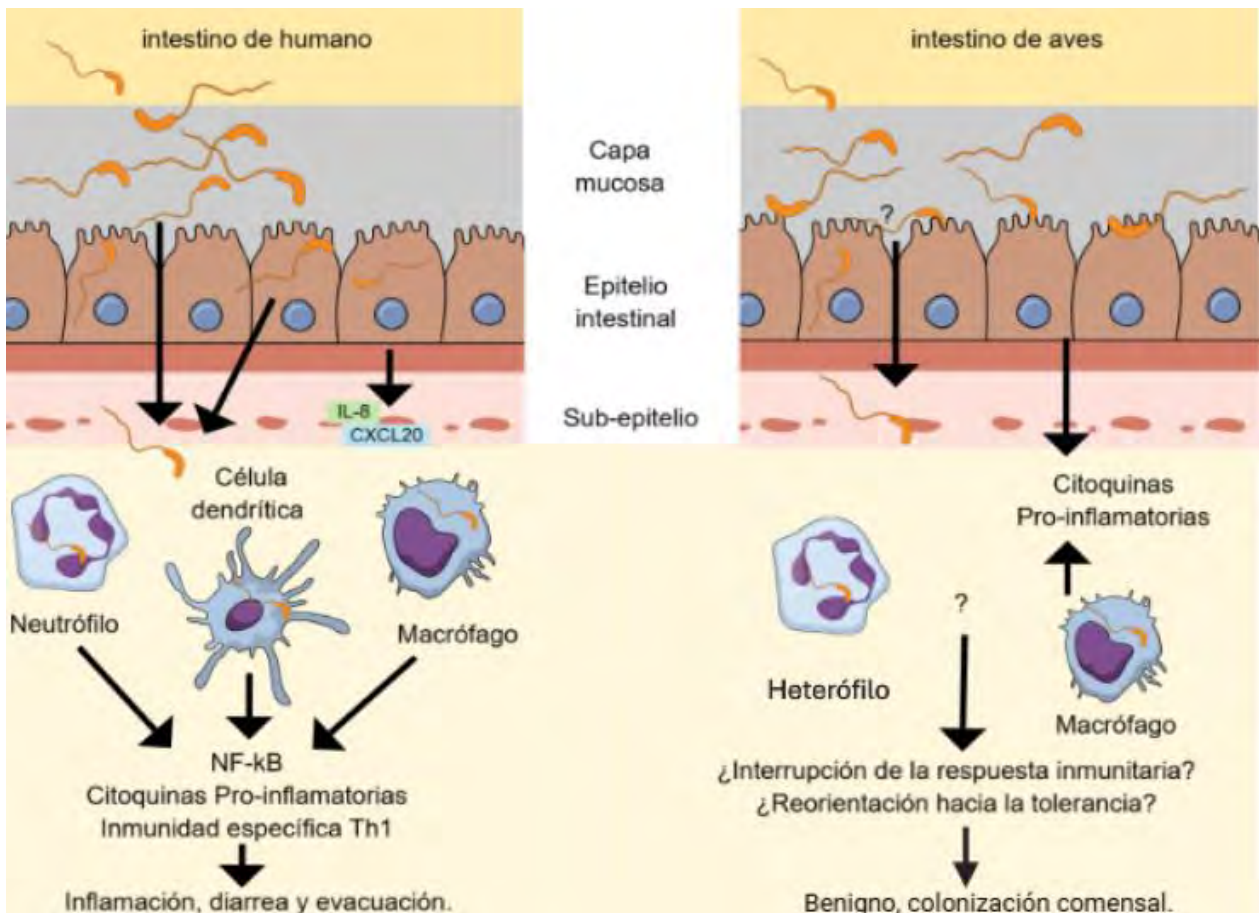


Figura 3. Patogénesis de *Campylobacter jejuni* en el tracto gastrointestinal en ser humano y aves. Ruta y cascada de señalización provocada por la detección de *C. jejuni* por el sistema inmune.

C. jejuni ha desarrollado estrategias que esquivan el reconocimiento por parte de receptores, evitando la inducción de la respuesta inmune. Así el receptor TLR5 (Toll-Like-Receptor 5: reconoce moléculas particulares presentes en los flagelos denominadas flagelina) y PRR (Receptores de Reconocimiento de Patrones) que reconocen regiones conservadas en la flagelina, no son estimulados por *C. jejuni* gracias a la modificación que esta hace en la estructura de su proteína flagelina (Andersen et al. 2005). Estudios en deficiencia de MyD88 (molécula crucial en la cascada de señalización de los Receptores tipo Toll o por sus siglas en inglés Toll Like Receptors) revelaron ser susceptibles a *C. jejuni* indicando que esta ruta es importante para la defensa del microorganismo (Fig. 4) (Van Putten et al. 2009).

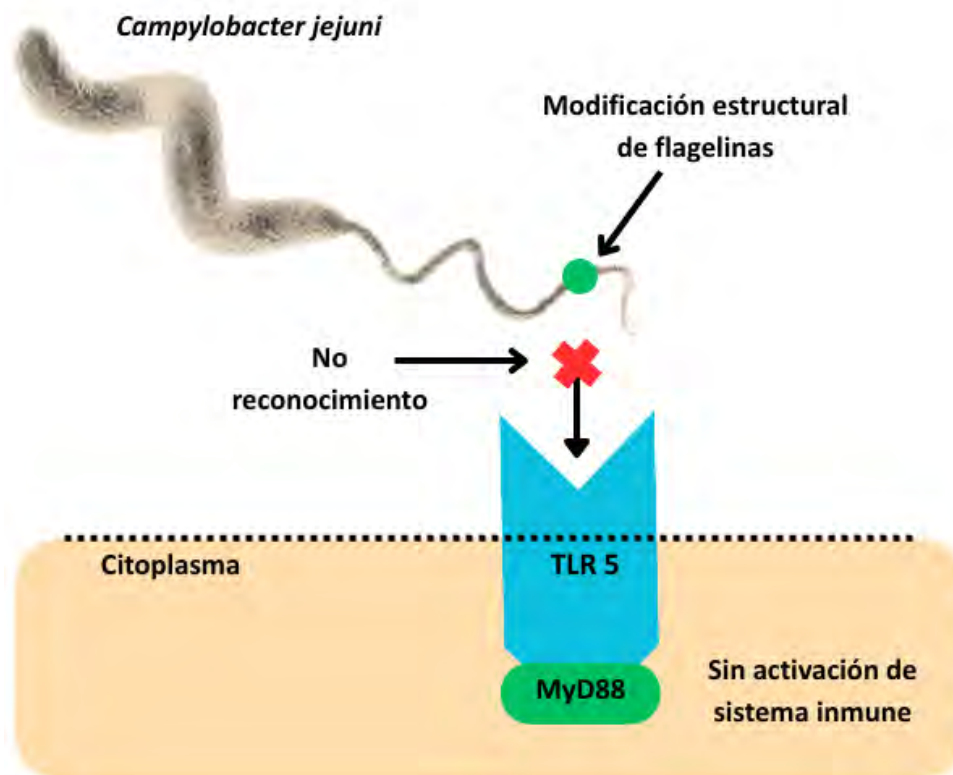


Figura 4. Estrategia de *Campylobacter jejuni* para esquivar el reconocimiento de receptores (TLRs). *C. jejuni* modifica la estructura de sus flagelinas haciendo que el receptor TLR 5 no pueda reconocerlo y no es detectado por el sistema inmune.

Otro tipo de mecanismo son los receptores de tipo NOD (Nucleotide-binding Oligomerization Domain). Son un grupo de receptores de reconocimiento de patrones intercelulares (PRRs) encargados de reconocer componentes del peptidoglicano bacteriano cuya expresión provoca un descenso en la viabilidad de *Campylobacter* dentro de las células. El reconocimiento por parte del epitelio desencadena una respuesta proinflamatoria que da como resultado la producción de un gran repertorio de citocinas, quimiocinas y moléculas efectoras del sistema inmune innato (primera línea de defensa contra patógenos caracterizada por ser una respuesta rápida y específica) (Zilbauer *et al.* 2007). Por otro lado, la respuesta inmune adaptativa (segunda línea de defensa contra patógenos, caracterizada por ser específica y tener memoria), aunque es más tardía, es igualmente necesaria. En este punto es donde la función de las células dendríticas enlazando la respuesta inmune innata y adaptativa toma importancia. Las células dendríticas producen IL-1 β , IL-6, IL-8, IL-10 y altos niveles de IL-12 (citoquinas proinflamatorias) tras la internalización de la bacteria, indicando la activación de una respuesta adaptativa Th1 polarizada (tipo de respuesta inmune mediada por células T Helper especializadas en infecciones intracelulares) (Van Putten *et al.* 2009).



Después de contrarrestar a *Campylobacter* por el sistema inmune innato y la producción de citoquinas proinflamatorias, se genera una respuesta inmune adaptativa dirigida a eliminar el patógeno. La inmunidad humoral es pieza clave para el desarrollo de protección contra la infección. Después de la segunda semana de infección, los niveles de Inmunoglobulinas A (IgA), M y G llegan al máximo, aunque rápidamente decaen (aproximadamente 1 mes) en el caso de IgA, sugiriendo su importancia en el inicio de la infección. Después del descenso, la IgA sigue a la IgM e IgG que pueden mantenerse circunstanciales por 3 meses y un año respectivamente (Janssen *et al.* 2008).

Discusión

Diseño de vacunas contra Campylobacter jejuni

En *C. jejuni*, el estudio de los factores de virulencia y las proteínas involucradas en la patogénesis (proceso por el cual las bacterias enferman a un organismo) ha permitido el diseño y desarrollo de vacunas. Las vacunas son uno de los productos farmacéuticos con más aplicación y rentabilidad para la prevención de enfermedades. Se ha demostrado que la inmunización (vacunación) contra agentes infecciosos induce inmunidad (protección), dando como resultado una disminución en las tasas de mortalidad y morbilidad. En la actualidad, el desarrollo de vacunas se ha apoyado de un nuevo enfoque llamado: posgenómica. La era posgenómica es la representación de una nueva etapa en la investigación biológica que busca la comprensión de la función de los genes y sus productos (proteínas). Algunas proteínas en los patógenos, como *C. jejuni*, les permite sobrevivir y causar enfermedad, por lo que el uso de herramientas científicas de la posgenómica permite la determinación de proteínas (antígenos), y regiones específicas (epítomos) dentro de ellas, que son reconocidas por el sistema inmune para estimular una respuesta defensiva (Zheng *et al.* 2018). Existen programas computacionales que pueden predecir antígenos y epítomos de patógenos. En este sentido, Dhanda y colaboradores en el 2017 mencionan que la inmunoinformática *in silico* (combinación de inmunología, informática y biología computacional, la cual tiene como fin el estudio del sistema inmune) puede ayudar al desarrollo de nuevas vacunas. Dadas las características biológicas, bioquímicas y estructurales de las biomoléculas de los diferentes patógenos que afectan a humanos y animales, no existe una estrategia exacta o base para el diseño de vacunas. Sin embargo, se han desarrollado vacunas basadas en epítomos, que son las regiones de un antígeno (proteína) que pueden ser reconocidas por un anticuerpo, específicamente en la región conocida como parátomo, cuya interacción induce respuestas inmunes humorales en el caso

de células B o citotóxicas en el caso de células T. Estas respuestas generadas por los antígenos o epítomos pueden producir efectos tanto profilácticos (capacidad preventiva para evitar o reducir la gravedad de una enfermedad) o terapéuticos (curar una enfermedad). Parvizpour *et al.* (2020) explican que los pasos clave en el diseño de vacunas basadas en epítomos son: (1) la predicción de las regiones inmunogénicas (epítomos) de proteínas *in silico*, (2) la ingeniería de la construcción inmunogénica, y (3) la evaluación de la eficiencia de la vacuna. A este proceso se le conoce como inmunoinformática. Yasmin *et al.* (2016) identificaron epítomos de *C. jejuni* y propusieron una vacuna utilizando diversas proteínas relacionadas con la invasión, virulencia y funciones de la membrana externa como son FlaA, Cia, CadF, PEB1, PEB3 y OMP. Los autores reportaron que algunos epítomos de células B fueron prometedores para el desarrollo de una vacuna de nueva generación que indujera la producción de anticuerpos. En cambio, otros epítomos podrían inducir inmunidad (protección) por medio de células citotóxicas, e inclusive un epítomo (“IFYTTGSRL”) de la proteína (Outer Membrane Protein, del inglés, OMP) podría inducir la protección a través de la producción de anticuerpos y células citotóxicas del cuerpo. Todos estos epítomos peptídicos potenciales mostraron casi un 80-100 % de conservación en diferentes cepas de *C. jejuni* con proporciones variables de cobertura de población que oscilan entre el 22 y el 60%. Los autores concluyeron que los epítomos predichos se pueden emplear en el diseño de una vacuna contra *C. jejuni*.

Por otro lado, Sun *et al.* (2013) reportaron otros epítomos de células B para inducir la producción de anticuerpos y un epítomo que estimula a células citotóxicas, los cuales fueron capaces de proteger a cerdos contra desafíos infecciosos subletales (situación que expone a un organismo a estrés prolongada sin llegar a la muerte) y letales con diferentes cepas del virus de la influenza. Por lo tanto, estos epítomos podrían ser candidatos para el desarrollo de una vacuna multiepitópica, que es una vacuna compuesta de múltiples epítomos. Un aspecto importante para considerar es que las vacunas elaboradas con proteínas y epítomos tienen baja capacidad de estimular el sistema inmune comparadas con vacunas fabricadas con patógenos vivos o debilitados. Este desafío de las vacunas basadas en epítomos puede ser superado combinando los epítomos selectos con adyuvantes (sustancias que se añaden a una vacuna para potenciar la respuesta inmune). Por ejemplo, la enterotoxina termolábil (LT) producida por *E. coli* es un adyuvante muy eficaz, el cual se ha utilizado, con resultados prometedores, para la mejora de las respuestas inmunitarias de las mucosas hacia diferentes patógenos. Para limitar la enterotoxina de LT se utiliza la subunidad B no tóxica (LTB por sus siglas en inglés), como molécula portadora o adyuvante para el acoplamiento químico o genético a antígenos (Zhang *et al.* 2010).



Como primer paso para el desarrollo de una vacuna multiepitópica, Sun *et al.* (2013) adaptaron LTB como adyuvante para la mejora de la respuesta inmune de un antígeno basado en epítomos que comprende un conjunto de epítomos del virus de la influenza A. Otro punto importante en el diseño de vacunas multiepitópicas son los enlazadores que unen ya sea al adyuvante con la secuencia de epítomos o bien entre epítomos para evitar que se formen moléculas no deseadas. Guo *et al.* (2014) utilizaron un segmento de siete aminoácidos que contiene prolina (DPRVPSS) como espaciador en los sitios de enlace CTB-UE (subunidad de toxina del cólera y epítomos de subunidades A y B de la ureasa de *H. pylori*) para disminuir la interacción entre ellos. Seleccionaron KK (dos aminoácidos lisinas) como enlazador de epítomos de células Th y GS (aminoácidos Glicina y Serina) como enlazador de epítomos de células B. Estos fueron diseñados para evitar la competencia inmunológica de cada epítomo Th o B y así eliminar la posibilidad de generar nuevos epítomos en los sitios de enlace (sitios de unión) de las secuencias. Este prototipo de vacuna fue empleado en la inmunización de ratones BALB/c.

Esfuerzos del CIBNOR en el desarrollo de una vacuna contra *Campylobacter jejuni*

En el grupo de Inmunología y Vacunología del CIBNOR se desarrolla un candidato vacunal basado en una extensa búsqueda en la literatura acerca de la biología, patogénesis e importancia de *C. jejuni*, así como también enfermedades relacionadas y métodos de control. Para esta propuesta, las proteínas de *C. jejuni* fueron seleccionadas de acuerdo con la relación de los factores de virulencia del patógeno. Para el diseño, las proteínas FlaA, pFla, CadF, PEB3, CdtB y CdtC fueron analizadas por programas predictores de epítomos de células B. Como resultado de las predicciones, se obtuvieron 259 epítomos. Estos fueron sometidos a análisis de antigenicidad, propiedades alergénicas y toxicidad. Como siguiente paso, se realizó un tamizaje de epítomos siguiendo 4 criterios. Como resultado, se obtuvieron 15 epítomos candidatos vacunales.

Después del último tamizaje, se realizaron dos diseños, el diseño uno constituido por 1 epítomo de cada proteína (FlaA, pFla, CadF, PEB3, CdtB y CdtC) y el diseño 2 con los 15 epítomos candidatos. Por último, se realizaron predicciones de estructuras secundarias, terciarias y análisis fisicoquímico de los diseños vacunales construidos.

Consideraciones finales y perspectivas en el CIBNOR

Con el fin de generar una metodología estandarizada y una capacidad de análisis mayor, se recomienda utilizar diversos programas de predicción de antígenos, así como incluir el estudio de más proteínas y sus epítomos de cada patógeno. La inmunoinformática y sus herramientas permiten diseñar vacunas para posteriormente hacer evaluaciones en animales. Este enfoque asistido por computadoras ha demostrado una reducción de costos y tiempo para el diseño y desarrollo de vacunas. En el CIBNOR, se ha avanzado en la estandarización de una plataforma para el diseño de vacunas en computadora, y con base en ello, se ha evaluado, en modelos animales, la capacidad para inducir una respuesta inmune de algunos prototipos de vacunas. En particular, utilizando el enfoque de diseño de vacunas en computadora asistido con programas inmunoinformáticos, se han identificado proteínas implicadas en los factores de virulencia de *C. jejuni*, y epítomos con potencial inmunogénico. Ambos modelos presentaron antigenicidad alta, lo que coincide con la literatura acerca de sus proteínas base, prediciendo no ser alérgenos y presentar toxicidad nula. La perspectiva es producir estos prototipos vacunales en microalgas y posteriormente evaluar su capacidad de inducir una respuesta inmune en pollos de engorda.

Conclusiones

Campylobacter jejuni es una bacteria patógena que impacta significativamente la industria avícola, especialmente en la producción de pollo y huevo. Este problema ha impulsado el desarrollo de vacunas, destacándose los prototipos basados en proteínas (y epítomos) que permiten a *C. jejuni* sobrevivir y causar enfermedad en su hospedero. En el Grupo de Inmunología y Vacunología del CIBNOR, hemos empleado un enfoque de diseño computacional asistido por programas inmunoinformáticos, para identificar proteínas implicadas en los factores de virulencia, y epítomos con potencial inmunogénico. La meta es desarrollar un candidato vacunal prometedor, que prevenga la infección mediante una plataforma biotecnológica de bajo costo, como las microalgas, y que pueda ser implementado en el sector productivo, beneficiando así a la sociedad.



Agradecimientos

Al CONACHCYT (SECIHTI) por la beca otorgada (CVU-1319915) y al financiamiento del proyecto 70087 (E-ME) COSCYT 2023. A mi familia, amigos y al Grupo de Inmunología y Vacunología (GIV) por todo su apoyo y conocimiento compartido.

Literatura citada

- Andersen-Nissen, E., K.D. Smith, K.L. Strobe, S.L. Barrett y B.T. Cookson. 2005. *Evasion of Toll-like receptor 5 by flagellated bacteria*. Proceedings of the National Academy of Sciences. U S A 102(26): 9247–9252.
- Behringer, M., W.G. Miller y O.A. Oyarzabal. 2011. *Typing of Campylobacter jejuni and Campylobacter coli isolated from live broilers and retail broiler meat by flaA-RFLP, MLST, PFGE and REP-PCR*. Journal of Microbiological Methods 84(2): 194–201.
- Blaser, M.J., y B.M. Allos. 2005. Principles and practice of infectious diseases. Elsevier Philadelphia: Churchill Livingstone 2548–2557.
- Brás, A.M., S. Chatterjee, B.W. Wren, D.G. Newell y J.M. Ketley. 1999. *A novel Campylobacter jejuni two-component regulatory system important for temperature dependent growth and colonization*. Journal of Bacteriology. American Society for Microbiology 181(10): 3298–302.
- Cervantes, G.E., y Q.A. Cravioto. 2007. “Campylobacter y enfermedades asociadas”. Revista de Facultades Medicas UNAM 50:31–35.
- Cohen, E.J., D. Nakane, Y. Kabata, D.R. Hendrixson, T. Nishizaka y M. Beeby. 2020. *Campylobacter jejuni motility integrates specialized cell shape, flagellar filament, and motor, to coordinate action of its opposed flagella*. PLoS Pathogens 16(7): e1008620.
- Cróinin, T., y S. Bakert. 2012. *Host epithelial cell invasion by Campylobacter jejuni: trigger or zipper mechanism?* Frontiers in Cellular and Infection Microbiology 2: 25.
- Dasti, J.I., A.M. Tareen, R. Lugert, A.E. Zautner, y U. Groß. 2010. *Campylobacter jejuni: a brief overview on pathogenicity-associated factors and disease-mediating mechanisms*. International Journal of Medical Microbiology 300(4): 205–211.

- De la Calle Rodríguez, N., C. Santa Vélez, y N. Cardona Castro. 2012. *Factores de virulencia para la infección de tejidos queratinizados por Candida albicans y hongos dermatofitos*. CES Medicina 26(1): 43–55.
- Dhanda, S.K., S.S. Usmani, P. Agrawal, G. Nagpal, A. Gautam y G.P.S. Raghava. 2017. *Novel in silico tools for designing peptide-based subunit vaccines and immunotherapeutics*. Briefing in Bioinformatics 18(3): 467–478.
- Dhillon, A.S., H.L. Shivaprasad, D. Schaberg, F. Wier, S. Weber y D. Bandli. 2006. *Campylobacter jejuni Infection in broiler chickens*. Avian Diseases 50(1): 55–58.
- EFSA .2015. *Informe resumido de la Unión Europea sobre tendencias y fuentes de zoonosis, agentes zoonóticos y brotes transmitidos por alimentos en 2013*. European Food Safety Authority Journal 13 (1): 3991.
- EFSA (European Food Safety Authority) and ECDC (European Centre for Disease Prevention and Control) .2014. *The European Union Summary Report on Trends and Sources of Zoonoses, Zoonotic Agents and Food-borne Outbreaks in 2012*. European Food Safety Authority Journal 12: 3547.
- Fernández, A., y R. Alonso. 2010. *Molecular detection of foodborne pathogens* . En: Liu, D., (Ed.), United States of America: Taylor& Francis Group 345–360.
- Forsythe, S.J. 2000. *The microbiology of safe food (food poisoning microorganisms)*. Wiley, Europe, London 142–192.
- Gabbert, A.D., J.L. Mydosh, P.K. Talukdar, L.M. Gloss, J.E. McDermott, K.K. Cooper, G.C. Clair, y M.E. Konkel. 2023. *The missing pieces: The role of secretion systems in Campylobacter jejuni virulence*. Biomolecules 13(1): 135.
- González-Hein, G., B. Huaracán, P. García, y G. Figueroa. 2014. *Prevalencia de genes de virulencia en cepas de Campylobacter jejuni aisladas de humanos, bovinos y pollos de engorde*. Revista Brasileña de Microbiología 44(4): 1223–1229.
- Gorain, C., A. Singh, S. Bhattacharyya, A. Kundu, A. Lahiri, S. Gupta y A.I. Mallick. 2020. *Mucosal delivery of live Lactococcus lactis expressing functionally active JlpA antigen induces potent local immune response and prevent enteric colonization of Campylobacter jejuni in chickens*. Vaccine 38: 1630–1642.



- Guo, L., R. Yin, K. Liu, X. Lv, Y. Li, X. Duan, Y. Chu, T. Xi y Y. Xing. 2014. *Immunological features and efficacy of a multi epitope vaccine CTB-UE against H. pylori in BALB/c mice model*. Applied Microbiology and Biotechnology 98: 3495–3507.
- Hara-Kudo, Y., y K. Takatori. 2011. *Contamination level and ingestion dose of foodborne pathogens associated with infections*. Epidemiology and Infection 139: 1505–1510.
- Hernández Cortez, C., M.G. Aguilera Arreola y G. Castro Escarpulli. 2011. *Situación de las enfermedades gastrointestinales en México*. Enfermedades Infecciosas y Microbiología 31: 138.
- Hofreuter, D., V. Novik y J.E. Galán. 2008. *Metabolic diversity in Campylobacter jejuni enhances specific tissue colonization*. Cell Host Microbe 4: 425–433.
- Hoppe, S., F.F. Bier, y M.V. Nickisch-Rosenegk. 2013. *Rapid identification of novel immunodominant proteins and characterization of a specific linear epitope of Campylobacter jejuni*. PloS one 8(5): e65837.
- Hu, L., M.D. Bray, Y. Geng y D.J. Kopecko. 2012. *Campylobacter jejuni mediated induction of CC and CXC chemokines and chemokine receptors in human dendritic cells*. Infection and Immunity 80(8): 2929–2939.
- Inglis, G.D., N. Ramezani, E.N. Taboada, V.F. Boras y R.R.E. Uwiera. 2021. *Analysis of Campylobacter jejuni subtype distribution in the chicken broiler production continuum: A longitudinal examination to identify primary contamination points*. Applied and Environmental Microbiology 87(3): e02001-20.
- Janssen, R., K.A. Krogfelt, S.A. Cawthraw, W. van Pelt, J.A. Wagenaar y R.J. Owen. .2008. *Host-pathogen interactions in Campylobacter infections: The host perspective*. Clinical Microbiology Reviews 21(3): 505–518.
- Kaakoush, N.O., N. Castaño-Rodríguez, H.M. Mitchell, y S.M. Man. 2015. *Global epidemiology of Campylobacter infection*. Clinical Microbiology Reviews 28(3): 687–720.
- Koga, M., M. Gilbert, J. Li y N. Yuki. 2015. *Complex of GM1- and GD1a-like lipo-oligosaccharide mimics GM1b, inducing anti-GM1b antibodies*. PloS One 10(4): e0124004.
- Konkel, M.E., J.D. Klena, V. Rivera-Amill, M.R. Monteville, D. Biswas, B. Raphael, y J. Mickelson. 2004. *Secretion of virulence proteins from Campylobacter jejuni is dependent on a functional flagellar export apparatus*. Journal of Bacteriology 186(11): 3296–3303.

- Krause-Gruszczynska, M., M. Rohde, R. Hartig, H. Genth, G. Schmidt, T. Keo, W. Konig, W.G. Miller, M.E. Konkel, y S. Backert. 2007. *Role of small Rho GTPases Rac1 and Cdc42 in host cell invasion of Campylobacter jejuni*. Cellular Microbiology 9: 2431–2444.
- Lapierre, L. 2013. *Factores de virulencia asociados a especies zoonóticas de Campylobacter spp.* Avances en Ciencias Veterinarias 28(1): 1–7.
- Liao, F., R. Rabin y J.M. Farber. 1995. *Human mig chemokine: biochemical and functional characterization*. Journal Experimental Medicine 182: 1301–1314.
- Mahdavi, J., N. Pirinccioglu, N.J. Oldfield, E. Carlsohn, J. Stoof, A. Aslam, T. Self, S.A. Cawthraw, L. Petrovska, N. Colborne, C. Sihlbom, T. Boren, K.G. Wooldridgey D.A. Ala'Aldeen. 2014. *A novel O-linked glycan modulates Campylobacter jejuni major outer membrane protein-mediated adhesion to human histo-blood group antigens and chicken colonization*. Open Biology 4:130202.
- Mendoza-Hernández, D., L.B. Galicia y J.A.G. Hernández. 2010. *Síndrome de Guillain-Barré*. Alergia, Asma e Inmunología Pediátricas 19 (2): 56–63.
- Meunier, M., M. Guyard-Nicodème, E. Vigouroux, T. Poezevara, V. Beven, S. Quesne, L. Bigault, M. Amelot, D. Dory y M. Chemaly. 2017. *Promising new vaccine candidates against Campylobacter in broilers*. PloS One 12(11): e0188472.
- Murphy, C., C. Carroll y K.N. Jordan. 2003. *Identification of a novel stress resistance mechanism in Campylobacter jejuni*. Journal of Applied Microbiology 95(4):704–708.
- Neal-McKinney, J.M., D.R. Samuelson, T.P. Eucker, M.S. Nissen, R. Crespo, y M.E. Konkel. 2014. *Reducing Campylobacter jejuni colonization of poultry via vaccination*. PLoS One 9(12): e114254.
- Negretti, N.M., Y. Ye, L.M. Malavasi, S.M. Pokharel, S. Huynh, S. Noh, C.L. Klima, C.R. Gourley, C.A. Ragle, S. Bose, T. Looft, C.T. Parker, G. Clair, J.N. Adkins, y M.E. Konkel. 2020. *A porcine ligated loop model reveals new insight into the host immune response against Campylobacter jejuni*. Gut Microbes 12(1): 1–25.
- Organización Mundial de la Salud. 2020. *Campylobacter*. En: <https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/campylobacter> (consultado el 20/05/2021).
- Parvizpour, S., M.M. Pourseif, J. Razmara, M.A. Rafi y Y. Omid. .2020. *Epitope-based vaccine design: a comprehensive overview of bioinformatics approaches*. Drug Discovery Today 25(6): 1034–1042.



- Ramírez, R.Y., B. Klotz, J. Romero y F. Garcés. 2012. *Perfil de riesgo de Campylobacter spp. en pollos de engorde*. Instituto Nacional de Salud. Unidad de Evaluación de Riesgos para la Inocuidad de los Alimentos. Ministerio de Salud y Protección Social Bogotá, Colombia 156p.
- Rojas-Jaimes, J., A. Diaz-Tello y M. Kerrigan. 2019. *Crecimiento in vitro y morfología inusual de Campylobacter aislada de un paciente con bacteriemia*. CES Medicina 33(2): 144–150.
- Rosenquist, H., H.M. Sommer, N.L. Nielsen y B.B. Christensen. 2006. The effect of slaughter operations on the contamination of chicken carcasses with thermotolerant *Campylobacter*. International Journal of Food Microbiology 108(2): 226–32.
- Sahin, O., N. Luo, S. Huang y Q. Zhang. 2003. *Effect of Campylobacter-specific maternal antibodies on Campylobacter jejuni colonization in young chickens*. Applied and Environmental Microbiology 69(9): 5372–5379.
- Shrestha, R.D., A. Agunos, S.P. Gow y C. Varga. 2023. *Assessing antimicrobial resistance in Campylobacter jejuni and Campylobacter coli and its association with antimicrobial use in Canadian turkey flocks*. Epidemiology and Infection 151: e152.
- Snelling, WJ., M. Matsuda, J.E. Moore y J.S. Dooley. 2005. *Campylobacter jejuni*. Letters in Applied Microbiology 41(4): 297–302.
- Sun, Z., S. Lawson, R. Langenhorst, K.L. McCormick, C. Brunick, T. Opriessnig y Y. Fang. 2013. *Construction and immunogenicity evaluation of an epitope based antigen against swine influenza A virus using Escherichia coli heat-labile toxin B subunit as a carrier-adjuvant*. Veterinary Microbiology 164(3-4): 229–238.
- Van Putten, J.P., L.B. van Alphen, M.M. Wosten y M.R. de Zoete. 2009. *Molecular mechanisms of Campylobacter infection*. Current Topics in Microbiology and Immunology 337: 197–229.
- Vandamme, P., F. Dewhirst, E. De Brandt y E. Falsen. 2010. *Reclassification of Bacteroides ureolyticus as Campylobacter ureolyticus comb.nov., and emended description of the genus Campylobacter*. International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology 60(9): 2016–2022.
- Vandamme, P., y J. De Ley. 1991. *Proposal for a new family, Campylobacteraceae*. International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology 41: 451–455.
- Villagrán Padilla, C.L., y A.C. Ruiz Tagle. 2019. *Una mirada hacia el mundo bacteriano*. Benemérita Universidad Autónoma de Puebla; Facultad de Ciencias Químicas. Puebla, México.

- Yasmin, T., S. Akter, M. Debnath, A. Ebihara, T. Nakagawa y A.H. Nabi. 2016. *In silico proposition to predict cluster of B- and T-cell epitopes for the usefulness of vaccine design from invasive, virulent and membrane associated proteins of C. jejuni*. In silico Pharmacology 4(1): 5.
- Yuki, N., K. Susuki, M. Koga, Y. Nishimoto, M. Odaka, K. Hirata, K. Taguchi, T. Miyatake, K. Furukawa, T. Kobata y M. Yamada. 2004. *Carbohydrate mimicry between human ganglioside GM1 and Campylobacter jejuni lipooligosaccharide causes Guillain-Barre syndrome*. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America 101(31): 11404–11409.
- Zhang, W., y D.H. Francis. 2010. *Genetic fusions of heat-labile toxoid (LT) and heat-stable toxin b (STb) of porcine enterotoxigenic Escherichia coli elicit protective anti-LT and anti-STb antibodies*. Clinical and Vaccine Immunology 17: 1223–1231.
- Zhao, H., S. Yu, H. Liu, W. Si, C. Wang y S. Liu. 2012. *Identification of antigenic epitopes of the SapA protein of Campylobacter fetus using a phage display peptide library*. Research in Veterinary Science 93(3): 1274–1280.
- Zheng, Z., D. Diaz-Arévalo, H. Guan y M. Zeng. 2018. *Noninvasive vaccination against infectious diseases*. Human Vaccines & Immunotherapeutics 14(7): 1717–1733.
- Zilbauer, M., N. Dorrell, A. Elmi, K.J. Lindley, S. Schüller, H.E. Jones, N.J. Klein, G. Núñez, B.W. Wren y M. Bajaj-Elliott. 2007. *A major role for intestinal epithelial nucleotide oligomerization domain 1 (NOD1) in eliciting host bactericidal immune responses to Campylobacter jejuni*. Cellular Microbiology 9(10):2404–2416.

Semblanzas de los autores

- **Victor Hugo Hernández Ayala**

Es Ingeniero Bioquímico por el Instituto Tecnológico de La Paz, y actualmente Estudiante de Maestría en Ciencias en el Uso, Manejo y Preservación de los Recursos Naturales (Agricultura Sustentable) por el CIBNOR. Es miembro del Grupo de Inmunología y Vacunología del CIBNOR. Su interés de investigación se centra en el desarrollo y diseño de vacunas *in silico*. vhayala@pg.cibnor.mx, victor-ayala@hotmail.com



- **Dr. Carlos Angulo** <https://orcid.org/0000-0002-7965-1679>

Es Ingeniero Zootecnista por la Universidad Autónoma de Baja California Sur y Doctor en Ciencias en Uso, Manejo y Preservación de los Recursos Naturales (Biotecnología) por el CIBNOR. Actualmente es Investigador y miembro del Grupo de Inmunología y Vacunología del CIBNOR. Su interés de investigación se centra en el desarrollo de vacunas, probióticos e inmunoestimulantes para animales y seres humanos. Ha publicado más de 150 artículos en revistas JCR y formado más de 50 estudiantes de pregrado y posgrado. SNI nivel 3. eangulo@cibnor.mx

- **Dra. Reyna de Jesús Romero Geraldo** <https://orcid.org/0000-0002-3772-0592>

Es profesora e investigadora en el Instituto Tecnológico de La Paz, Baja California Sur, donde forma parte de la carrera de Ingeniería Bioquímica. Es doctora en Ciencias en Uso, Manejo y Preservación de los Recursos Naturales (Biotecnología) y cuenta con una destacada trayectoria académica y profesional centrada en áreas como biotecnología, bioquímica. Es líder del Cuerpo Académico consolidado en Salud Animal y Medio Ambiente, reconocido por PRODEP.

A lo largo de su carrera, ha contribuido significativamente al desarrollo de proyectos relacionados con la biotecnología aplicada y ha publicado diversos trabajos científicos en revistas especializadas. Su labor docente e investigadora está orientada a la formación integral de futuros ingenieros bioquímicos y al fortalecimiento de las capacidades científicas en su institución.

- **Dra. Elizabeth Monreal Escalante** <https://orcid.org/0000-0002-2798-6151>

Es Química Farmacobióloga, egresada de la UASLP, con maestría y doctorado en Ciencias en Bioprocesos también de la UASLP. Actualmente, es Investigadora por México-SECIHTI adscrita al CIBNOR, miembro del Grupo de Inmunología y Vacunología. Sus intereses de investigación están centrados en el diseño, análisis y evaluación de antígenos vacunales producidos en plantas y microalgas contra enfermedades infecciosas de interés regional. Ha publicado más de 50 artículos en revistas JCR y participa en la formación de alumnos de pregrado y posgrado. SNI nivel 2. emonreal@cibnor.mx

Cita

Hernández V., C. Angulo, E. Monreal Escalante, B. Bañuelos-Hernández y R. Romero.
Campylobacter jejuni: La batalla silenciosa de la ciencia para el diseño de nuevas vacunas.
Recursos Naturales y Sociedad, 2025. Vol. 11 (3): 179 - 203.
<https://doi.org/10.18846/renaysoc.2025.11.11.03.0011>.

Sometido: 24 de enero de 2025

Aceptado: 23 de septiembre de 2025

Editor asociado: Dr. Arturo Sánchez Paz

Editor ejecutivo: Dr. Arturo Sánchez Paz

Diseño gráfico editorial: Ing. Francisca Elizabeth Villegas Carrasco

Biocomposites: A new way to stabilize phage-derived enzymes

Biocompositos: Una nueva forma de estabilización de enzimas derivadas de fagos

Metzli G. Valencia-Zavala¹, Jorge A. Sánchez-Burgos¹,
César S. Cardona-Félix², María Z. Juárez-Cortés^{3*}

Resumen

Los biocompositos, materiales compuestos comúnmente por moléculas como alginato, quitosano y celulosa, han despertado gran interés debido a su potencial biodegradabilidad y sostenibilidad. Estos materiales pueden actuar como protectores de ciertas moléculas sensibles, protegiéndolas de cambios repentinos como la temperatura o el pH.

En el contexto referente a las moléculas sensibles, podemos hablar de las endolisinas, las cuales son moléculas provenientes de virus que infectan a bacterias, y que representan una alternativa prometedora en el combate contra las bacterias resistentes a los antibióticos. Sin embargo, su aplicación se ve limitada porque se degradan fácilmente, por lo que los biocompositos podrían ser un buen escudo protector.

Este artículo presenta ejemplos de aplicaciones y técnicas de protección, destacando su potencial en distintas áreas como en la producción de alimentos, agricultura, y la biomedicina, en el combate contra bacterias resistentes, abriendo oportunidades para el desarrollo de terapias innovadoras.

Palabras clave: Endolisina, biocomposito, composito, inmovilización, estabilidad de enzimas.

¹Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico de Tepic, Laboratorio Integral de Investigación en Alimentos, Av. Tecnológico No. 2595, Lagos del Country C.P. 63175, Tepic, Nayarit, Mexico.

²SECIHITI-Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste, Instituto Politécnico Nacional 195, La Paz, Baja California Sur, México.

³Instituto Politécnico Nacional-CICIMAR, Av. Instituto Politécnico Nacional S/N. Col. Playa Palo de Santa Rita, C.P. 23096, La Paz, Baja California Sur, México.

* Autor de correspondencia: marizu2704@gmail.com



Abstract

Biocomposites, materials commonly composed of molecules such as alginate, chitosan, and cellulose, have attracted considerable interest due to their potential biodegradability and sustainability. These materials can act as protectors of certain sensitive molecules, shielding them from sudden changes such as temperature or pH.

In the context of sensitive molecules, we can mention endolysins, which are molecules derived from viruses that infect bacteria and represent a promising alternative in the fight against antibiotic-resistant bacteria. However, their application is limited because they degrade easily, so biocomposites could be a good protective shield.

This article presents examples of applications and protection techniques, highlighting their potential in different areas such as food production, agriculture, and biomedicine, in the fight against resistant bacteria, opening up opportunities for the development of innovative therapies.

Keywords: Endolysin, biocomposite, composite, immobilization, enzyme stability.

1. Una superheroína molecular con necesidad de una armadura

Imagina una nueva superheroína molecular llamada “*endolisina*”, cuya misión es enfrentarse a las villanas más temidas, las bacterias. Estas bacterias, a diferencia de sus predecesoras, han desarrollado una resistencia formidable contra los superhéroes convencionales, los antibióticos, lo que está generando serios problemas de salud y costos económicos a nivel mundial (Fig. 1) (OMS, 2020).

Sin embargo, aunque la endolisina es capaz de combatir a estas bacterias resistentes, tiene sus propios puntos débiles: es vulnerable a los cambios bruscos de temperatura y pH (Maghraby *et al.* 2023). Para protegerla y garantizar que pueda cumplir su misión durante más tiempo, los científicos están diseñando una “armadura” especial. Este escudo podría estar compuesto por un elemento estrella, el compuesto, que actuaría como agente protector y estabilizador de la Endolisina (Chowdhury *et al.* 2020).

Esta analogía, en conjunto con la Figura 1, nos permite contextualizar este artículo, donde se explorará el papel crucial de los biocompositos en la protección de las endolisinas. Estos biocompositos, no sólo preservan las propiedades de las endolisinas, sino que también podrían potenciar sus cualidades, haciéndolas más estables y eficaces.

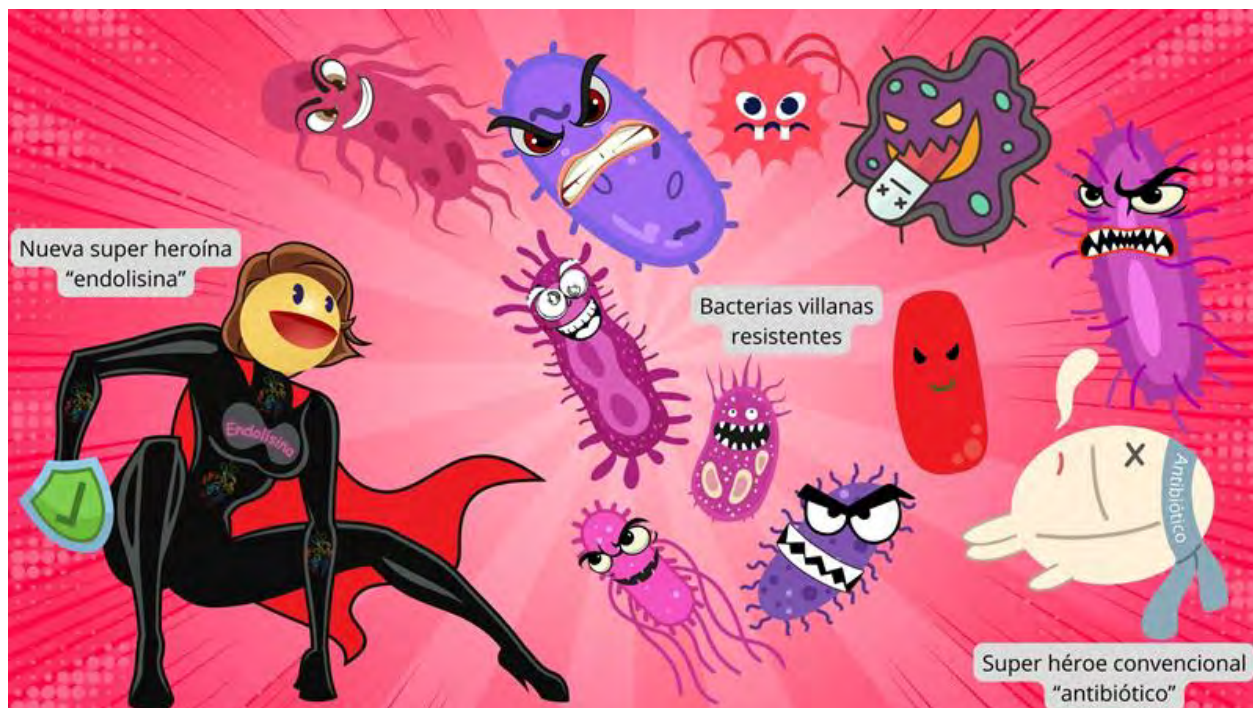


Figura 1. Nueva superheroína “endolisina”, combatiendo bacterias resistentes villanas que han acabado con el superhéroe convencional “antibiótico”.

2. Cuando los virus atacan a las bacterias: el origen de las endolisinas

Esta superheroína endolisina tiene su origen en el ciclo de vida de unos peculiares virus, llamados bacteriófagos o simplemente fagos. Su nombre hace referencia a sus características más distintivas: se centran en la caza de bacterias y que necesitan de una bacteria para poder reproducirse. Esto lo logran a través del reconocimiento de ciertas partes en las bacterias en donde se anclan, los cuales se encuentran en la superficie y pueden ser proteínas o azúcares. Las encargadas de reconocer estos sitios son unas proteínas especiales, llamadas de unión a receptores, que podemos encontrar en la cola del fago (Dunstan *et al.* 2021), y en particular en las fibras de la misma (Pas *et al.* 2023) (Fig. 2).

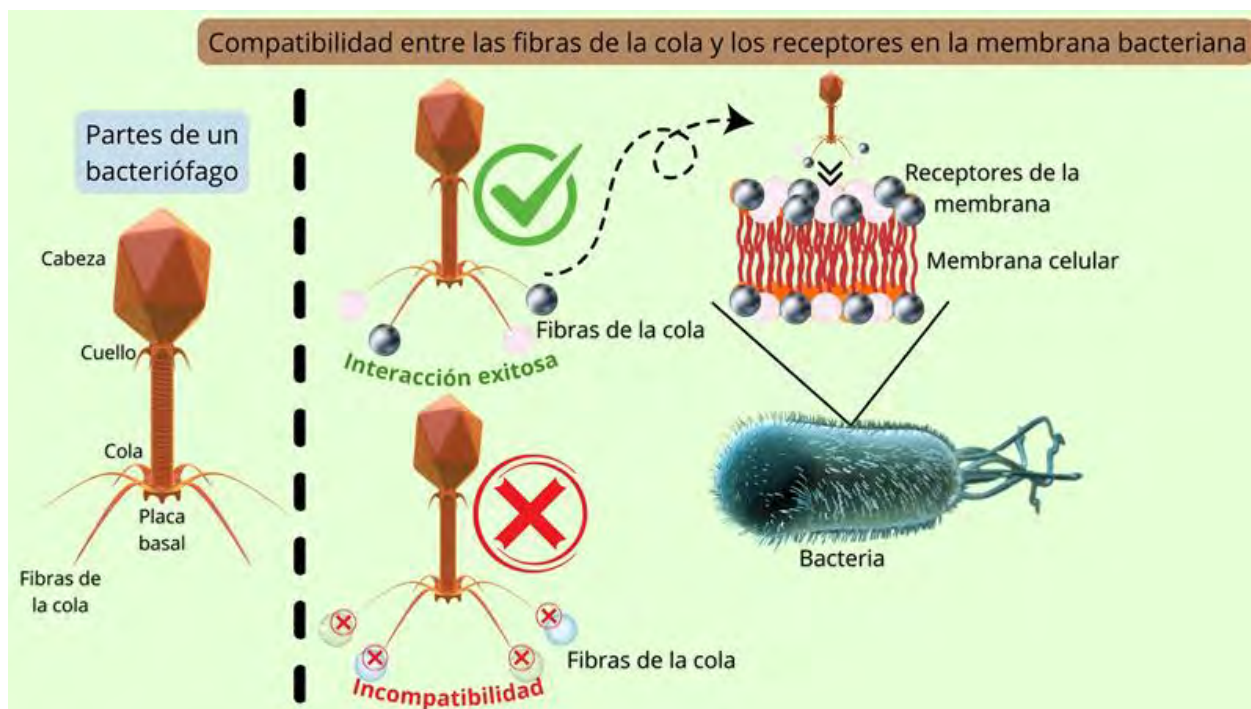


Figura 2. Partes de un bacteriófago y especificidad hacia ciertas bacterias.

Estos son considerados los microorganismos más abundantes en la Tierra (Brüssow y Kutter, 2005), por lo que podemos encontrarlos distribuidos en todos los ambientes, incluyendo los alimentos. Se encargan de regular el crecimiento de las poblaciones bacterianas, incluso se encuentran hasta en nuestro microbiota. Por lo tanto, estos virus no son dañinos para los humanos, animales o plantas (Gutiérrez Fernández *et al.* 2020). Esto gracias a que reconocen sitios muy específicos en la superficie de las bacterias, como las proteínas de membrana, que impide que estos ataquen a otro tipo de organismos (Clokier *et al.* 2011).

Los bacteriófagos, tras su descubrimiento en 1915 por Frederick W. Twort y 1917 por Félix d'Herelle, fueron rápidamente usados en contra de infecciones bacterianas en animales, seguido prontamente por su uso en humanos (Haddad Kashani *et al.* 2018). Durante su ciclo de vida, inyectan su material genético en las bacterias y las utilizan para multiplicarse. En la última fase de la infección, estos producen unas moléculas (enzimas) llamadas “*endolisinas*”, las cuales, tras su aparición, rompen un componente importante de la pared celular llamado “*peptidoglicano*”, que funciona como una barrera que da forma y protección a las bacterias. Al romperlo, la bacteria pierde resistencia, con lo cual, los fagos pueden salir y comenzar un nuevo ciclo de infección. Este proceso llamado *hidrólisis*, ocurre de manera natural dentro de la bacteria. Sin embargo, su relevancia de aprovechamiento mediante la biotecnología aumenta significativamente cuando se investiga su aplicación exógena, es decir, desde fuera de la célula bacteriana (Murray *et al.* 2021).

3. Inmovilización en acción: un escudo protector para las endolisinas

Las endolisinas en la actualidad no cumplen solo su papel dentro de los fagos, también han sido estudiadas por su potencial de manera independiente, aplicadas directamente. Gracias a esto se les ha denominado “enzibióticos”, debido a que combinan la acción de una enzima con el efecto antimicrobiano de un antibiótico (Nelson *et al.* 2001). Sin embargo, a diferencia de los antibióticos tradicionales, las endolisinas no atacan a todas las bacterias por igual, si no únicamente a aquellas que reconocen, semejante a la acción de los fagos, con lo que eventualmente se espera que tengan menores efectos secundarios contra el microbioma del huésped. Además, gracias a su especificidad, no promueven la resistencia bacteriana, lo que es un aspecto positivo de la terapia con endolisinas (Labrou, 2019).

El uso de estas enzimas es muy prometedor, sobre todo en el uso contra bacterias patógenas resistentes a antibióticos, incluso, ya existen endolisinas comerciales, las cuales se pueden observar en la Figura 3.

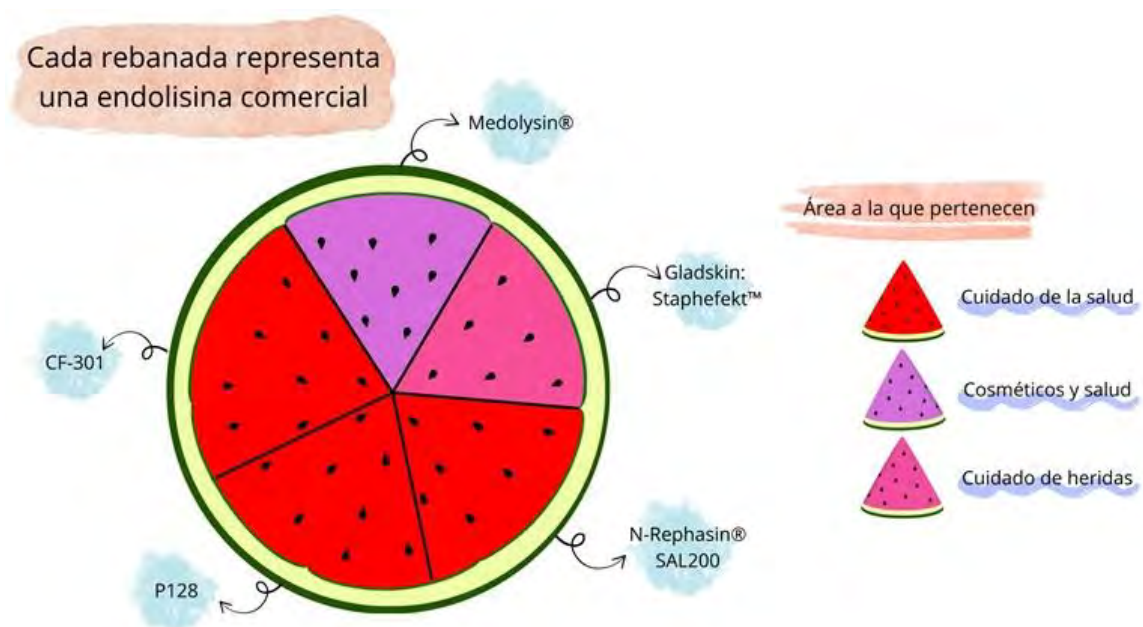


Figura 3. Endolisinas comerciales y sus áreas de aplicación.

Sin embargo, nuestra heroína tiene una debilidad, ya que, aunque pueden ser muy eficaces en el control de bacterias resistentes son frágiles a los cambios de temperatura y de pH, por lo que resulta importante la búsqueda de alternativas que permitan su protección y actividad a pesar de las condiciones externas (Maghraby *et al.* 2023). Una de estas alternativas es la inmovilización, la cual podría proteger las endolisinas de su degradación y contribuir a un mejor efecto terapéutico (Kaur *et al.* 2020).



Las estrategias de protección a través de la inmovilización consisten en fijar o atrapar a las endolisinas en un soporte sólido. Cabe recalcar, que, aunque en este artículo nos centramos en nuestra superheroína, la inmovilización es una técnica utilizada para diversas enzimas en general. La función principal de la inmovilización, es ayudar a que la molécula se mantenga estable, activa y más resistente a las condiciones ambientales. Gracias a esto, también se vuelven más fáciles de manejar, a comparación de su forma libre, ya que incluso pueden llegar a recuperarse y reutilizarse, además de almacenarse durante más tiempo (Maghraby *et al.* 2023).

Existen diferentes formas para lograr la inmovilización (Fig. 4): mediante uniones muy fuertes y difíciles de romper, llamadas enlaces covalentes, de enzimas con materiales como sílica o agarosa; por cross-linking (entrecruzamiento), que une enzimas unas con otras para mejorar la estabilidad; a través de adsorción o enlaces iónicos, que representan uniones más sencillas y posiblemente reversibles, utilizando materiales como alginato o quitosano; o bien, utilizando técnicas como atrapamiento y encapsulación, que mantienen a la enzima dentro de los materiales, como si fuera una red o cápsula (Maghraby *et al.* 2023). A veces, estas inmovilizaciones se pueden realizar combinando materiales que son muy diferentes entre sí, pero que juntos unen sus fuerzas para brindar protección a nuestra heroína, a esta combinación de materiales para inmovilizar y proteger a la heroína se le conoce como compuesto y cuando ya tiene a la heroína adentro de sí se le conoce como biocompuesto.

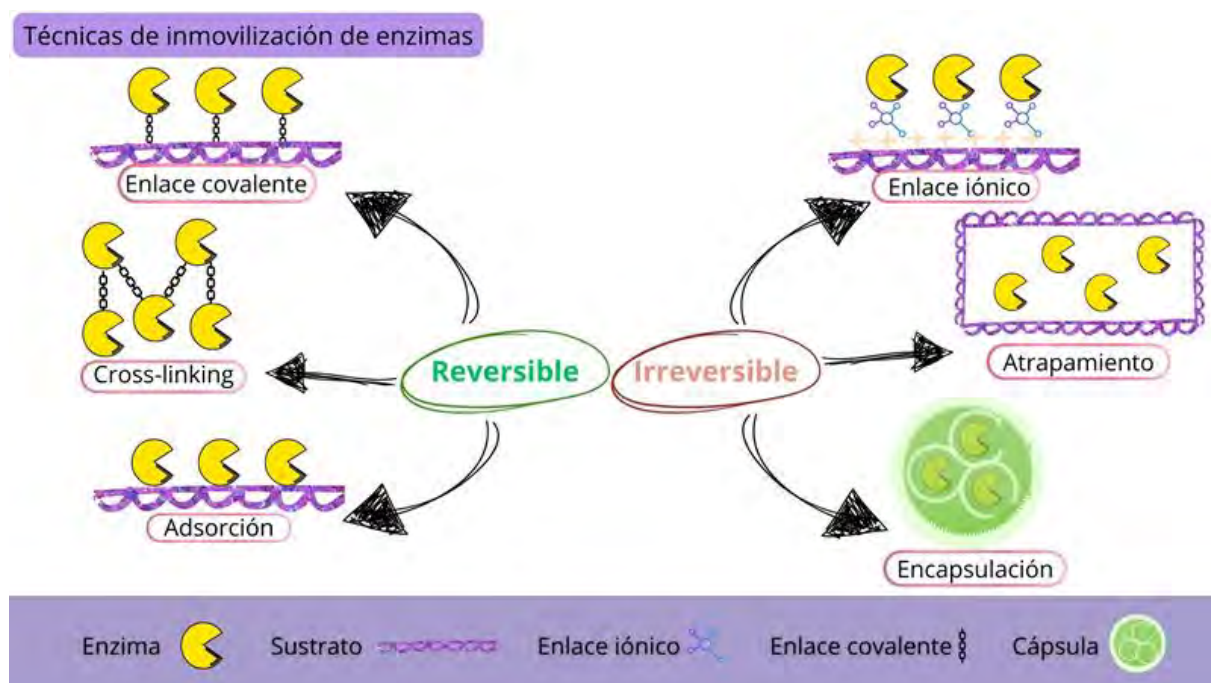


Figura 4. Técnicas de inmovilización de enzimas.

4. Cuando dos soportes sólidos se unen para mejorar: compositos y biocompositos

Los compositos son materiales de soporte formados por la combinación de dos o más componentes distintos, que en conjunto ofrecen propiedades mejoradas en comparación con los materiales que los constituyen de manera individual, estos pueden hacer referencia a un material estructural (como el plástico), dentro del cual se incrusta un material fibroso (como el carburo de silicio) (Wanatop, 2022). Con esta unión obtienen nuevas ventajas, como una mayor resistencia, pero sin volverse más pesados, estabilidad, durabilidad y rigidez, entre otras (Maiti *et al.* 2022). Un ejemplo muy sencillo y común de un composito es el hormigón, que suele estar compuesto por piedras sueltas y unido con una matriz de cemento (Systèmes, 2022), este material se usa a menudo como refuerzo con el acero, en la construcción (CHRYSO, 2020).

Chowdhury *et al.* (2020) y Hasnain y Nayak (2018) mencionan que los compositos pueden tener ciertas características, por ejemplo:

- i. Pueden estar formados de dos o más materiales diferentes; y por ejemplo, al combinarse, uno podría brindar resistencia al calor y otro, dureza.
- ii. Para crear un composito con características únicas se necesita combinar adecuadamente los materiales a partir de sus características químicas.
- iii. El resultado final suele tener propiedades mejoradas, puede ser más fuerte, ligero o resistente al calor que cualquiera de los componentes por separado.

Otra forma de clasificar a los compositos, es de acuerdo con la relación que existe entre sus dos componentes principales: hay uno que siempre va a ser como el hermano mayor funcionando como material base o soporte, que va a llevar de la mano al hermano menor, que sería el refuerzo y que aporta otras características como resistencia, ejemplo de esto sería:

1. Compositos orgánico-orgánico, conformados por materiales que comparten su naturaleza química, y están ordenados de manera repetida, combinado uno con otro, como el alginato y la celulosa.
2. Compositos inorgánico-inorgánico, donde podemos encontrar la unión de materiales como metales y cerámicas.



3. Compositos orgánico-inorgánico, en los que se unen materiales de naturalezas distintas, como alginato o celulosa con un metal o cerámica.

En este contexto, y ya que hablamos de un compuesto, podemos ahora conocer a los biocompositos. Estos son una categoría “especial” de los compositos. Ya que, cuando agregamos el término “bio”, hacemos referencia a la integración de moléculas orgánicas de origen biológico, por ejemplo, carbohidratos, lípidos, o proteínas, como en este caso el uso de nuestra superheroína endolisina (Camacho-González *et al.* 2022). En años recientes, se les ha estudiado para darles un uso en aplicaciones del área de la salud, tales como la entrega de medicamentos, terapia contra el cáncer, por sus propiedades antimicrobianas, inmunoterapia, terapia con células madre, ingeniería de tejidos, y la categoría que nos compete en este artículo, la inmovilización de enzimas, entre otras (Chowdhury *et al.* 2020).

5. De compositos a biocompositos: armaduras para enzimas derivadas de fagos

A lo largo del texto hemos hecho mención en distintas ocasiones de los polímeros, y que estos polímeros tienen una relación orgánico-orgánico, para formar los compositos, pero ¿qué son?, bueno, de manera sencilla, podemos definir “polímero” como una cadena muy larga de moléculas compuesta de moléculas más pequeñas denominadas monómeros. Estos los podemos encontrar tanto de origen natural (denominados polímeros naturales o biopolímeros) como sintético. Se han utilizado para distintas aplicaciones, desde el área de la biomedicina hasta la inmovilización de enzimas. (Polímeros, 2020).

Principalmente, la creación de compositos para la inmovilización de una molécula orgánica se da a partir de materiales como los polímeros naturales, ya que estos tienen diversas ventajas como que son de fuentes renovables, baratos y los podemos encontrar ampliamente en la naturaleza (Akhter *et al.* 2019). Los polímeros naturales pueden ser largas cadenas de azúcares simples, llamados polisacáridos, proteínas y poliéster, que tienen su origen en plantas o animales. Muchos de estos son parte de la dieta humana y se han usado como prótesis o entrega de fármacos. Debido a que estos son muy parecidos al entorno que rodea a nuestras células, pueden no tener reacciones de rechazo ni toxicidad, cosa que en un polímero sintético sí puede llegar a pasar (Aravamudhan *et al.* 2014). Los polisacáridos son los polímeros naturales más utilizados en el área, estos consisten en monosacáridos (azúcares) que al unirse entre sí crean un tipo de enlace llamado “glucosídico” los cuales son ampliamente utilizados en la formación de biocompositos. Estos provienen de plantas,

animales y microorganismos. Además, presentan diferentes funciones fisiológicas, por lo que tienen gran potencial de aplicación en el campo de la biomedicina (Mano *et al.* 2007).

Entre los polímeros naturales más utilizados para realizar la inmovilización de las enzimas están la celulosa (Rashki *et al.* 2021), el alginato (Weng *et al.* 2023) y el quitosano (Kaur *et al.* 2020), gracias a las distintas propiedades que presentan. Al combinarlos se integran unas propiedades con otras, lo que resulta en un material con características mejoradas y, por ende, se puede llamar compuesto (Fig. 5).

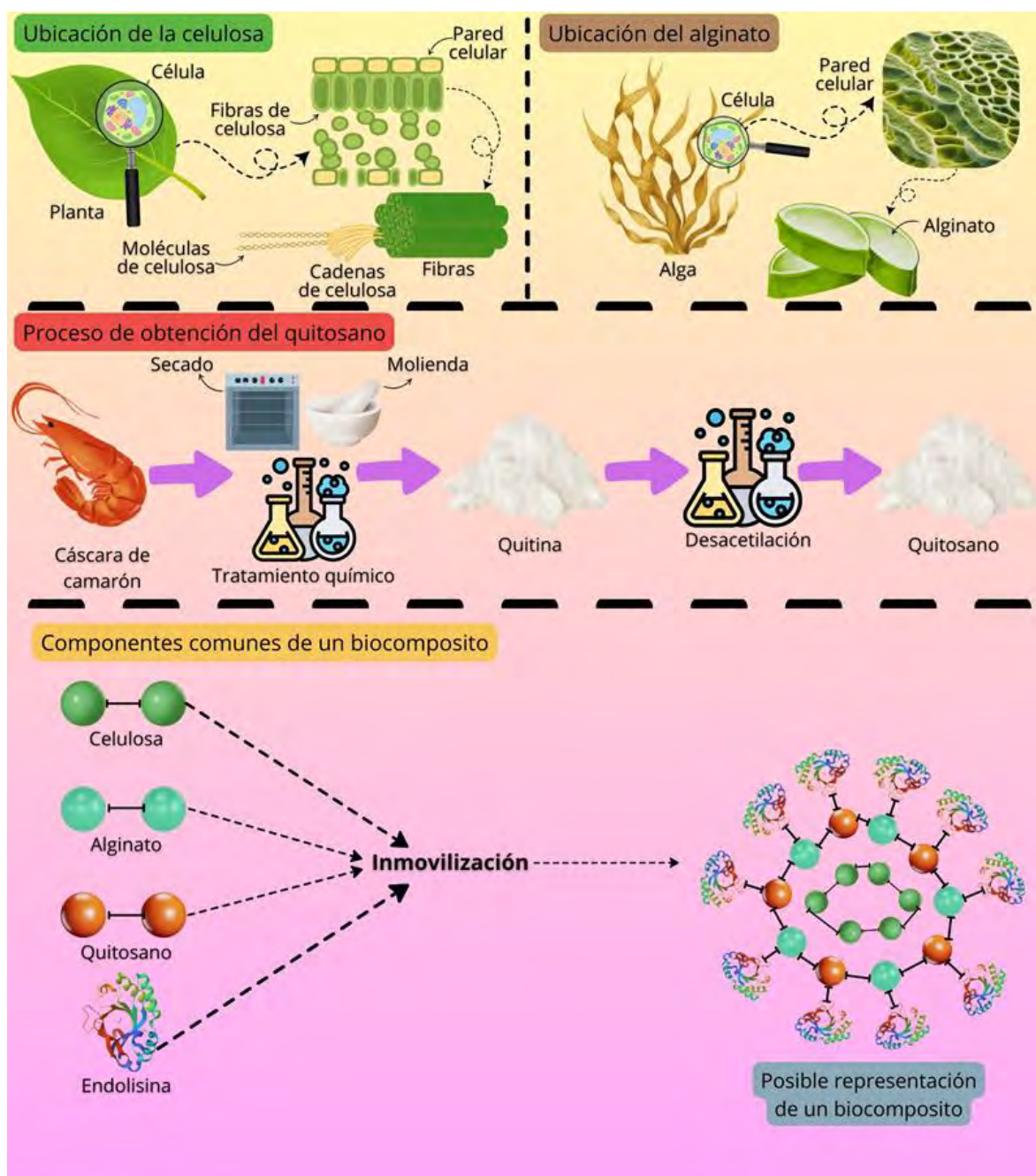


Figura 5. Obtención de diversos componentes de un compuesto y posible representación de un biocompuesto.



Un ejemplo de biocomposito, donde se combina alginato con quitosano es en el trabajo de Kaur *et al.* (2020), quien usó nanobiocompositos (biocompositos de tamaño muy pequeño) con un tamaño de 276.5 ± 42 nm, para inmovilizar una endolisina, polímeros naturales elegidos por su compatibilidad, degradabilidad y naturaleza no inmunogénica. Además, al tratarse de partículas en suspensión, se obtuvieron por medio de procedimientos simples, evitando así el uso de químicos agresivos que pudieran dañar la integridad y función de la endolisina. Estos biocompositos fueron utilizados para el tratamiento de infecciones por *Staphylococcus aureus* resistente a la meticilina (SARM) y *Staphylococcus epidermidis* en modelos animales, mostrando potencial para su uso en infecciones humanas.

Otro biocomposito desarrollado por Camacho-González *et al.* (2022), fue de celulosa y pequeñas cadenas de azúcares obtenidas del alginato, llamadas oligosacáridos, para el mismo fin anteriormente mencionado, ya que representan un biomaterial ideal para ser cargado con enzimas gracias a sus distintas propiedades individuales, que, al combinarse, se integran en un solo material. Los oligosacáridos con sus distintas propiedades bioactivas, como antioxidantes, efectos prebióticos, y propiedades inmunomoduladores y la celulosa como un vehículo. Este trabajo se enfocó en el sector acuícola, buscando un tratamiento alternativo debido a las infecciones por *Vibrio* que llevan a grandes pérdidas económicas.

Cada polímero natural antes mencionado brinda algo especial que lo hace destacar, entre lo que podemos mencionar:

- 1) La celulosa, ha logrado destacarse como un buen vehículo para transportar agentes antimicrobianos. Además, posee actividad para combatir no sólo bacterias, si no microbios en general, que es una de sus cualidades más apreciadas (Malis *et al.* 2019). Incluso, posee unas estructuras químicas llamadas grupos hidroxilo (conformados por la unión de un hidrógeno y un oxígeno) en su estructura, y esto permite que podamos modificarla fácilmente (Dang *et al.* 2024).
- 2) El alginato, es un polímero natural con diversas características que lo hacen especial. Es biocompatible por lo que no es dañino para los seres vivos, tiene una baja toxicidad y, además, es capaz de formar geles, una propiedad que se puede aprovechar de distintas formas (Ahmad Raus *et al.* 2021).

- 3) El quitosano, tiene un gran poder antimicrobiano, lo que se considera su característica más destacable. Pero no sólo es interesante por eso, también tiene otras propiedades muy importantes. Este, puede acelerar la cicatrización de heridas, es biodegradable, biocompatible, no tóxico y, también tiene la capacidad de formar geles, (Yahya *et al.* 2020).

En términos generales, estos son los usos que se les ha dado a los biocompositos con endolisinas en los distintos tratamientos contra patógenos resistentes. Sin embargo, esta aún es un área relativamente nueva y poco explorada, que no cuenta con muchos estudios al respecto. Aunque es de esperarse que, en un futuro, existan nuevos enfoques y tengamos a la mano más información. Podemos plantear que apenas se están forjando las primeras piezas de la armadura de nuestra superheroína, y que con el tiempo esta armadura será cada vez más utilizada y estudiada, permitiéndole abarcar más campos, y por supuesto cumplir mejor su misión contra las bacterias más peligrosas.

6. El futuro de la armadura

La inmovilización de enzimas en compositos que permite obtener biocompositos, no sólo ayuda a que estas moléculas sean más estables y funcionen mejor, sino que también representa un área de oportunidad en aplicaciones más eficientes en distintos sectores. Sin embargo, esta técnica aún tiene mucho camino que recorrer.

Autores como Kaur *et al.* (2020) consideran que hay aspectos que podrían mejorarse, como mejorar la formulación para que la inmovilización sea más eficiente, pasar de pruebas de laboratorio a estudios clínicos, y lograr entender a mayor profundidad cómo funcionan.

También, continuar con el uso de materiales biodegradables para elaborar compositos, y como la “combinación” de estos con endolisinas, podría convertirse en una herramienta prometedora para su aplicación en campos de medicina regenerativa y sistemas de liberación controlada de enzibióticos (Zdiri *et al.* 2022)

Agradecimientos

Metzli G. Valencia Zavala agradece a SECIHTI-México por el apoyo financiero, con CVU 1344528.



Literatura citada

- Ahmad Raus, R., W.M.F. Wan Nawawi y R.R. Nasaruddin. 2021. *Alginate and alginate composites for biomedical applications*. Asian Journal of Pharmaceutical Sciences 16 (3): 280–306.
- Akhter, R., F.A. Masoodi, T.A. Wani, y S.A. Rather. 2019. *Functional characterization of biopolymer based composite film: Incorporation of natural essential oils and antimicrobial agents*. International Journal of Biological Macromolecules 137: 1245–1255.
- Aravamudhan, A., D.M. Ramos, A.A. Nada y S.G. Kumbar. 2014. *Natural Polymers*. pp. 67-89 En: Kumbar, S.G., C.T. Laurencin, M. Deng (Eds.). *Natural and Synthetic Biomedical Polymers*. Elsevier. Amsterdam, Países Bajos. 450 pp.
- Camacho-González, C.E., C.S. Cardona-Félix, V. Zamora-Gasga, A. Pérez-Larios, y J.A. Sánchez-Burgos. 2022. *Biofunctionalization of Endolysins with Oligosaccharides: Formulation of Therapeutic Agents to Combat Multi-Resistant Bacteria and Potential Strategies for Their Application*. Polysaccharides 3 (2): 306–325.
- Chowdhury, S., S. Chakraborty, M. Maity, M.S. Hasnain y A.K. Nayak. 2020. *Biocomposites of Alginates in Drug Delivery*. pp. 153-185. En: Nayak, A.K. (Ed.). *Alginates in Drug Delivery*. Academic Press. Londres, Reino Unido. 325 pp.
- CHRYSO. 2024. *Qué es el hormigón, tipos y usos*. En: <https://www.chryso.es/news/339/qu-es-el-hormig-n-tipos-y-usos-chryso> (consultado el 06/11/2024).
- Dang, X., N. Li, Z. Yu, X. Ji, M. Yang, y X. Wang. 2024. *Advances in the preparation and application of cellulose-based antimicrobial materials: A review*. Carbohydrate Polymers 342.
- Dunstan, R.A., R.S. Bamert, M.J. Belousoff, F.L. Short, C.K. Barlow, D.J. Pickard, J.J. Wilksch, R.B. Schittenhelm, R.A. Strugnell, G. Dougan y T. Lithgow. 2021. *Mechanistic Insights into the Capsule-Targeting Depolymerase from a Klebsiella pneumoniae Bacteriophage*. Microbiology Spectrum 9 (1): 21.
- Gutiérrez Fernández, D., L. Fernández Llamas, A. Rodríguez González y P. García Suárez. 2020. *Bacteriófagos y endolisinas en la industria alimentaria*. Arbor 196 (795): 544.
- Kaur, J., A. Kour, J.J. Panda, K. Harjai y S. Chhibber. 2020. *Exploring Endolysin-Loaded Alginate-Chitosan Nanoparticles as Future Remedy for Staphylococcal Infections*. American Association of Pharmaceutical Scientists PharmSciTech 21 (6): 233.

- Maghraby, Y.R., R.M. El-Shabasy, A.H. Ibrahim y H.M.E.-S. Azzazy. 2023. *Enzyme Immobilization Technologies and Industrial Applications*. American Chemical Society Omega 8 (6): 5184–5196.
- Malis, D., B. Jeršek, B. Tomšič, D. Štular, B. Golja, G. Kapun y B. Simončič. 2019. *Antibacterial Activity and Biodegradation of Cellulose Fiber Blends with Incorporated ZnO*. Materials 12 (20): 3399.
- Mano, J.F., G.A. Silva, H.S. Azevedo, P.B. Malafaya, R.A. Sousa, S.S. Silva, L.F. Boesel, J.M. Oliveira, T.C. Santos, A.P. Marques, N.M. Neves y R.L. Reis. 2007. *Natural origin biodegradable systems in tissue engineering and regenerative medicine: present status and some moving trends*. Journal of The Royal Society Interface 4 (17): 999–1030.
- Murray, E., L.A. Draper, R.P. Ross y C. Hill. 2021. *The advantages and challenges of using endolysins in a clinical setting*. Viruses 13 (4): 357
- Nelson, D., L. Loomis y V. A. Fischetti. 2001. *Prevention and elimination of upper respiratory colonization of mice by group A streptococci by using a bacteriophage lytic enzyme*. Proceedings of the National Academy of Sciences 98 (7): 4107–4112.
- Pas, C., A. Latka, L. Fieseler y Y. Briers. 2023. *Phage tailspike modularity and horizontal gene transfer reveals specificity towards E. coli O-antigen serogroups*. Virology Journal 20 (1): 174.
- Polímeros. 2020. *¿Qué es un polímero?* En: <https://todoenpolimeros.com/que-son-los-polimeros/> (consultado el 04/12/2024)
- Rashki, S., N. Shakour, Z. Yousefi, M. Rezaei, M. Homayoonfal, E. Khabazian, F. Atyabi, F. Aslanbeigi, R. Safaei Lapavandani, S. Mazaheri, M.R. Hamblin y H. Mirzaei. 2021. *Cellulose-Based Nanofibril Composite Materials as a New Approach to Fight Bacterial Infections*. Frontiers in Bioengineering and Biotechnology 9: 718.
- Systèmes, D. 2022. *Composite*. En: <https://www.3ds.com/es/make/guide/material/composite> (consultado el 10/09/2024)
- Wanatop, S. 2024. *Materiales compuestos: ¿Qué son y para qué sirven?* INFINITIA Industrial Consulting. En: <https://www.infinitiaresearch.com/noticias/materiales-compuestos-que-son-y-para-que-sirven/> (consultado el 10/09/2024)
- Weng, Y., G. Yang, Y. Li, L. Xu, X. Chen, H. Song y C.X. Zhao. 2023. *Alginate-based materials for enzyme encapsulation*. Advances in Colloid and Interface Science 318.
- Yahya, E.B., F. Jummaat, A.A. Amirul, A.S. Adnan, N.G. Olaiya, C.K. Abdullah, S. Rizal, M.K. Mohamad Haafiz y H.P.S.A. Khalil. 2020. *A Review on Revolutionary Natural Biopolymer-Based Aerogels for Antibacterial Delivery*. Antibiotics 9 (10): 648.
- Zdiri, K., A. Cayla, A. Elamri, A. Erard y F. Salaun. 2022. *Alginate-Based Bio-Composites and Their Potential Applications*. Journal of Functional Biomaterials 13 (3): 115.



Semblanzas de los autores

- La Ing. Química **Metzli Guadalupe Valencia Zavala**, es estudiante de posgrado, cursando la maestría en ciencias de los alimentos. Su tesis se titula “evaluación de la estabilidad de biocompositos celulosa-alginato-endolisina para el control de patógenos resistentes”, estudiando así la interacción entre los componentes del biocomposito y su eficacia antibacteriana frente a bacterias resistentes.
- **María Zulema Juárez Cortés**, Doctora en Ciencias Marinas por el Centro Interdisciplinario de Ciencias Marinas del IPN, es experta en Biotecnología marina, especializada en producción recombinante de bacteriocinas, Ingeniería genética, Microbiología y diseño experimental con microcrustáceos. Es divulgadora científica, ha colaborado en proyectos del CICESE, IPN y con otros científicos, además de publicar en revistas especializadas y redes sociales.
- El Dr. **César Salvador Cardona Félix** es Investigador por México del CONAHCYT comisionado al Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste (CIBNOR) y miembro del Sistema Nacional de Investigadores (SNI) Nivel I. Posee experiencia en biotecnología, bioquímica estructural y biología molecular, destacándose en el diseño y análisis de proteínas recombinantes y el control de bacterias patógenas. Ha liderado y colaborado en múltiples proyectos de investigación, con financiamiento nacional e internacional, enfocados en aplicaciones acuícolas y de salud pública. Es autor de más de 28 publicaciones científicas en revistas de alto impacto y ha formado a investigadores y estudiantes en diversos niveles académicos.
- El Dr. **Jorge Alberto Sánchez Burgos** es profesor en el Posgrado en Ciencias de los Alimentos del Instituto Tecnológico de Tepic. Es miembro del Cuerpo Académico ITTEP-CA-1 "Ciencia y Tecnología de Frutas y Hortalizas" y cuenta con reconocimientos como el SNI Nivel I y el Perfil Prodep. Su investigación se centra en metabolitos bioactivos, nanonutraceuticos y biocompositos aplicados a alimentos, con 55 publicaciones recientes. Además, ha formado a cinco doctores y diez maestros en Ciencias, contribuyendo significativamente al desarrollo académico en su campo. jsanchezb@ittep.edu.mx

Cita

Valencia-Zavala, M.G., J.A. Sánchez-Burgos, C.S. Cardona-Félix, y M.Z. Juárez-Cortés. Biocompositos: Una nueva forma de estabilización de enzimas derivadas de fagos. Recursos Naturales y Sociedad, 2025. Vol. 11 (3): 205-219. <https://doi.org/10.18846/renaysoc.2025.11.11.03.0012>.

Sometido: 28 de enero de 2025

Aceptado: 24 de septiembre de 2025

Editor asociado: Dr. Arturo Sánchez Paz

Editor ejecutivo: Dr. Arturo Sánchez Paz

Diseño gráfico editorial: Ing. Francisca Elizabeth Villegas Carrasco

**Chayote (*Sechium edule*):
a genetic resource with great metabolic richness and biomedical value**

Chayote (*Sechium edule*): un recurso genético con gran riqueza metabólica y valor biomédico

Jorge David Cadena-Zamudio^{1*}, Marco Antonio Ramírez-Mosqueda¹, José Luis Aguirre-Noyola¹, Alma Armenta-Medina¹; Jorge Cadena-Iñiguez^{2,3}, María Isabel Iñiguez-Luna²

Resumen

El chayote (*Sechium edule*), una cucurbitácea originaria de Mesoamérica, ha sido ampliamente cultivado y consumido debido a su versatilidad alimentaria y alto valor nutricional. Sin embargo, en las últimas décadas, su importancia ha trascendido del ámbito gastronómico, despertando el interés de la comunidad científica por su diversidad genética, morfológica y química. Estudios recientes han demostrado que esta especie es una fuente rica en metabolitos secundarios, cuya actividad biológica abarca desde efectos antioxidantes y antiinflamatorios hasta propiedades antiproliferativas en células tumorales. Además, se han identificado aplicaciones agroindustriales, incluyendo su potencial fungistático en la poscosecha de productos hortofrutícolas. En este trabajo, se presenta una revisión integral sobre la diversidad del chayote, su perfil metabólico y sus aplicaciones en biomedicina y agricultura. Asimismo, se enfatiza la necesidad de fortalecer estrategias de conservación y mejoramiento genético para garantizar el aprovechamiento sustentable de este recurso. La creciente evidencia científica posiciona a *S. edule* como un cultivo de alto valor para la innovación en salud, seguridad alimentaria y biotecnología.

Palabras clave: *Sechium edule*, metabolitos secundarios, actividad biológica, biomedicina, conservación genética.

¹ Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias, Centro Nacional de Recursos Genéticos, Blvd. de la Biodiversidad #400 Rancho las Cruces Tepatitlán de Morelos, C.P. 47600, Jalisco, México.

² Grupo Interdisciplinario de Investigación en *Sechium edule* en México, Agustín Melgar 10 Col. Niños Héroes, Texcoco, C.P. 56160, Estado de México, México.

³ Colegio de Postgraduados, Campus San Luis Potosí, San Luis Potosí 78620, San Luis Potosí, México.

* Autor de correspondencia: cadenzamudioj@gmail.com



Abstract

Chayote (*Sechium edule*), a cucurbit native to Mesoamerica, has long been cultivated and consumed for its versatility and high nutritional value. However, in recent decades, its significance has extended beyond the culinary realm, attracting scientific interest due to its genetic, morphological, and chemical diversity. Recent studies have revealed that this species is a rich source of secondary metabolites, which exhibit a wide range of biological activities, including antioxidant, anti-inflammatory, and antiproliferative effects against tumor cells. Additionally, its agro-industrial applications have gained attention, particularly for its fungistatic potential in postharvest preservation of horticultural products. This review provides a comprehensive analysis of chayote's diversity, metabolic profile, and applications in biomedicine and agriculture. Furthermore, it highlights the need to strengthen conservation and breeding strategies to ensure the sustainable use of this valuable resource. The growing body of scientific evidence positions *S. edule* as a high-value crop for innovation in health, food security, and biotechnology.

Key words: *Sechium edule*, secondary metabolites, biological activity, biomedicine, genetic conservation.

Antecedentes

El chayote (*Sechium edule*) es una cucurbitácea originaria de Mesoamérica que, desde tiempos precolombinos, ha formado parte de la alimentación y cultura de la región (Hammer & Heller, 1998). Aunque inicialmente se asociaba solo al consumo doméstico y a mercados locales, en décadas recientes ha ganado un lugar destacado gracias a su versatilidad gastronómica y sus posibles beneficios nutricionales y terapéuticos (Cadena-Iñiguez et al., 2007). El chayote es una planta que muestra una gran variedad en la forma, color y sabor de sus frutos. Esta diversidad no es casual, sino que es el resultado de siglos de cultivo, selección y cruces naturales o intencionales entre diferentes tipos de chayote, e incluso con sus parientes silvestres. A estos cruces se les conoce como hibridaciones, y consisten en la combinación de características de dos plantas diferentes para obtener frutos con nuevas cualidades. Gracias a este proceso, en distintas regiones de México y Centroamérica han surgido múltiples variedades con propiedades únicas. (Cadena-Iñiguez et al., 2024a). Así, es común encontrar chayotes con epidermis lisa o espinosa, de tonalidades que van

desde el verde pálido hasta el verde oscuro, pasando por variantes amarillentas, e incluso con sabores neutros, dulces o amargos (Barrera-Guzmán *et al.*, 2021).

En el estado de Veracruz, por ejemplo, se concentra buena parte de la diversidad de *S. edule*, tanto en huertos familiares como en plantaciones comerciales. Esta región también alberga al Banco Nacional de Germoplasma de *S. edule* (BANGESe), un esfuerzo pionero dedicado a conservar y estudiar la riqueza genética de la especie (Fig. 1) (Cadena-Iñiguez *et al.*, 2024b). Debido a que las semillas de chayote son recalcitrantes (es decir, no pueden conservarse viables mediante métodos convencionales), la preservación se realiza a través de colecciones en campo (*ex situ*) y mediante propagación vegetativa. Este trabajo permite, además, identificar y seleccionar líneas con características de interés para la salud y la alimentación, así como para distintos usos industriales (Cadena-Iñiguez *et al.*, 2007). El creciente interés mundial por el chayote no solo responde a su valor culinario, sino también a sus posibles beneficios que puede aportar a la salud. Investigaciones recientes destacan su potencial para el desarrollo de alimentos más saludables y la formulación de productos poscosecha. Además, su diversidad genética lo convierte en un recurso valioso para la agricultura, pues permite desarrollar variedades más resistentes a enfermedades y capaces de rendir mejor en ambientes con sequía u otras condiciones difíciles (Ramírez-Rodas *et al.*, 2021). Todo esto convierte al chayote en un recurso estratégico, no solo para la soberanía alimentaria de las comunidades que lo han cultivado ancestralmente, sino también para la innovación biotecnológica y la generación de valor agregado. En síntesis, el chayote ha evolucionado desde ser un cultivo local a convertirse en una especie que despierta interés internacional, respaldado por esfuerzos de conservación, investigación y promoción comercial. Esa atención renovada, sumada a la extensa variabilidad que exhibe, sugiere un futuro prometedor para *S. edule* como un aliado en la nutrición, la salud y el desarrollo sustentable de las comunidades rurales donde se cultiva.

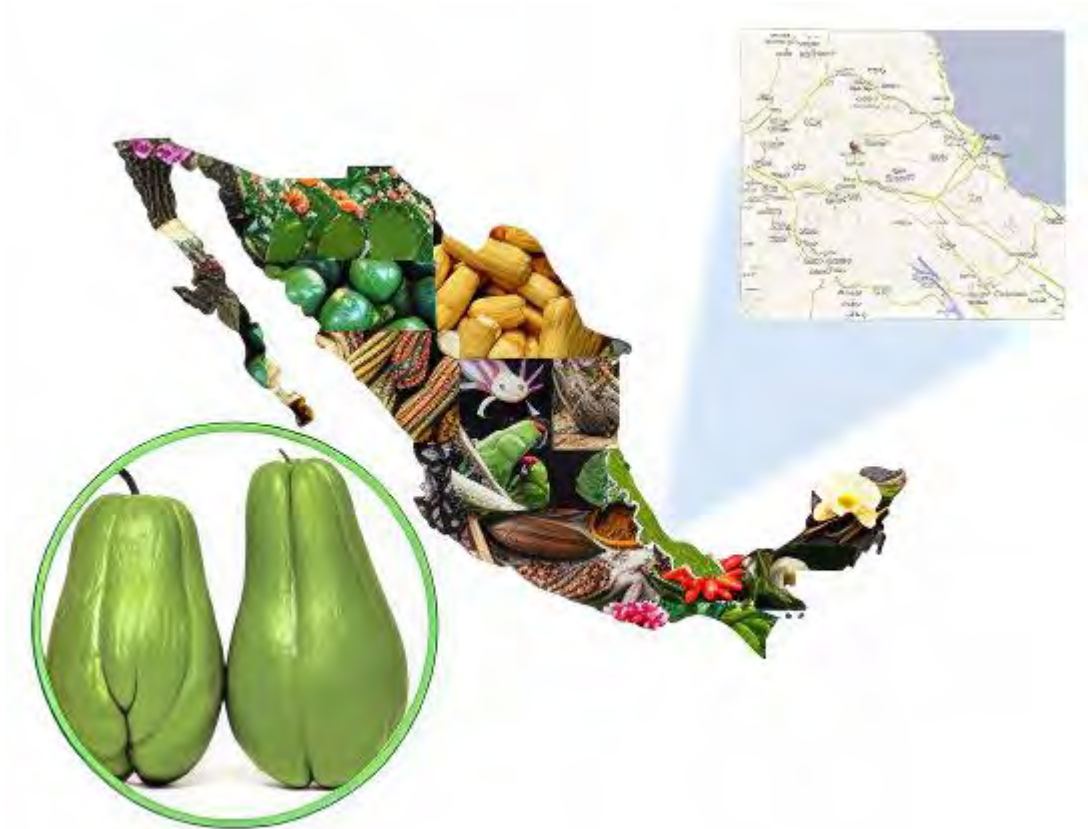


Figura 1. Localización del Banco Nacional de Germoplasma de *Sechium edule* (BANGESe).

Diversidad morfológica

Como se mencionó anteriormente, el chayote cuenta con una gran variedad de formas y tonalidades en sus frutos, desde ejemplares con piel verde muy claro hasta otros con tonos oscuros o amarillentos, algunos con superficie lisa y otros cubiertos de espinas (Fig. 2) (Cadena-Iñiguez *et al.*, 2008; Barrera-Guzmán *et al.*, 2021a). Esta diversidad no se limita al aspecto externo de los frutos, sino que también abarca propiedades internas, como sabor (amargo, neutro o ligeramente dulce), consistencia de la pulpa y presencia de distintos compuestos fitoquímicos (Cadena-Iñiguez *et al.*, 2011; 2024b).



Figura 2. Diversidad morfológica de *S. edule*. Se muestran las distintas formas, colores y texturas de los frutos de *S. edule*.

Desde el punto de vista anatómico, el chayote presenta diferencias visibles en sus hojas, tallos y raíces. Por ejemplo, las hojas pueden variar en aspectos como el número y tipo de pelillos (llamados tricomas), la cantidad de estomas (pequeños poros que regulan el intercambio de gases) o el color del pecíolo, que es la parte que une la hoja al tallo. Estas características no son aleatorias: están relacionadas con la capacidad de cada variedad de chayote para adaptarse a distintos ambientes, desde zonas bajas a 300 metros sobre el nivel del mar (m. s. n. m.) hasta regiones más elevadas a 1,500 m. s. n. m. (Cadena-Iñiguez *et al.*, 2008; 2024b). Las variedades con frutos amargos y, por lo general, con epidermis espinosa, tienden a presentar una mayor cantidad de compuestos de defensa natural (cucurbitacinas y algunos fenoles), mientras que las de sabor neutro o dulce, más apreciadas en mercados locales y de exportación, muestran concentraciones menores de esos metabolitos (Barrera-Guzmán *et al.*, 2021b; Iñiguez-Luna *et al.*, 2021a). El peso y el tamaño del fruto también varían de forma sustancial. En algunos tipos de chayote, el fruto puede ser pequeño no más de 5 cm de longitud, mientras que en otros excede los 15 cm de largo y alcanza pesos superiores a 1 kg (Fig. 3) (Cadena-Iñiguez *et al.*, 2008). Esta amplitud de dimensiones obedece tanto a la selección natural como a la intervención humana, que a lo largo de generaciones ha impulsado la



perpetuación de líneas con cualidades agronómicas y culinarias específicas. Aunado a ello, la textura de la piel puede oscilar desde completamente lisa hasta fuertemente espinosa, aspecto que a menudo se asocia con preferencias locales o creencias sobre su durabilidad y resistencia a plagas (Cadena-Iñiguez et al., 2024b). Una de las muestras más notorias de esta diversidad morfológica se encuentra en el Banco Nacional de Germoplasma de *S. edule* (BANGESe), donde se agrupan accesiones recolectadas en distintas localidades de México y Centroamérica (Cadena-Iñiguez et al., 2011; 2024a). Allí se distinguen grupos varietales de frutos amarillos, como *albus dulcis*, *albus levis*, y de frutos verdes como *virens levis*, *nigrum levis*, *nigrum spinosum*, entre otros (Fig. 3), tomando en cuenta un conjunto de características que se transmiten de una generación a otra y que se mantienen de forma estable (Cadena-Iñiguez et al., 2008). Diversos estudios han permitido precisar qué aspectos influyen más en la clasificación de estos grupos, señalando que el color y la forma del fruto suelen ser determinantes para diferenciar las líneas domesticadas de las silvestres (Cadena-Iñiguez et al., 2024b). En el caso de las poblaciones silvestres, los frutos tienden a ser más pequeños, con epidermis espinosa y sabor amargo (Fig. 3) (Cadena-Iñiguez et al., 2008). Se postula que estas características responden a mecanismos de defensa natural frente a depredadores. Al ser menos apetecibles al paladar humano, históricamente no habrían sido favorecidas en la domesticación. No obstante, contienen una alta riqueza de compuestos bioactivos y contribuyen a la base genética necesaria para programas de mejoramiento que busquen robustecer, por ejemplo, la resistencia a estrés biótico (insectos, patógenos) o abiótico (diferentes tipos de suelos y climas). Lo anterior, demuestra que la diversidad morfológica va de la mano con una variedad genética, y que esta puede aprovecharse no solo para la conservación del acervo de *Sechium*, sino también para la obtención de líneas enfocadas en mercados gourmet o en la producción de compuestos de interés (Cadena-Iñiguez et al., 2011; 2013). En conclusión, la gran heterogeneidad morfológica del chayote se traduce en un abanico de frutos con diferentes formas, colores y sabores que combinan aspectos culturales y ecológicos. Estas diferencias, que a veces se manifiestan de manera muy notoria en el fruto, también se reflejan en la anatomía de hojas y tallos, ofreciendo un panorama complejo y fascinante para la taxonomía, la biología y la práctica agronómica. Y si bien muchos de estos rasgos surgieron de procesos de selección en huertos familiares o condiciones silvestres, hoy se entiende que su estudio y valoración es esencial para impulsar estrategias de mejoramiento y promover el uso sostenible de esta riqueza fitogenética.



Figura 3. Variación de color, forma y tamaño del fruto en el complejo varietal de *Sechium edule*.

Diversidad metabólica: riqueza de compuestos secundarios en Sechium edule y parientes afines

Una de las razones que explican la creciente atención científica hacia el chayote es la variedad de compuestos secundarios (metabolitos) que pueden hallarse en sus distintas variedades y parientes silvestres. Desde el punto de vista de la planta, estas sustancias cumplen funciones de defensa frente a herbívoros y patógenos, así como de adaptación a diversas condiciones ambientales (Cadena-Iñiguez *et al.*, 2011; Monroy-Vázquez *et al.*, 2009). Estudios bioquímicos han demostrado que tanto el fruto, como las hojas y raíces de distintas especies de chayote (*Sechium*) contienen compuestos naturales llamados metabolitos, que tienen propiedades muy interesantes. Los metabolitos son sustancias que produce la planta como parte de su funcionamiento normal, pero muchos de ellos también cumplen un papel especial en su protección contra plagas, enfermedades o condiciones del ambiente. Lo más interesante es que algunos de estos compuestos también pueden ser útiles para las personas, ya sea con fines medicinales o como parte de una dieta saludable (Monroy-Vázquez *et al.*, 2009; Iñiguez-Luna *et al.*, 2021a). En el chayote cultivado (*S. edule*), la cantidad y el tipo de compuestos naturales cambian según el grupo varietal. Por ejemplo, las variedades con frutos más oscuros o con sabor amargo suelen contener mayores niveles de



triterpenos y fenoles, sustancias que la planta produce para defenderse y que pueden tener efectos beneficiosos en la salud humana. En cambio, los chayotes de sabor más dulce o neutro, que se consumen comúnmente como verdura fresca, tienden a tener otras combinaciones de compuestos, como flavonoides y pigmentos naturales. Entre estos pigmentos están las clorofilas, que dan el color verde característico, y los carotenoides, que aportan tonalidades amarillas o anaranjadas y actúan como antioxidantes (Cadena-Iñiguez *et al.*, 2011; 2013). Esto confirma que la domesticación y la selección humana han influido en la variación química de los frutos, favoreciendo o atenuando ciertas vías biosintéticas.

Además de vitaminas y minerales, el chayote contiene una amplia variedad de compuestos naturales como ácidos grasos, esteroides, saponinas y otros lípidos complejos. En un estudio particularmente llamativo, investigadores trabajaron con un extracto alcohólico de *S. edule* var. *nigrum spinosum* y lograron aislar diferentes fracciones, es decir, partes que concentran distintos grupos de compuestos. Allí identificaron ácidos grasos que, aunque no suelen encontrarse con frecuencia en otras cucurbitáceas, ponen de manifiesto la sorprendente riqueza química que encierra esta planta (Monroy-Vázquez *et al.*, 2009). Otras investigaciones han mostrado que la variación en los perfiles de compuestos del chayote depende tanto de las diferencias genéticas propias de cada planta como de las condiciones del entorno donde se cultiva. Dichas condiciones, conocidas como factores agroecológicos, incluyen aspectos como el clima, el tipo de suelo, la altitud o las prácticas agrícolas aplicadas (Barrera-Guzmán *et al.*, 2021a, 2021b). En el campo de la exploración y aprovechamiento de la biodiversidad, se han realizado estudios integrales que combinan información sobre la forma de la planta, sus características genéticas y su composición química. Estos trabajos han demostrado que los genotipos silvestres o de sabor amargo suelen contener una mayor cantidad de compuestos de defensa, como ciertas cucurbitacinas específicas (Iñiguez-Luna *et al.*, 2021b). Este rasgo, que en un inicio pudo haber representado un obstáculo para la domesticación del chayote, hoy resulta especialmente atractivo por sus posibles aplicaciones en el cuidado de la salud y, en algunos casos, en el desarrollo de productos con valor medicinal. Para conocer mejor la composición química de los frutos, los investigadores han utilizado desde métodos tradicionales, como el análisis de pigmentos y fenoles mediante espectros de luz ultravioleta-visible, hasta técnicas más avanzadas, como la cromatografía de gases acoplada a espectrometría de masas, que permiten identificar con precisión grasas, aceites y flavonoides presentes en la planta (Monroy-Vázquez *et al.*, 2009; Cadena-Iñiguez *et al.*, 2011). Estos avances resaltan la importancia de no limitar la investigación a uno o dos metabolitos, sino de contemplar la diversidad completa,

reconociendo que la sinergia entre diferentes grupos químicos podría ser clave para su funcionalidad.

En síntesis, la variabilidad morfológica de *S. edule* y especies afines se ve reflejada también en una diversidad química notable. El repertorio de compuestos, que abarca terpenos, flavonoides, fenoles, ácidos grasos y otros metabolitos, se manifiesta de forma distinta en cada variedad y pariente silvestre. Este panorama metabólico establece las bases para futuras investigaciones orientadas al desarrollo de alimentos funcionales, suplementos nutraceuticos e, incluso, a la generación de nuevas líneas de cultivo enfocadas en la producción de metabolitos con valor potencial en la salud y la industria.

Actividad biológica: amplio potencial en ámbitos biomédicos y agroalimentarios

Las investigaciones sobre *Sechium edule* han revelado que sus frutos, hojas y raíces contienen una gran diversidad de compuestos bioactivos con potencial en distintos ámbitos, desde la biomedicina hasta la agroindustria. Más allá de su tradicional uso culinario, el chayote ha demostrado poseer propiedades que abren la puerta a su aplicación en el desarrollo de suplementos nutraceuticos, productos terapéuticos y bioinsumos para la agricultura (Cadena-Iñiguez *et al.*, 2013; Aguiñiga-Sánchez *et al.*, 2015). Este potencial se debe a la compleja composición fitoquímica de la especie y de sus parientes silvestres, cuyos metabolitos secundarios desempeñan funciones clave en procesos como la defensa contra patógenos, la regulación del estrés oxidativo y la modulación de respuestas biológicas en organismos vivos. A medida que se profundiza en su estudio, se han identificado múltiples aplicaciones que podrían redefinir la forma en que se aprovecha esta planta, no solo como un alimento funcional, sino también como un recurso valioso en el sector biomédico y agroalimentario.

Aplicaciones en salud y biomedicina

Uno de los aspectos más interesantes del chayote en el campo de la salud es su posible capacidad para ayudar en la lucha contra ciertos tipos de cáncer. Diversos estudios científicos han encontrado que algunos compuestos presentes en esta planta pueden detener el crecimiento de células cancerosas, un efecto conocido como actividad antiproliferativa. Estas investigaciones se han realizado en laboratorio con diferentes tipos de células tumorales, como las de cáncer cervicouterino, leucemia, sarcoma y cáncer de mama, usando extractos del chayote preparados con distintos solventes (como metanol, etanol o diclorometano). Los resultados muestran que estos extractos pueden inducir la apoptosis, un proceso natural mediante el cual las células dañinas se



autodestruyen, sin afectar en gran medida a las células sanas. Esto es especialmente prometedor, ya que sugiere un efecto selectivo que podría ser aprovechado en tratamientos futuros. (Monroy-Vázquez *et al.*, 2009; Rivera-Martínez *et al.*, 2023). El potencial antineoplásico de *S. edule* se ha atribuido principalmente a la presencia de cucurbitacinas (I, B, D y E), flavonoides y otros compuestos fenólicos que parecen interferir en rutas celulares clave para la proliferación descontrolada de células cancerígenas. Dentro de este espectro químico, las variedades con epidermis verde oscura o sabor amargo, así como algunos híbridos desarrollados en programas de mejoramiento, han mostrado una citotoxicidad (toxicidad celular) selectiva más pronunciada, es decir, atacan de manera específica a las células tumorales sin afectar a las células sanas (Cadena-Iñiguez *et al.*, 2021; Iñiguez-Luna *et al.*, 2021a, b). Además de su potencial en oncología, diversos estudios en humanos y modelos animales han señalado que los extractos y concentrados en polvo de *S. edule* poseen efectos benéficos en trastornos metabólicos. Se ha observado que el consumo regular del chayote puede tener efectos positivos en la salud, como ayudar a reducir la presión arterial (hipertensión), disminuir los niveles de azúcar en sangre y combatir la inflamación. Estos beneficios están relacionados con ciertas sustancias naturales que produce la planta. Gracias a estas propiedades, el chayote podría ser útil en la prevención y tratamiento del síndrome metabólico, una condición que combina los factores antes mencionados, y que suele aparecer con el envejecimiento, incrementando así, las probabilidades de desarrollar enfermedades del corazón y otros problemas graves de salud. (Arista-Ugalde *et al.*, 2022). En este contexto, el chayote se perfila como un aliado potencial en estrategias integrales para mejorar la calidad de vida y reducir la incidencia de patologías crónicas como la obesidad y la hipertensión.

Actividad fungistática y otras aplicaciones agroalimentarias

Además de sus beneficios para la salud humana, el chayote y sus especies emparentadas también tienen un gran potencial en la agricultura. Uno de los aspectos más interesantes es su actividad fungistática, es decir, su capacidad para detener el crecimiento de ciertos hongos que causan enfermedades en las plantas. Aunque no elimina completamente a los hongos, los mantiene bajo control, lo que puede ser muy útil como una alternativa natural para proteger los cultivos sin recurrir a productos químicos agresivos. Se ha documentado que *S. compositum* y otras especies silvestres exhiben un efecto inhibitorio frente a *Botrytis cinerea*, uno de los principales patógenos responsables de la podredumbre de frutos y hortalizas en poscosecha (Gordillo-Salinas *et al.*, 2022). Este efecto se atribuye, en gran medida, a la presencia de metabolitos secundarios como las cucurbitacinas y ácidos fenólicos, presentes en el jugo de la fruta, los cuales, interfieren en la germinación de conidias y el crecimiento micelial del hongo. Estos hallazgos han despertado interés en el uso de

extractos de *Sechium* como alternativa natural para el control de enfermedades en poscosecha, lo que podría reducir la dependencia de fungicidas sintéticos y mitigar los efectos negativos de estos sobre el medio ambiente.

Más allá del control fitopatológico, el chayote también se perfila como un ingrediente prometedor en el sector agroalimentario. Se han evaluado extractos de distintas variedades con el fin de mejorar la conservación de alimentos, desarrollar ingredientes funcionales e, incluso, formular compuestos nutraceuticos capaces de prolongar la vida de anaquel o potenciar el perfil antioxidante de diversos productos (Cadena-Iñiguez *et al.*, 2013; Gordillo-Salinas *et al.*, 2022). Este tipo de aplicaciones, aún en desarrollo, sugiere que el aprovechamiento integral del chayote podría extenderse más allá de su consumo tradicional, convirtiéndolo en una fuente de compuestos bioactivos con beneficios tanto en la industria alimentaria como en la salud pública. En conjunto, el chayote y sus especies emparentadas muestran una amplia gama de efectos beneficiosos, tanto para la salud humana como para la agricultura. Por un lado, se ha observado que algunos de sus metabolitos secundarios pueden ayudar a frenar el crecimiento de células no deseadas en el cuerpo (efecto antiproliferativo), reducir la inflamación y bajar la presión arterial. Por otro lado, también tienen la capacidad de inhibir el crecimiento de hongos que dañan frutas y verduras después de la cosecha, lo que puede ayudar a conservar mejor los alimentos y reducir pérdidas en su almacenamiento. Estos hallazgos, sumados a la notable diversidad genética y metabólica del género, resaltan la importancia de los programas de conservación y mejoramiento que buscan desarrollar variedades con aplicaciones específicas en sanidad vegetal y salud humana. Así, el chayote se proyecta como un recurso con un enorme potencial, capaz de contribuir tanto a la innovación en biotecnología agrícola como a la generación de productos más seguros y sostenibles.

Conservación y perspectivas para el uso sostenible

El chayote presenta una gran diversidad de variedades, muchas de ellas surgidas gracias a su cultivo a lo largo del tiempo y a cruces con plantas silvestres. Esta riqueza genética es valiosa y debe conservarse, por lo que se recomienda utilizar dos estrategias complementarias: Por un lado, la conservación *in situ*, que consiste en proteger estas variedades en los mismos lugares donde se cultivan o crecen de forma natural, permitiendo que sigan adaptándose a su entorno. Y, por otro lado, la conservación *ex situ*, que implica guardar semillas, plantas o tejidos en bancos especiales o viveros, donde se mantienen en condiciones controladas para evitar su pérdida y facilitar futuras investigaciones o usos agrícolas. La pérdida de hábitats y la reducción de la diversidad genética amenazan la conservación del *S. edule*, justo en el momento en que comienzan a descubrirse los



beneficios de sus compuestos para la salud y la medicina. La integración de esfuerzos para la caracterización genética, la fitoquímica y los estudios de actividad biológica favorecerá la generación de conocimientos que permitan diseñar planes de mejoramiento enfocados en incrementar la producción de metabolitos de interés farmacológico. A la par, se han propuesto iniciativas como la microencapsulación de extractos para preservar y prolongar la acción de sus principios activos (Salazar-Aguilar et al., 2022), además de ensayos preclínicos dirigidos a validar la seguridad de su consumo en humanos.

Este panorama invita a profundizar en la validación de las propiedades bioactivas mediante estudios clínicos, los cuales deberán precisar dosis efectivas y posibles efectos adversos. La conjugación de la investigación básica con la tecnología y la preservación de la variabilidad genética será clave para que el chayote se consolide como una alternativa nutracéutica y, potencialmente, terapéutica frente a diversos trastornos de salud.

Discusión académica

El chayote, históricamente valorado como alimento, ha despertado un interés creciente en la ciencia debido a su diversidad genética, metabólica y a su potencial en la salud y la agroindustria. Su estudio ha permitido comprender cómo la domesticación ha influido en la selección de variedades con atributos específicos, desde frutos de sabor suave y texturas agradables hasta aquellos con mayor contenido de compuestos bioactivos. A pesar de que la selección humana ha favorecido variedades destinadas al consumo fresco, investigaciones recientes han puesto en evidencia que las líneas silvestres y aquellas con sabor amargo concentran mayores niveles de metabolitos secundarios con propiedades potencialmente beneficiosas para la salud (Cadena-Iñiguez et al., 2024a). El análisis fitoquímico ha permitido identificar una gran cantidad de compuestos bioactivos (metabolitos secundarios), cuyas funciones en la planta incluyen mecanismos de defensa contra plagas y patógenos. Desde el punto de vista biomédico, estos mismos compuestos han mostrado efectos prometedores en la inhibición del crecimiento de células cancerígenas, así como propiedades antioxidantes y antiinflamatorias que podrían ser útiles en la prevención de enfermedades crónicas (Aguñiga-Sánchez et al., 2015). No obstante, trasladar estos hallazgos al ámbito clínico requiere investigaciones más profundas que permitan conocer con precisión su biodisponibilidad, mecanismos de acción y posibles efectos adversos. En la agricultura, el chayote y sus parientes silvestres también han demostrado ser una fuente prometedora de soluciones naturales para el control de enfermedades postcosecha. Su actividad fungistática frente a *Botrytis cinerea* resalta la

posibilidad de desarrollar bioinsumos basados en extractos naturales, reduciendo así la dependencia de fungicidas sintéticos y alineándose con prácticas agrícolas más sostenibles (Ramírez-Rodas *et al.*, 2021; Gordillo-Salinas *et al.*, 2022). Sin embargo, aún es necesario estandarizar métodos de extracción y evaluar la estabilidad de estos compuestos en condiciones de almacenamiento y aplicación.

Por otro lado, la conservación de la diversidad genética del chayote se presenta como un reto clave. La domesticación y la presión comercial han reducido la variabilidad disponible en los cultivos, lo que podría limitar futuras oportunidades de aprovechamiento. Es fundamental fortalecer bancos de germoplasma como el BANGES y promover estrategias de conservación *in situ*, asegurando que esta especie y sus variedades sigan siendo una fuente de recursos tanto para la alimentación como para la ciencia y la industria.

En este contexto, el chayote se posiciona como un modelo ideal para estudiar la relación entre diversidad genética, metabolismo vegetal y aplicaciones funcionales. Su estudio no solo permite conocer mejor los mecanismos biológicos que determinan su riqueza fitoquímica, sino que también abre la puerta a innovaciones en salud, agricultura y biotecnología, reafirmando su importancia como un recurso con gran potencial científico y comercial.

Consideraciones finales y perspectivas

El chayote ha trascendido su papel tradicional como alimento para convertirse en un recurso de gran interés en diversas áreas científicas y tecnológicas. Su diversidad genética y química lo posiciona como un modelo valioso para el desarrollo de nuevos productos con impacto en la salud humana, la seguridad alimentaria y la producción agrícola sustentable. Uno de los principales desafíos en su aprovechamiento es la validación de sus propiedades bioactivas en estudios clínicos. Aunque los ensayos en modelos celulares y animales han sido prometedores, es necesario avanzar en la investigación de su seguridad y eficacia en humanos. Para ello, será clave el desarrollo de métodos estandarizados para la extracción y formulación de sus compuestos activos, así como estudios que determinen su biodisponibilidad y mecanismos de acción en el organismo. En el ámbito agrícola y agroindustrial, el uso de extractos de *S. edule* como conservadores naturales o biofungicidas abre oportunidades para reducir el uso de químicos sintéticos en la producción de alimentos. No obstante, para su implementación a gran escala, será necesario optimizar su estabilidad y efectividad en distintos sistemas de producción y poscosecha. Asimismo, la conservación y el



mejoramiento genético del chayote representan una estrategia clave para el futuro. El rescate de variedades subutilizadas y la exploración de parientes silvestres pueden aportar nuevas oportunidades en el desarrollo de líneas con perfiles fitoquímicos optimizados, ya sea para su uso en la alimentación o en la industria biomédica. Finalmente, la aplicación de tecnologías emergentes, como la microencapsulación de extractos para mejorar su estabilidad o el uso de herramientas ómicas para identificar genes clave en la producción de metabolitos de interés, permitirá impulsar su valorización y consolidar su impacto en el sector de la biotecnología. En este escenario, el chayote no solo se mantiene como un alimento versátil y nutritivo, sino que también se proyecta como un recurso con aplicaciones innovadoras en la salud y la industria. Su estudio y conservación resultan esenciales para garantizar su aprovechamiento en el futuro, asegurando su lugar en el desarrollo de productos naturales y sustentables con alto valor agregado.

Agradecimientos

Los autores de este artículo agradecen al Grupo Interdisciplinario de Investigación en *Sechium edule* en México (GISEM) y al Colegio de Postgraduados (COLPOS) por financiar la investigación a través del proyecto CONV_RGAA_2024_62 donde actualmente se están evaluando el metaboloma de dos genotipos de *S. edule*.

Literatura citada

- Aguiñiga-Sánchez, I., M. Soto-Hernández, J. Cadena-Iñiguez, L.D.M. Ruíz-Posadas, J.D. Cadena-Zamudio, A.K. González-Ugarte y E. Santiago-Osorio. 2015. *Fruit extract from a Sechium edule hybrid induce apoptosis in leukaemic cell lines but not in normal cells*. Nutrition and Cancer 67 (2): 250–257.
- Arista-Ugalde, T.L., E. Santiago-Osorio, A. Monroy-García, J. Rosado-Pérez, I. Aguiñiga-Sánchez, J. Cadena-Iñiguez y V.M. Mendoza-Núñez. 2022. *Antioxidant and anti-inflammatory effect of the consumption of powdered concentrate of Sechium edule var. nigrum spinosum in Mexican older adults with metabolic syndrome*. Antioxidants 11 (6): 1076.
- Barrera-Guzmán, L.A., J. Cadena-Iñiguez, J.P. Legaria-Solano y J. Sahagún-Castellanos. 2021a. *Phylogenetics of the genus Sechium P. Brown: A review*. Spanish Journal of Agricultural Research 19 (1): e07R01.

- Barrera-Guzmán, L.Á., J.P. Legaria-Solano, J. Cadena-Iñiguez y J. Sahagún-Castellanos. 2021b. *Phylogenetic relationships among Mexican species of the genus Sechium (Cucurbitaceae)*. Turkish Journal of Botany 45 (4): 302–314.
- Cadena-Iñiguez, J., L. Arévalo-Galarza, C.H. Avendaño-Arrazate, M. Soto-Hernández, L.D.M. Ruiz-Posadas, E. Santiago-Osorio y D. Ochoa-Martínez. 2007. *Production, genetics, postharvest management and pharmacological characteristics of Sechium edule (Jacq.) Sw.* Fresh Produce 1 (1): 41–53.
- Cadena-Iñiguez, J., C.H. Avendaño-Arrazate, M. Soto-Hernández, L.M. Ruiz-Posadas, J.F. Aguirre-Medina y L. Arévalo-Galarza. 2008. *Infraspecific variation of Sechium edule (Jacq.) Sw. in the state of Veracruz, Mexico*. Genetic Resources and Crop Evolution 55 (6): 835–847.
- Cadena-Iñiguez, J., M. Soto-Hernández, M. Arévalo-Galarza, C.H. Avendaño-Arrazate, J.F. Aguirre-Medina y L.D.M. Ruiz-Posadas. 2011. *Caracterización bioquímica de variedades domesticadas de chayote Sechium edule (Jacq.) Sw. comparadas con parientes silvestres*. Revista Chapingo. Serie Horticultura 17 (SPE2): 45–55.
- Cadena-Iñiguez, J., M. Soto-Hernández, A. Torres-Salas, I. Aguiñiga-Sánchez, L. Ruiz-Posadas, A.R. Rivera-Martínez y E. Santiago-Osorio. 2013. *The antiproliferative effect of chayote varieties (Sechium edule (Jacq.) Sw.) on tumour cell lines*. Journal of Medicinal Plants Research 7: 455–460.
- Cadena-Iñiguez, J., I. Aguiñiga-Sánchez, M.T. Urióstegui-Arias, E. Santiago-Osorio, L.D.M. Ruiz-Posadas y M. Soto-Hernández. 2022. *Antiproliferative effect of Sechium edule (Jacq.) Sw., cv. Madre negra extracts on breast cancer in vitro*. Separations 9 (9): 230.
- Cadena-Iñiguez, J., L.A. Barrera-Guzmán, V.M. Cisneros-Solano, C.H. Avendaño-Arrazate, C. María de Lourdes, K.N. Watanabe y J.D. Cadena-Zamudio. 2024a. *Analysis of passport data of Sechium spp. from the Mexican chayote genebank in Huatusco, Veracruz*. Genetic Resources 5 (10): 126–138.
- Cadena-Iñiguez, J., J.F. Aguirre-Medina, D.A. Cadena-Zamudio, L.D.M. Ruiz-Posadas, J.D. Cadena-Zamudio, L.A. Barrera-Guzmán y M. de Lourdes Arévalo-Galarza. 2024b. *Limitations in the growth and development of chayote (Sechium edule (Jacq.) Sw.) due to habitat change*. Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca 52 (4): 14002.
- Gordillo-Salinas, L.S., M.L. Arévalo-Galarza, Y.C. Ramírez-Rodas, B. Tlapal-Bolaños, A. Villegas-Monter y J. Cadena-Iñiguez. 2021. *In vitro antifungal activity of wild chayote fruit juice (Sechium compositum) on Botrytis cinerea*. En: V International Conference on Postharvest and Quality Management of Horticultural Products of Interest for Tropical Regions. Acta Horticulturae 1340: 185–190.



- Hammer, K. y J. Heller. 1998. *Promoting the conservation and use of underutilized and neglected crops*. Schriften zu genetischen Ressourcen 8: 223–227.
- Iñiguez-Luna, M.I., J. Cadena-Iñiguez, R.M. Soto-Hernández, F.J. Morales-Flores, M. Cortés-Cruz, K.N. Watanabe y J.D. Cadena-Zamudio. 2021a. *Bioprospecting of *Sechium* spp. varieties for the selection of characters with pharmacological activity*. Scientific Reports 11 (1): 6185.
- Iñiguez-Luna, M.I., J. Cadena-Iñiguez, R.M. Soto-Hernández, F.J. Morales-Flores, M. Cortés-Cruz y K.N. Watanabe. 2021b. *Natural bioactive compounds of *Sechium* spp. for therapeutic and nutraceutical supplements*. Frontiers in Plant Science 12: 772389.
- Monroy-Vázquez, M.E., M. Soto-Hernández, J. Cadena-Iñiguez, E. Santiago-Osorio, L.D.M. Ruiz-Posadas y H. Rosas-Acevedo. 2009. *Estudio biodirigido de un extracto alcohólico de frutos de *Sechium edule* (Jacq.) Swartz*. Agrociencia 43 (8): 777–790.
- Ramírez-Rodas, Y., L. Arévalo-Galarza, J. Cadena-Iñiguez, A. Delgado-Alvarado, L. Ruiz-Posadas y M. Soto-Hernández. 2021. *Postharvest storage of three chayote (*Sechium edule* (Jacq.) Sw.) varieties*. Scientia Agropecuaria 12 (2): 239–247.
- Rivera-Martínez, A.R., I. Aguiñiga-Sánchez, J. Cadena-Iñiguez, I. Soto-Cruz, A. Monroy-García, G. Gómez-García y E. Santiago-Osorio. 2023. *Fruit extract of *Sechium chinantlense* (Lira & F. Chiang) induces apoptosis in the human cervical cancer HeLa cell line*. Nutrients 15 (3): 667.
- Salazar-Aguilar, S., L.D.M. Ruiz-Posadas, J. Cadena-Iñiguez, M. Soto-Hernández, E. Santiago-Osorio, I. Aguiñiga-Sánchez y Á.D. Olivera. 2021. *Microencapsulation of an extract of *Sechium edule* (Jacq.) Sw., with antineoplastic activity*. Applied Sciences 12 (1): 24.
- Zhang, L.B., M.P. Simmons, A. Kocyan y S.S. Renner. 2006. *Phylogeny of the Cucurbitales based on DNA sequences of nine loci from three genomes: implications for morphological and sexual system evolution*. Molecular Phylogenetics and Evolution 39 (2): 305–322.

Semblanzas de los autores

- **Jorge David Cadena Zamudio**, Doctor en Ciencias por el Instituto de Ecología A.C., es experto en Biología molecular y ciencias ómicas, especializado en genómica, transcriptómica y metabolómica en plantas de interés agrícola y biomédico. Ha colaborado en proyectos de investigación en el ámbito de ciencia básica orientada a la conservación, uso y bioprospección de recursos genéticos, en proyectos estratégicos para el mejoramiento genético y la resiliencia a factores abióticos y en el área de transferencia de tecnología para la conservación, producción y formulación de bioinoculantes. Es miembro del SNII (nivel 1).

- **Marco Antonio Ramírez-Mosqueda**, Doctor en Ciencias por la Universidad Veracruzana, es experto en el desarrollo de técnicas de cultivo de tejidos vegetales (micropropagación, sistemas de inmersión temporal, organogénesis indirecta) aplicadas a especies de interés agrícola, ornamental y de conservación. Ha liderado y participado en múltiples proyectos de investigación orientados al mejoramiento de protocolos de propagación *in vitro* de plantas, incluyendo la selección in vitro de variedades con resistencia a patógenos como *Fusarium oxysporum*. También ha registrado patentes relacionadas con procesos de micropropagación a escala comercial de *Stevia* spp. Es miembro del SNII (nivel 2).
- **José Luis Aguirre Noyola**, Doctor en Ciencias por el Centro de Ciencias Genómicas de la UNAM y experto en genómica y bioquímica, especializado en metagenómica, transcriptómica y nanobiotecnología. Ha colaborado y dirigido proyectos de investigación en ciencia básica y aplicada, orientados al estudio de la fijación biológica de nitrógeno en maíz y leguminosas, así como al impacto de la domesticación y las prácticas agrícolas en las interacciones planta-microorganismo. También ha trabajado en el uso de microorganismos para la producción de bioinoculantes y nanopartículas de síntesis verde. Es miembro del SNII (nivel 1).
- **Alma Armenta-Medina**, Doctora en ciencias por el CINVESTAV-Irapuato, es experta en genética, biología molecular y genómica, y ha desarrollado una amplia comprensión del desarrollo reproductivo, embriogénesis y biología de semillas en plantas. Ha desarrollado proyectos sobre edición en genética vegetal utilizando técnicas como CRISPR/Cas, trabajando principalmente con *Arabidopsis thaliana*, *Brassica Napus* y *Zea mays*, desentrañando los mecanismos moleculares de los microRNAs en el desarrollo de las plantas y su respuesta a estrés biótico y abiótico, así como todo lo relacionado con desarrollo de semillas desde la fecundación hasta la germinación. Es miembro del SNII (nivel 1).
- **Jorge Cadena-Iñiguez**, Doctor por el Colegio de Postgraduados (COLPOS), es experto en el estudio y aprovechamiento de la agrobiodiversidad, la conservación de recursos genéticos y la agroecología aplicada a sistemas campesinos. Su línea de trabajo se centra en la generación de conocimiento científico y tecnológico orientado a fortalecer la sustentabilidad de los sistemas agrícolas y la seguridad alimentaria. Ha participado en múltiples proyectos orientados la conservación y uso de recursos genéticos de importancia alimentaria, proyectos dedicados a la valoración y caracterización de *Sechium edule*, proyectos en la



línea de agroecología y sistemas de producción campesinos, orientados que integran saberes tradicionales y ciencia moderna, fomentando estrategias de mejoramiento participativo, diversificación productiva y manejo agroecológico, contribuyendo a la resiliencia de los agricultores frente a factores bióticos, abióticos y socioeconómicos. De manera complementaria, ha participado en iniciativas de innovación y desarrollo rural sustentable, orientadas a la transferencia de conocimientos y tecnologías que fortalezcan las capacidades locales, con impacto directo en comunidades rurales y productores de pequeña escala. Es miembro del SNII (nivel 2)

- **María Isabel Iñiguez-Luna**, Doctora en ciencias por la Universidad Veracruzana, es experta en el área de la bioprospección de metabolitos secundarios y el análisis *in silico* de interacciones moleculares con potencial terapéutico. Su enfoque se centra en la identificación de compuestos bioactivos de origen vegetal y en la aplicación de herramientas multiómicas para la investigación biomédica. Ha colaborado en proyectos de investigación en el ámbito de ciencia básica orientada a la caracterización de recursos fitogenéticos, asimismo, ha participado en proyectos de aplicación biotecnológica y transferencia de conocimiento, orientados a la validación experimental y la propuesta de modelos *in silico* que apoyen el diseño de terapias personalizadas y el aprovechamiento de metabolitos naturales en salud humana. Es miembro del SNII (nivel candidato).

Cita

Cadena-Zamudio, J.D., M.A. Ramírez-Mosqueda, J.L. Aguirre-Noyola, A. Armenta-Medina, J. Cadena-Iñiguez y M.I. Iñiguez-Luna. Chayote (*Sechium edule*): un recurso genético con gran riqueza metabólica y valor biomédico. Recursos Naturales y Sociedad, 2025. Vol. 11 (3): 221 - 238. <https://doi.org/10.18846/renaysoc.2025.11.11.03.0013>.

Sometido: 11 de abril de 2025

Aceptado: 01 de octubre de 2025

Editor asociado: Dr. Arturo Sánchez Paz

Editor ejecutivo: Dr. Arturo Sánchez Paz

Diseño gráfico editorial: Ing. Francisca Elizabeth Villegas Carrasco

Genes on the move:
migration and gene flow as drivers of genetic diversity

Genes en movimiento: la migración y el flujo génico como motores de diversidad genética

Marlen Sabina Alvarado-Cárdenas¹, Juan Pablo Enríquez-Ruíz¹,
Jesús Hiram Otero-Campa¹, Jonatan Hiram Pallanes-Dávila¹,
Andrea Estefanía Vázquez-Puebla¹, Alejandro Varela-Romero¹,
Nohelia Guadalupe Pacheco-Hoyos¹ y José Manuel Grijalva-Chon^{1*}

Resumen

El flujo genético es un proceso evolutivo que permite el intercambio de variantes de genes entre distintas poblaciones de una especie, modificando su diversidad y volviéndolas similares. Este fenómeno puede ocurrir de forma natural, pero también puede ser inducido artificialmente por los seres humanos. En el presente ensayo se exploran sus mecanismos, las barreras que pueden limitarlo, así como sus efectos en la variabilidad genética en la población receptora. También se abordan sus aplicaciones en conservación y los posibles riesgos ecológicos cuando no se regula adecuadamente. Se concluye que, aunque el flujo génico puede ser beneficioso, requiere regulación y análisis ético cuando es inducido artificialmente, debido a sus posibles consecuencias ambientales.

Palabras clave: Migración, flujo genético, evolución, rescate genético, variabilidad genética.

¹ Universidad de Sonora. Departamento de Investigaciones Científicas y Tecnológicas. Laboratorio de Ecología Molecular. Ave. Colosio s/n, Col. Centro. Hermosillo, Sonora, México CP 83000.

* Autor de correspondencia: manuel.grijalva@unison.mx Cel: 662-4000390



Abstract

Gene flow is an evolutionary process that enables the exchange of genetic variants between different populations of a species, thereby modifying their genetic diversity and increasing their similarity to one another. Although this phenomenon can occur naturally, humans can artificially induce it. This essay examines its mechanisms, the barriers that can limit its effectiveness, and its impact on genetic variability in the recipient population. It also addresses its applications in conservation and the potential ecological risks associated with inadequate regulation. It concludes that, although gene flow can be beneficial, it requires regulation and ethical analysis when artificially induced, due to its potential environmental consequences.

Keywords: Migration, gene flow, evolution, genetic rescue, genetic variability.

Introducción

La increíble biodiversidad presente en nuestro planeta es un fenómeno que desde los tiempos de Charles Darwin y hasta la fecha ha impresionado a comunidades enteras de científicos y filósofos. Cuando pensamos en diversidad de especies vivientes, tenemos que recordar que ésta se ha ido formando a partir de los cambios graduales a los que las poblaciones están sujetas (Benton, 2015). Estos cambios hoy en día son atribuidos a diversas fuerzas que los impulsan, conocidas como fuerzas evolutivas y actualmente se conocen cuatro: mutación, deriva genética, migración y selección natural.

Gran parte de los enfoques en evolución se centran en la selección natural, la cual es el proceso evolutivo que favorece a los organismos mejor adaptados a su entorno, aumentando sus posibilidades de sobrevivir y reproducirse. Sin embargo, los avances científicos en técnicas moleculares han permitido medir de manera cualitativa y cuantitativa el peso que tienen las demás fuerzas evolutivas, como la migración, sobre los diferentes efectos de cambio en las poblaciones (Araujo-Soto, 2020). La migración, entendida como un fenómeno de desplazamiento de individuos de un lugar a otro, tiene un impacto sobre los ecosistemas y para los individuos de una especie puede ser un mecanismo de supervivencia. El impacto de la migración sigue siendo relevante en campos como la conservación biológica, la agricultura y la biotecnología. De esta forma, la migración, junto a la mutación, son fuerzas que propician directamente la diversidad genética en las poblaciones. Muchas especies silvestres, desde aves

y peces hasta mamíferos e insectos, realizan migraciones periódicas que les permiten sobrevivir y prosperar en diferentes entornos. Estos desplazamientos no solo tienen un impacto profundo en los individuos que migran, sino que también influyen significativamente en la estructura genética, la dinámica poblacional y la ecología de los lugares a los que migran.

En un mundo donde la intervención humana en los ecosistemas aumenta de forma continua, ya sea a través de organismos genéticamente modificados, reproducción asistida o modificaciones del entorno natural, es esencial entender cómo funciona la migración y el flujo genético, así como sus efectos. Por lo tanto, surge la siguiente interrogante: ¿qué impacto tiene este proceso, ya sea natural o artificial, en la diversidad genética de las especies? Este ensayo tiene como propósito examinar cómo ocurre el flujo genético, sus implicaciones en la diversidad genética y los desafíos que surgen cuando este proceso es alterado o inducido por intervención humana. Comprender su funcionamiento es crucial, ya que, si bien puede ser una herramienta para la adaptación y la supervivencia, también puede representar un riesgo para los ecosistemas cuando se produce de manera artificial, no controlada o con efectos no previstos. Esta doble cara del flujo genético lo convierte en un tema central para el diseño de estrategias de conservación.

¿Son la migración y flujo genético lo mismo?

Abordemos primero la migración considerando dos categorías. Una de ellas se refiere a las migraciones periódicas o estacionales, que implican la participación de todos o casi todos los individuos de la especie en un tránsito de ida y vuelta y acoplado en muchos casos a los ciclos de reproducción, por ejemplo, México recibe cada invierno a varias especies, entre las que podemos mencionar están la ballena gris (*Eschrichtius robustus*), la mariposa monarca (*Danaus plexippus*), los pelícanos blancos (*Pelecanus erythrorhynchos*) y el colibrí rufo (*Selasphorus rufus*) (Fig. 1), entre otros. La otra categoría de migración ocurre cuando la distribución de una especie se divide en varias poblaciones separadas y bajo ciertas circunstancias algunos individuos de una población pueden moverse a otra. Esta separación poblacional puede deberse a la fragmentación del área de distribución original de la especie debido a la intervención humana, como la ocupación urbana, el establecimiento de áreas agrícolas, la deforestación o la destrucción de hábitat por varios motivos. Si esta distribución fragmentada de la especie se mantiene sin migrantes entre las poblaciones, entonces cada una de las poblaciones se diferenciará del resto de manera independiente. Esta diferenciación generada paulatinamente a través de generaciones puede interrumpirse cuando los individuos de una población migran a otra.



Ahora bien, el flujo genético es el movimiento exitoso de genes entre las poblaciones, ya sea por migración o por el traslado de gametos. Por lo tanto, este proceso y la migración no son lo mismo, debido a que la migración es simplemente el movimiento de individuos de un lugar a otro, mientras que el flujo genético requiere la reproducción exitosa entre los individuos migrantes y las poblaciones a las que se unen o visitan, por lo que, si un individuo migrante no procrea en la población a la que llega, no habrá impacto genético. El flujo genético puede ocurrir sin migración directa de organismos, como sucede en muchas plantas donde los gametos masculinos (granos de polen) se dispersan sin que los individuos se desplacen.

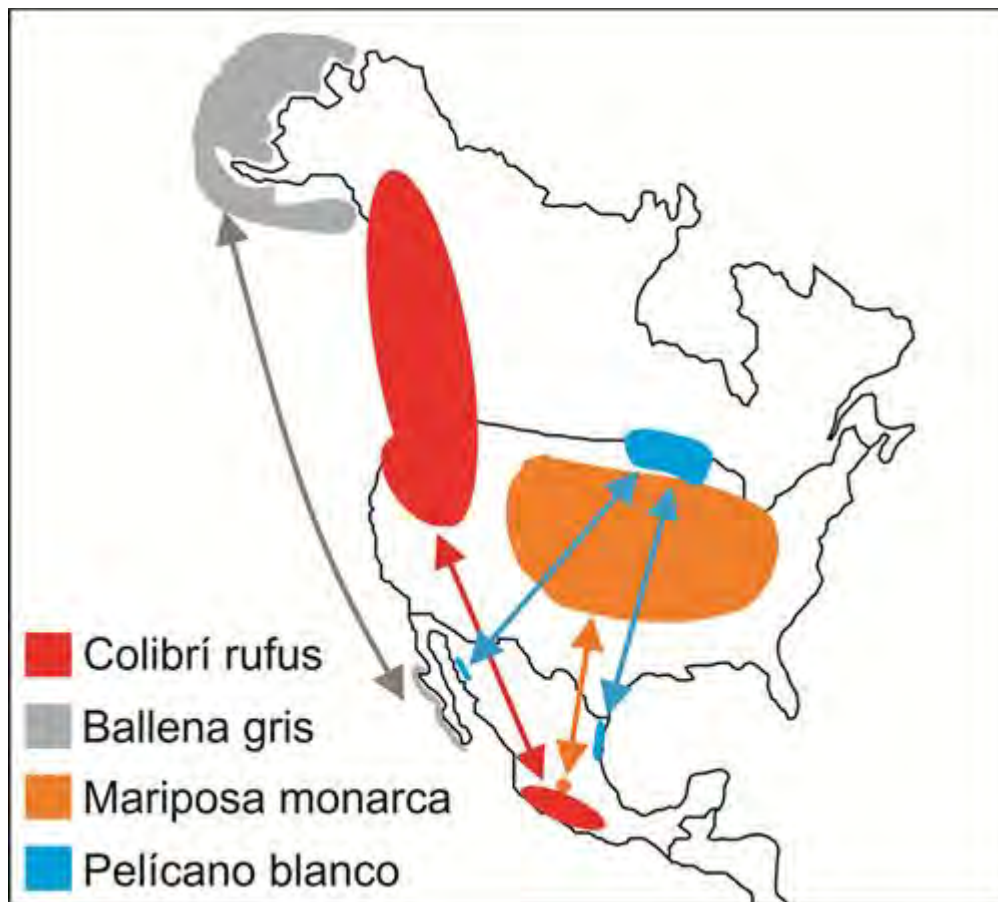


Figura 1. Distribución aproximada de algunas especies que realizan grandes migraciones hacia México.

En ocasiones una especie habita un área amplia y aparentemente continua, sin embargo, puede haber parches poblacionales diferenciados. Dentro de cada uno de estos parches, las probabilidades de que dos individuos se reproduzcan depende de su ubicación dentro de la población. En esto influyen dos aspectos: la extensión del área de distribución de la especie y la capacidad de desplazamiento de los individuos ya que la distancia puede ser un reto a vencer. Ejemplo de esto es una especie con limitadas capacidades de desplazamiento, como lo puede ser el camarón hada (*Branchipodopsis wolffi*), un pequeño crustáceo que vive en pozas o charcas efímeras en zonas rocosas del sur de África. Su área de distribución geográfica es muy amplia pero los organismos se reproducen con individuos de la misma poza o con los que viven en pozas

cercanas si hay desbordamiento debido a fuertes lluvias torrenciales. Una característica del ciclo reproductivo de esta especie es que puede depositar huevecillos que se enquistan para resistir largos períodos de desecación. Hulsmans *et al.* (2007) comprueban con un análisis genético que este crustáceo tiene la oportunidad de reproducirse con otros de su especie en pozas tan alejadas como 50 km ya que sus huevecillos enquistados pueden ser transportados por fuertes viento o por las patas de aves que se posan en el área de la poza (Fig. 2). En ese estudio se puso en evidencia que la distancia determina el grado de similitud genética entre las poblaciones que tienen una distribución geográfica fragmentada: a mayor distancia geográfica, menor oportunidad de reproducirse y por lo tanto menor similitud genética. A este fenómeno se le conoce como aislamiento por distancia, lo que provoca que se formen pequeñas subpoblaciones con características genéticas propias (Hamilton, 2009). Además, el aislamiento por distancia también puede ocurrir como resultado de relaciones complejas como una competencia interespecífica, es decir, competencia entre dos especies. Borzée *et al.* (2016) demostraron que dos especies de rana (*Hyla japonica* y *Hyla suweonensis*) pueden distribuirse de una manera no homogénea debido a la competencia por los espacios, lo que fragmenta la distribución y por lo tanto las probabilidades de encuentros reproductivos.

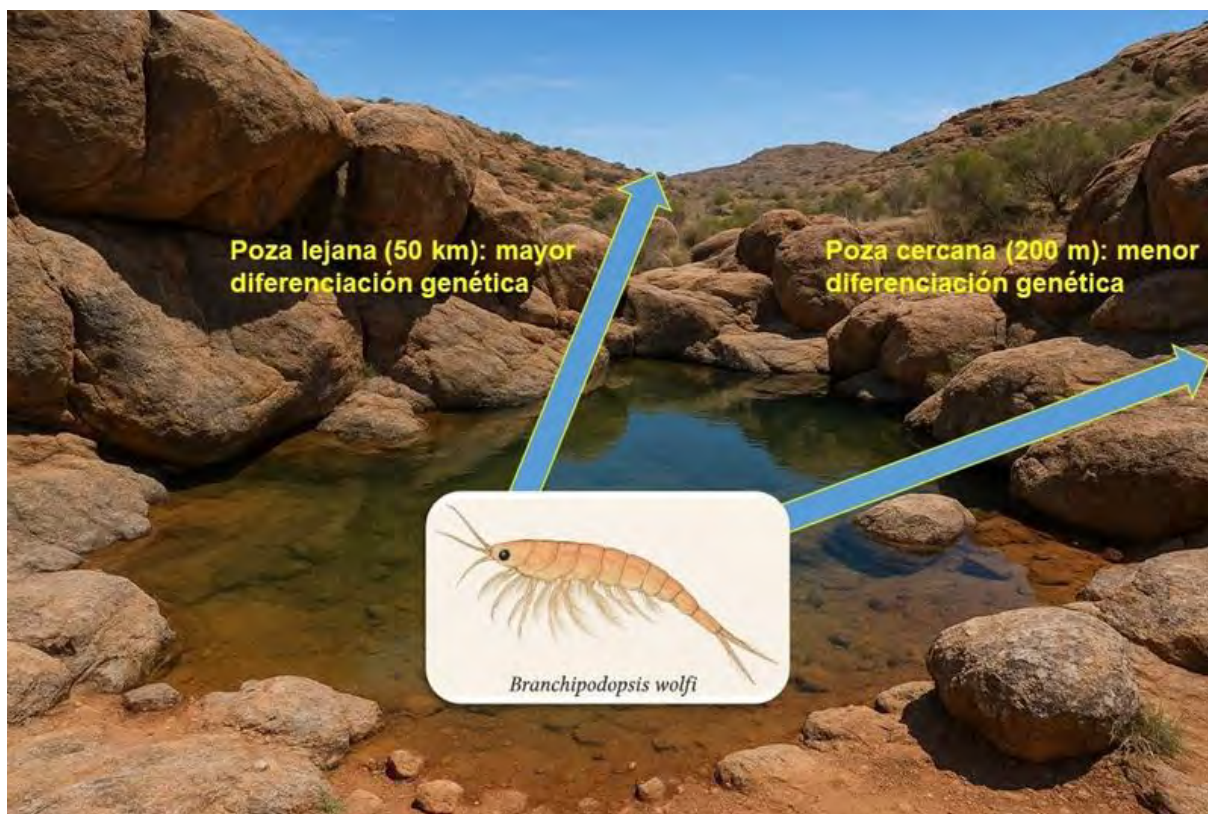


Figura 2. El crustáceo hada (*Branchipodopsis wolfi*) vive en pequeñas charcas efímeras en el sur de África y es más probable que se cruce con organismos de charcas cercanas que con organismos de charcas lejanas.



Relación entre flujo génico y diversidad genética

El flujo genético tiene dos efectos principales en las poblaciones involucradas, siendo el primero el aumento de la diversidad genética, ya que cada población puede generar diferentes características que se comparten mediante el flujo, enriqueciendo así la diversidad genética de la población que las recibe (Pierce, 2005). La diversidad genética es esencial para la supervivencia de una población, debido a que aumenta las probabilidades de que algunos individuos posean combinaciones genéticas que les permitan adaptarse a cambios ambientales. En este contexto, el flujo genético cumple una función clave: introduce nuevas formas alternativas de los genes, lo que se conoce como alelos, que enriquecen el acervo genético de una población, contrarrestando los efectos de procesos que tienden a reducir la diversidad (Pierce, 2005; Hamilton, 2009). Esto es particularmente relevante en poblaciones pequeñas o aisladas, donde los individuos suelen compartir un alto grado de parentesco que puede provocar la acumulación de alelos que afectan la salud y la fertilidad del grupo. El ingreso de nuevas alternativas genéticas, a través del flujo genético, puede restaurar parte de la variabilidad genética perdida y mejorar la viabilidad del conjunto (Pierce, 2005). Sin embargo, si el flujo genético se define como la introducción de alelos de diferentes poblaciones, puede implicar la dispersión de alelos asociados a enfermedades hereditarias. No siempre “adquirir” genes aumenta las probabilidades de adaptarse a cambios ambientales. Si se tiene la fortuna de que se introduzcan genes “buenos” se puede tener éxito, pero en la “ruleta genética” también se pueden “adquirir” genes defectuosos que induzcan efectos no benéficos. Pero el beneficio neto del flujo genético es que proporciona el “material” sobre el cual puede actuar la selección natural, favoreciendo a aquellos individuos que portan alelos más adaptativos en determinados contextos ambientales (Hamilton, 2009).

Ahora bien, el segundo de los efectos principales del flujo es la similitud u homogeneización entre las características genéticas de la población a la que se migró (Pierce, 2005). Imaginemos tres poblaciones separadas y aisladas entre sí y que se han diferenciado en el porcentaje o la frecuencia de individuos que son portadores de la variante A de un gen. En la figura 3A, la población 1 se caracteriza porque el 40% de la población es portadora de la variante genética A, mientras que en la población 2 el 80% son portadores y en la población 3 el 20% son portadores. En un momento dado se establece un puente migratorio de la población 1 hacia la 2 y 3 de tal forma que un 10% de la población 1 migra anualmente hacia las otras dos poblaciones. Mientras el flujo migratorio continua constante a través de las generaciones, las poblaciones 2 y 3 pasan a ser poco a poco más parecidas genéticamente a la población 1. Además, mientras más grandes sean inicialmente las diferencias genéticas entre las poblaciones, el efecto de la migración será mayor, pero irá decayendo poco a poco conforme las poblaciones se vayan haciendo similares

(Pierce, 2005). Los genetistas han desarrollado ecuaciones para calcular el número de generaciones necesarias para alcanzar una homogenización poblacional manteniendo un flujo migratorio constante a través de las generaciones. En nuestro ejemplo, después de 45 generaciones con una tasa migratoria del 10% generacional, las poblaciones 2 y 3 son prácticamente idénticas a la población 1 (Fig. 3B).

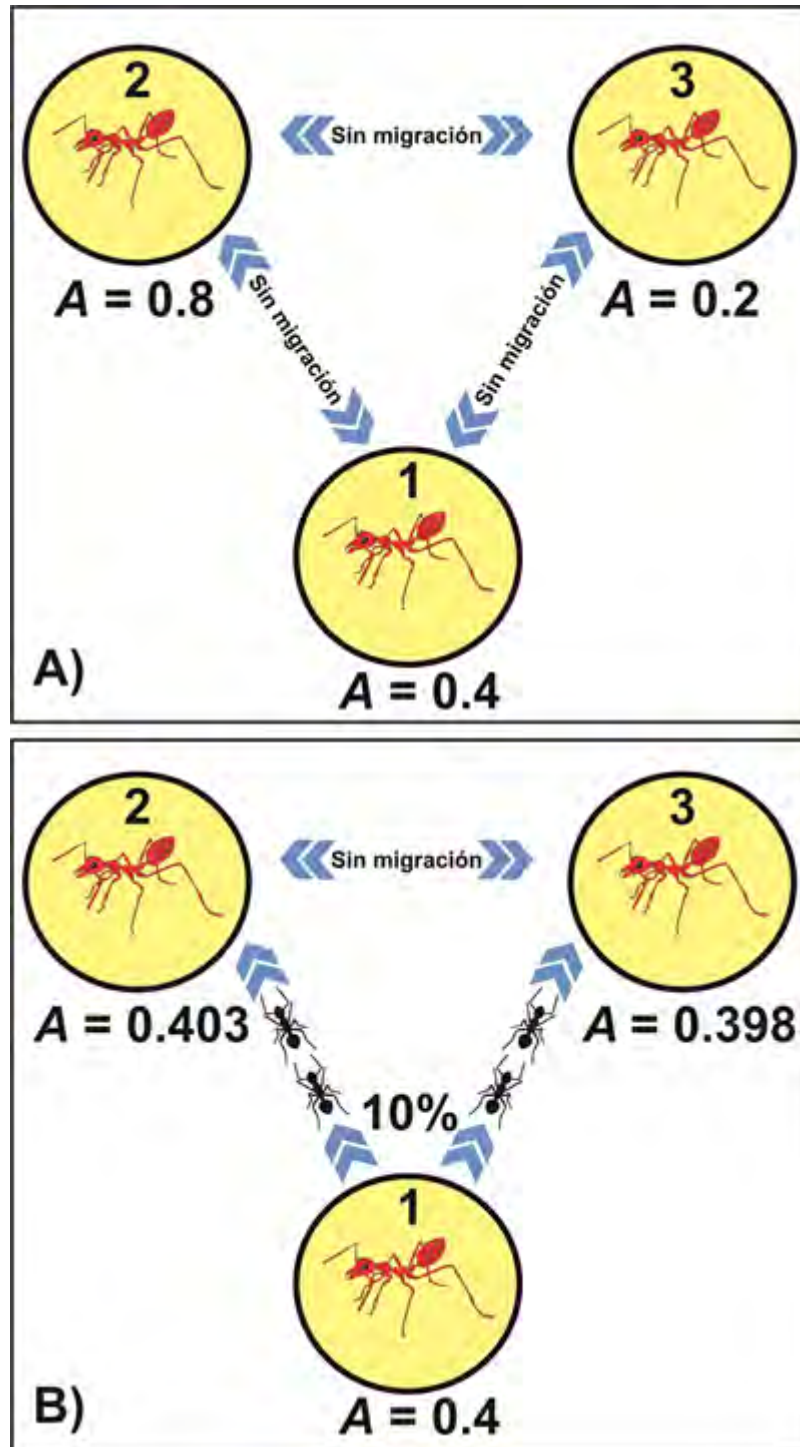


Figura 3. Efecto homogeneizador de la migración. En A) se muestran tres poblaciones aisladas y diferenciadas. En B) hay un flujo constante a una tasa del 10% por generación de la población 1 hacia las poblaciones 2 y 3. Después de 45 generaciones las tres poblaciones son prácticamente iguales si no hay alguna otra fuerza evolutiva que intervenga.



Causas e individuos que participan

Madrigal (2004) define la migración como *un fenómeno orientado principalmente en la búsqueda de sitios ideales de apareamiento y anidación, donde la cantidad de alimento es suficiente para mantener a toda la población e incluso a los nuevos miembros*. Ocurre en respuesta a un cambio en las condiciones físicas, químicas y biológicas, tanto del medio externo como de la fisiología del animal. De esta manera, las especies han logrado adaptarse a diferentes hábitats (que son ideales) que ocupan, y esto a su vez impide de cierto modo que las poblaciones se mantengan aisladas unas de otras durante largos periodos de tiempo por la reunión periódica en los sitios de apareamiento y anidación. Otro punto importante es que este proceso ayuda en gran medida al control de las poblaciones de depredadores por la fluctuante disponibilidad de las presas migrantes y también de las especies que sirven de alimento para los grupos que migran.

Implicaciones ecológicas y evolutivas

La importancia ecológica más importante es posiblemente la polinización y dispersión de semillas que algunas de las especies realizan durante su traslado migratorio. Por ejemplo, los murciélagos frugívoros que se alimentan de néctar y frutas realizan importantes funciones de polinización y dispersión de semillas de varias especies de plantas (Fig. 4). Villalobos-Chaves y Rodríguez-Herrera (2021) reportaron que los murciélagos *Artibeus phaeotis* y *Uroderma convexum* dispersaron 2,310 semillas en sus áreas de influencia y que, de éstas, 118 sobrevivieron para convertirse en plántulas. Si bien eso representa sólo un 5.1% de sobrevivencia de las semillas, los autores resaltan la importancia de los murciélagos en la dispersión y éxito reproductivo de las especies vegetales. Los colibríes también desempeñan un papel fundamental en el equilibrio biológico de los ecosistemas, especialmente como agentes polinizadores (Ruiz-Márquez, 2018). Muchos ciclos de migración en algunas especies están en coordinación con ciclos de floración de las plantas. El colibrí rufo viaja 6,300 kilómetros desde Alaska a México a finales del verano, después, migran hacia el norte a lo largo de la ruta migratoria del Pacífico. Este movimiento puede sincronizarse con el florecimiento de las flores y el brote de hojas nuevas en la primavera, que generalmente comienza a principios de marzo. Además, esta migración está también acoplada con la disponibilidad de insectos, que constituyen una importante fuente de alimento para estas aves durante su viaje migratorio (Welch y Suarez, 2008).

Considerando otra escala de tiempo, el flujo génico no es un fenómeno neutro: puede tener efectos tanto positivos como negativos en la dinámica evolutiva. Por un lado, facilita la adaptación al introducir nuevas variantes genéticas que podrían ser útiles; por otro, puede impedir la diferenciación genética necesaria para la especiación. Los modelos evolutivos han

mostrado que, incluso en presencia de flujo genético moderado, las poblaciones pueden divergir si hay una presión de selección lo suficientemente fuerte. Esto sucede, por ejemplo, cuando dos ambientes diferentes favorecen distintas combinaciones genéticas, lo que lleva a una evolución divergente a pesar del intercambio de genes (Hamilton, 2009), incluso en escenarios donde las poblaciones se adaptan de manera convergente, pero mediante rutas genéticas diferentes, pueden surgir descendientes híbridos inviables o estériles, reforzando así la separación evolutiva (Porter y Johnson, 2002).

Las consecuencias de la migración en las regiones de origen son muchas y muy variadas. La migración es uno de los componentes de cambio demográfico que, junto con la mortalidad y la fecundidad, puede afectar el crecimiento natural y la estructura por sexo y edades de la población, ya sea por sus efectos directos o indirectos, pues la población emigrante suele ser joven (potencialmente reproductiva) aumentando la natalidad y disminuyendo la mortalidad en la región de destino (CONAPO, 2010).



Figura 4. Los murciélagos frugívoros son importantes vehículos para la dispersión de semillas.



Implicaciones para la conservación

En el ámbito de la conservación biológica, el flujo genético puede ser una herramienta muy valiosa. Por ejemplo, en especies amenazadas cuyas poblaciones están fragmentadas, facilitar la migración entre estos fragmentos poblacionales, lo que se conoce como rescate genético, puede aumentar la viabilidad genética en las poblaciones pequeñas que estén en peligro de extinción (Pierce, 2005). Sin embargo, esta estrategia requiere un diseño cuidadoso ya que introducir individuos de poblaciones genéticamente muy diferentes podría causar desequilibrios como la eliminación de adaptaciones locales, que pueden ser contraproducentes en ambientes extremos o únicos (Hamilton, 2009). Además, otro posible riesgo de los migrantes rescatistas puede ser el éxito reproductivo extremo.

Hay dos ejemplos emblemáticos del éxito reproductivo extremo de migrantes rescatistas. Uno de ellos se dio en los Países Bajos, donde en la primera mitad de la década del 2000 se introdujeron nutrias para reestablecer una población extinta, sin embargo, después de unos años resultó que dos machos paternizaron dos tercios de la población, incrementando los niveles de endogamia (Koelewijn *et al.*, 2010). Otro ejemplo es de una población aislada de lobos en la Isla Royale del Lago Superior. Esa población aislada estaba en crisis genética por su reducido tamaño, situación que mejoró al principio por la introducción de un individuo macho, sin embargo, su extremo éxito reproductivo provocó que 10 años después se convirtiera en el ancestro de todos los lobos de la isla (Adams *et al.*, 2011).

Conclusión

La migración es un fenómeno esencial que impacta profundamente no solo a las poblaciones silvestres, sino también tiene fuertes repercusiones ecológicas de gran importancia. A través del aumento de la diversidad genética, la mejora de la conectividad poblacional y el desarrollo de adaptaciones especializadas, la migración contribuye a la salud y sostenibilidad de muchas especies, sobre todo cuando sus distribuciones geográficas están muy fragmentadas. Aún con lo anterior, cabe la posibilidad de generar riesgos ecológicos con la introducción de variantes genéticas que afecten las adaptaciones locales o al dificultar la especiación. Sin embargo, las amenazas actuales destacan la importancia de los esfuerzos de conservación para proteger a estos viajeros incansables y los ecosistemas que dependen de ellos. Comprender estos efectos es crucial para la conservación y el manejo de las especies migratorias.

Referencias

- Adams, J.R., L.M. Vucetich, P.W. Hedrick, R.O. Peterson y J.A. Vucetich. 2011. *Genomic sweep and potential genetic rescue during limiting environmental conditions in an isolate wolf population*. Proceedings of the Royal Society Biological Sciences 278: 3336-3344.
- Araujo Soto, A. 2020. *Migración y biología*. Universitaria 3(23): 28-29.
- Benton, M.J. 2015. *Exploring macroevolution using modern and fossil data*. Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences 282(1810): 20150569.
- Borzée, A., J.Y. Kim y Y. Jang. 2016. Asymmetric competition over calling sites in two closely related treefrog species. Scientific Reports 6: 32569.
- CONAPO. 2010. *Algunos efectos de la migración internacional en los lugares de origen y destino*. http://www.conapo.gob.mx/work/models/CONAPO/intensidad_migratoria/pdf/Efectos.pdf (consultado el 04/02/2025).
- Hamilton, M.B. 2009. *Population Genetics*. Wiley-Blackwell. Chichester, UK. 407 pp.
- Hulsmans, A., K. Moreau, L. De Meester, B.J. Riddoch y L. Brendonck. 2007. *Direct and indirect measures of dispersal in the fairy shrimp Branchipodopsis wolfi indicate a small-scale isolation-by-distance pattern*. Limnology and Oceanography 52: 676-684.
- Koelewijn, H., M. Perez-Haro, H.A.H. Jansman, M.C. Boerwinkel, J. Bovenschen, D.R. Lammertsma, F.J.J. Niewold y A.T. Kuiters. 2010. *The reintroduction of the Eurasian otter (Lutra lutra) into the Netherlands: hidden life revealed by noninvasive genetic monitoring*. Conservation Genetics 11: 601-614.
- Madrigal, Á. 2004. *Migración y emigración de especies*. Revista de Ciencias Ambientales 28(1): 3-12.
- Pierce, B.A. 2005. *Genética. Un enfoque conceptual*. Editorial Médica Panamericana. Madrid, España. 806 pp.
- Porter, A.H. y N.A. Johnson. 2002. *Speciation despite gene flow when developmental pathways evolve*. Evolution 56: 2103-2111.
- Ruiz-Márquez, A.A. 2018. *Importancia ecológica y estrategias de protección de los murciélagos migratorios de México con algún estatus de riesgo*. Tesis de Maestría. Colegio de la Frontera Sur. México. 78 pp.
- Villalobos-Chaves, D. y B. Rodríguez-Herrera. 2021. *Frugivorous bats promote epizoochoric seed dispersal and seedling survival in a disturbed Neotropical forest*. Journal of Mammology 102: 1507-1513.



Welch, K.C. y R.K. Suarez. 2008. *Altitude and temperature effects on the energetic cost of hover-feeding in migratory rufous hummingbirds, *Selasphorus rufus**. Canadian Journal of Zoology 86: 161-169.

Semblanzas de los autores

- **Marlen Sabina Alvarado-Cárdenas.** Estudiante de la Licenciatura en Biología de la Universidad de Sonora.
- **Juan Pablo Enríquez-Ruíz.** Estudiante de la Licenciatura en Biología de la Universidad de Sonora.
- **Jesús Hiram Otero-Campa.** Estudiante de la Licenciatura en Biología de la Universidad de Sonora.
- **Jonatan Hiram Pallanes-Dávila.** Estudiante de la Licenciatura en Biología de la Universidad de Sonora.
- **Andrea Estefanía Vázquez-Puebla.** Estudiante de la Licenciatura en Biología de la Universidad de Sonora.
- **Alejandro Varela-Romero.** Doctor en Ciencias por el Centro de Investigación en Alimentación y Desarrollo (CIAD) y Profesor-Investigador (SNII 2) en el Departamento de Investigaciones Científicas y Tecnológicas de la Universidad de Sonora, interesado principalmente en la filogenética y conservación de los peces nativos de agua dulce del noroeste de México.
- **Nohelia Guadalupe Pacheco-Hoyos.** Maestra en Ciencias por la Universidad Nacional Autónoma de México y Técnico Académico en el Departamento de Investigaciones Científicas y Tecnológicas de la Universidad de Sonora.
- **José Manuel Grijalva-Chon.** Doctor en Ciencias por el Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada (CICESE) y Profesor-Investigador (SNII 2) en el Departamento de Investigaciones Científicas y Tecnológicas de la Universidad de Sonora, interesado principalmente en la descripción de la estructura genética poblacional de especies marinas.

Cita

Alvarado-Cárdenas, M.S., J.P. Enríquez-Ruíz, J.H. Otero-Campa, J.H. Pallanes-Dávila, A.E. Vázquez-Puebla, A. Varela-Romero, N.G. Pacheco-Hoyos y J.M. Grijalva-Chon. Genes en movimiento: la migración y el flujo génico como motores de diversidad genética. Recursos Naturales y Sociedad, 2025. Vol. 11 (3): 240-252. <https://doi.org/10.18846/renaysoc.2025.11.11.03.0014>.

Sometido: 23 de mayo de 2025

Aceptado: 02 de octubre de 2025

Editor asociado: Dr. Arturo Sánchez Paz

Editor ejecutivo: Dr. Arturo Sánchez Paz

Diseño gráfico editorial: Ing. Francisca Elizabeth Villegas Carrasco

Microalgae: Potential allies against global warming

Microalgas: Aliadas potenciales contra el calentamiento global

Carlos Alejandro Pérez Rojas¹; María Concepción Lora Vilchis^{1*}

Resumen

El calentamiento global (CG) es una crisis ambiental causada por la acumulación de gases de efecto invernadero (GEI), generados por actividades humanas como la quema de combustibles fósiles y la deforestación. Las microalgas, microorganismos fotosintéticos que habitan en ambientes acuáticos, ofrecen una solución sostenible al capturar dióxido de carbono (CO₂) y transformarlo en biomasa, es decir, materia orgánica que puede aprovecharse para generar energía renovable, tratar aguas residuales o producir bioproductos. Estos incluyen compuestos bioactivos con propiedades beneficiosas para la salud, como pigmentos antioxidantes y ácidos grasos esenciales (omega-3), aplicables en suplementos, cosméticos y nutraceuticos. Por todo esto, las microalgas representan una alternativa prometedora para mitigar el CG. No obstante, su aprovechamiento enfrenta desafíos tecnológicos y económicos que requieren investigación y desarrollo.

Palabras clave: bioeconomía, captura de carbono, biorremediación, cultivo de microalgas, tecnologías limpias

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

* Autor de correspondencia: cony04@cibnor.mx



Abstract

Global warming is an environmental crisis driven by the accumulation of greenhouse gases (GHGs), primarily from human activities such as fossil fuel combustion and deforestation. Microalgae—photosynthetic microorganisms found in aquatic environments—offer a sustainable solution by capturing atmospheric CO₂ and converting it into biomass. This organic matter generates renewable energy, wastewater treatment, and the development of high value bioproducts. These include bioactive compounds with health-promoting properties, such as antioxidant pigments and essential fatty acids (omega-3), with applications in dietary supplements, cosmetics, and nutraceuticals. For all this, microalgae represent a promising strategy for mitigating global warming. However, their large-scale utilization still faces technological and economic challenges that demand further research and innovation.

Keywords: bioeconomy, carbon capture, bioremediation, microalgae cultivation, clean technologies

Introducción

Las actividades humanas como el uso de combustibles fósiles, la tala de árboles y la industrialización sin regulación sostenible han generado emisiones de GEI en grandes cantidades, como CO₂, metano (CH₄), óxidos de nitrógeno (N₂O) y gases fluorinados. Estos gases forman una capa en la atmósfera que impide la salida del calor, contribuyendo a efecto invernadero que provoca el CG (IPCC, 2023).

El CG se asocia con eventos climáticos extremos, pérdida de biodiversidad, acidificación de los océanos y escasez de recursos esenciales (IPCC, 2023). Enfrentar este problema requiere colaboración entre gobiernos, comunidades, empresas y sociedad civil.

Entre las soluciones propuestas destaca el secuestro de CO₂ mediante métodos químicos, mecánicos y biológicos. En este último grupo sobresale el fitoplancton, que incluye a las microalgas: microorganismos fotosintéticos capaces de capturar CO₂ y generar oxígeno.

Las microalgas presentan gran adaptabilidad y alta tasa reproductiva, por lo que su cultivo podría contribuir a reducir el impacto de los GEI (Jaiswal *et al.*, 2023). Parte de esta biomasa, tras procesos

geológicos prolongados, ha dado origen a los energéticos fósiles, cuyo uso excesivo ha contribuido significativamente al CG. Otras aplicaciones son en biorremediación, agricultura, industria farmacéutica, cosmética y alimentaria. Algunas especies se han propuesto como alimento del futuro para humanos (por ejemplo, *Espirulina* = *Arthrospira* sp.), otras se utilizan en acuicultura como alimento para moluscos, crustáceos y peces.

Aunque el fitoplancton abarca diversos organismos, este artículo se enfoca en las microalgas por su potencial de cultivo y sus aplicaciones biotecnológicas (Fig. 1), que pueden contribuir a la mitigación del CG, así como los puntos críticos en los que aún se requiere desarrollo tecnológico.

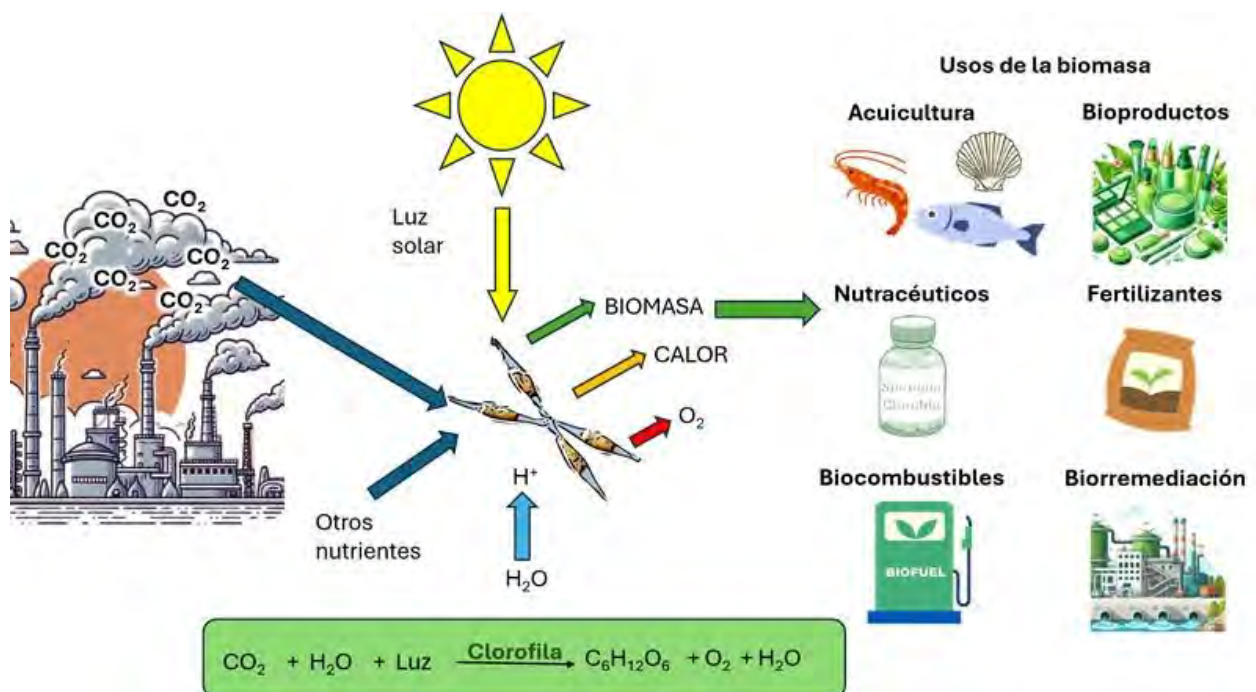


Figura 1. Diagrama de la fotosíntesis y bioproductos derivados de las microalgas.

Calentamiento global

El CG es resultado de múltiples factores que han alterado el equilibrio natural del sistema terrestre. Entre ellos destacan las emisiones masivas de GEI, producto del crecimiento acelerado de la industria y la explotación de combustibles fósiles; la expansión agrícola y la urbanización también han contribuido significativamente al deterioro ambiental (IPCC, 2023).

Este fenómeno ha provocado cambios en la distribución de las precipitaciones, el deshielo acelerado de los polos y el aumento del nivel del mar, lo que compromete la estabilidad de regiones costeras y ecosistemas sensibles (IPCC, 2023).



La Revolución Industrial marcó el inicio de un aumento sostenido en la concentración de CO₂ y propició la intensificación del efecto invernadero (Fig. 2), lo que ha generado alteraciones de los patrones climáticos y un incremento progresivo de la temperatura media del planeta (Ritchie *et al.*, 2020).

Según el Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (UNDP, por sus siglas en inglés), los países considerados desarrollados han sido históricamente los mayores consumidores de combustibles fósiles (carbón, petróleo y gas natural), tanto para uso industrial como urbano. Solo los países de la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (OCDE), han generado una proporción significativa de las emisiones globales de CO₂ (Ritchie *et al.*, 2020).

Por otro lado, los países en vías de desarrollo han incrementado sus emisiones en las últimas décadas, impulsados por inversiones extranjeras y mejoras tecnológicas propias. China, por ejemplo, ha recibido grandes inversiones de países desarrollados y ha tenido crecimiento tecnológico propio, lo que ha generado mayor demanda energética y dependencia de combustibles fósiles, convirtiéndose en el mayor emisor de CO₂ a nivel mundial desde 2006 (Essandoh *et al.*, 2020; Jiao *et al.*, 2022; IPCC, 2023).

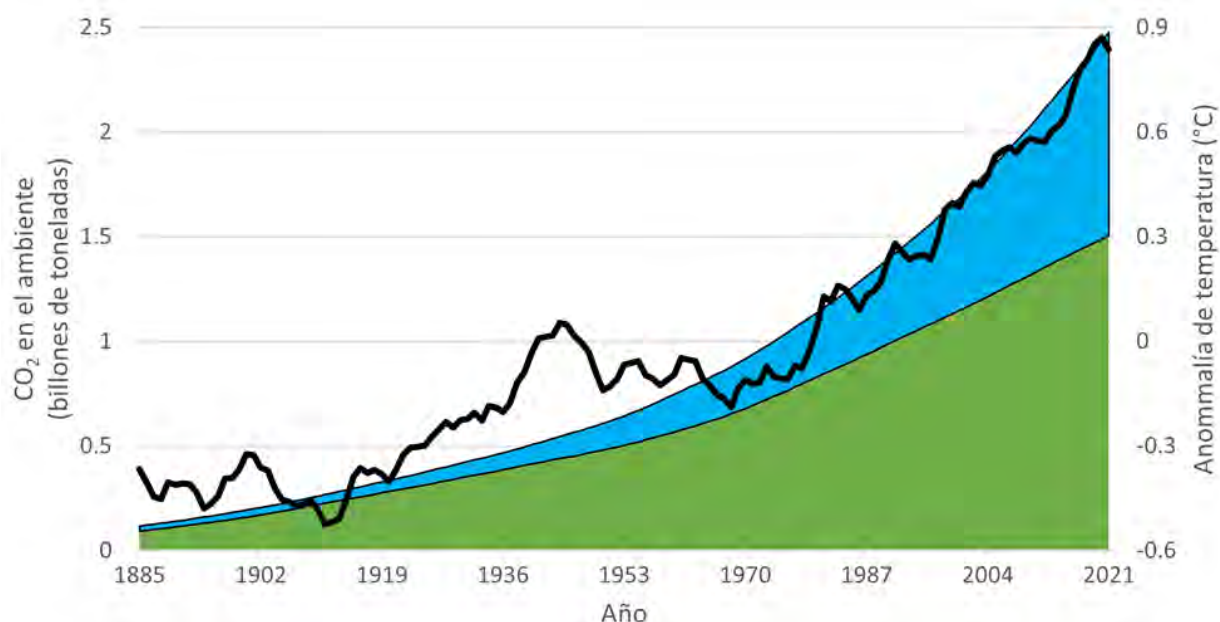


Figura 2. Acumulación de emisiones de CO₂ en el ambiente y anomalías de temperatura durante los años 1885 a 2021. ■ Emisiones de CO₂ de países desarrollados; ■ emisiones de CO₂ de países en vías de desarrollo (Ritchie *et al.*, 2020); — Anomalías de temperatura, promedio móvil de cinco años (Morice *et al.*, 2021).

Impactos del CG a los ecosistemas

Los ecosistemas han experimentado profundas transformaciones como consecuencia del CG, la reducción de hábitats naturales, la fragmentación ecológica y la alteración de los ciclos biogeoquímicos, han generado un declive significativo en la biodiversidad. La variabilidad climática ha modificado la fenología de muchas especies, afectando la migración, reproducción y patrones de alimentación, lo que ha generado desequilibrios en los ecosistemas y disminuido la resiliencia natural de muchas poblaciones (Pecl *et al.*, 2017).

Una forma visual de comprender estos cambios es el trabajo del fotógrafo Christian Åslund, quien en su serie "*Glacial Juxtaposition*" documenta la transformación de los glaciares en Kongsfjord, Svalbard, comparando imágenes de 1928 y 2024. Esta evidencia gráfica ilustra la magnitud del retroceso glaciar y refuerza la urgencia de abordar el CG desde múltiples frentes, incluyendo soluciones biotecnológicas como el cultivo de microalgas.

En los océanos, la acidificación derivada de la absorción de CO₂ ha impactado gravemente a organismos calcificantes como corales, moluscos y ciertos tipos de plancton, comprometiendo la estructura y estabilidad de los arrecifes coralinos, hábitats clave para numerosas especies marinas. El pH oceánico ha disminuido aproximadamente 0.1 unidades desde la era preindustrial, lo que representa un incremento del 30 % en la acidez del agua de mar (Bach y Taucher, 2019). Esta disminución afecta no solo a la biodiversidad marina, sino también a la capacidad del océano para absorber CO₂ atmosférico, reduciendo su papel como sumidero de carbono y exacerbando el CG (Bach *et al.*, 2019).

El fitoplancton, base de la cadena trófica marina, también ha sido afectado por el CG. En las microalgas, cambios en la temperatura y acidez influyen en la productividad y distribución, lo que puede alterar la disponibilidad de alimento para organismos marinos de niveles tróficos superiores.

En ecosistemas terrestres, los cambios en los patrones de precipitación han intensificado la desertificación en diversas regiones, reduciendo la productividad agrícola y limitando la disponibilidad de agua para flora y fauna. Las especies con distribución restringida enfrentan mayor riesgo de extinción, ya que su capacidad de adaptación a nuevas condiciones climáticas es limitada. La deforestación, en combinación con el CG, ha exacerbado estos efectos, reduciendo la capacidad de los bosques como sumideros de carbono y debilitando la resiliencia climática del planeta (IPCC, 2023).



Estos cambios ecológicos son evidentes y, dada la complejidad de los ecosistemas, sus consecuencias pueden intensificarse con el tiempo si no se implementan medidas de mitigación efectivas.

Impactos del CG a la salud

Los problemas ambientales asociados al CG han impactado la salud humana y el bienestar social. La degradación de los ecosistemas reduce su capacidad para ofrecer servicios esenciales como la calidad del aire, la purificación del agua, la polinización y la regulación climática, todos fundamentales para sostener la vida y la productividad.

La disminución de áreas verdes y bosques, que actúan como filtros naturales, ha propiciado un aumento en enfermedades respiratorias y cardiovasculares. Asimismo, la reducción de la capacidad de los ecosistemas para purificar el agua incrementa el riesgo de enfermedades gastrointestinales e infecciones por contaminantes en fuentes de agua potable. El deterioro del aire, del agua y el incremento de temperatura también favorecen la propagación de enfermedades infecciosas especialmente en comunidades con saneamiento limitado (IPCC, 2023).

La pérdida de biodiversidad afecta el servicio de polinización, esencial para la producción agrícola, y, afectando la disponibilidad de alimentos, en especial en comunidades vulnerables (IPCC, 2023).

Además, la degradación de bosques, océanos y otros entornos naturales compromete su función como sumideros de carbono y contribuye a condiciones climáticas extremas como sequías e inundaciones. Estos eventos agravan los problemas de salud y afectan la infraestructura en zonas urbanas y rurales, reduciendo la resiliencia comunitaria y elevando los costos de adaptación.

La pérdida de estos servicios ecosistémicos esenciales repercute directamente en la salud pública, la seguridad alimentaria y la estabilidad económica.

Impactos del CG en la economía

El CG genera costos económicos significativos a nivel global. Los desastres naturales, exacerbados por el aumento de la temperatura, han incrementado la necesidad de inversión en infraestructura resiliente, lo que representa una carga financiera considerable para gobiernos y empresas (Zhang, 2023).

Los impactos a la salud pública por el aumento de enfermedades, eleva los gastos en salud y afecta la productividad laboral y la estabilidad de los mercados (IPCC, 2023).

El sector agrícola enfrenta pérdidas por la disminución en la productividad de cultivos causada por sequías, inundaciones y cambios en los patrones de precipitación. Esto genera inseguridad alimentaria y variaciones en los precios de los alimentos, afectando economías dependientes de la agricultura (IPCC, 2023).

En el ámbito marino, la reducción de la biodiversidad impacta la industria pesquera y las comunidades costeras. La disminución de capturas, causada por la acidificación del mar y la alteración de las cadenas tróficas, reduce los ingresos y genera competencia por recursos limitados (Zahedi *et al.*, 2021). Además, el deterioro de cuerpos de agua afecta el turismo ecológico, disminuyendo los ingresos de esta actividad.

La infraestructura urbana y rural también enfrenta desafíos económicos por eventos climáticos extremos como huracanes, incendios forestales y el aumento del nivel del mar. La adaptación de ciudades, carreteras y sistemas de agua requiere inversiones crecientes en mecanismos de protección (IPCC, 2023).

A nivel macroeconómico, el CG genera incertidumbre en los mercados al afectar sectores clave como la energía, el transporte y la producción industrial. Las empresas deben asumir mayores costos operativos por medidas de adaptación y regulaciones ambientales, lo que puede traducirse en un incremento en los precios y una reducción del poder adquisitivo (Rathi *et al.*, 2021).

Desigualdad social y vulnerabilidad

El CG agrava las desigualdades sociales, ya que los impactos más severos recaen sobre comunidades con menos recursos y menor capacidad de adaptación. Estas poblaciones suelen habitar en zonas costeras bajas o regiones propensas a sequías e inundaciones, lo que incrementa su exposición a fenómenos climáticos extremos (IPCC, 2023).

En países en desarrollo, la falta de infraestructura adecuada y de acceso a servicios básicos como agua potable y salud pública intensifica la vulnerabilidad ante el CG. El desplazamiento forzado es otro problema creciente. Un ejemplo es la comunidad pesquera de "El Bosque", en Tabasco, México, donde el aumento del nivel del mar y la erosión costera obligaron al gobierno a reubicar a las familias afectadas, marcando la primera reubicación oficial de desplazados climáticos en el país (Guillén, 2024).



A nivel mundial, los desastres climáticos fueron responsables de más de la mitad de los nuevos desplazamientos registrados en 2022. Cerca del 60 % de los casos se concentran en países altamente vulnerables, donde las personas desplazadas enfrentan pérdida de hogares, ruptura de comunidades y acceso limitado a servicios básicos, profundizando la brecha de desigualdad (Siegfried, 2023).

Las comunidades indígenas y rurales también se ven particularmente afectadas, ya que sus prácticas culturales y formas de subsistencia están estrechamente vinculadas a los ecosistemas. La pérdida de biodiversidad y las alteraciones climáticas amenazan su seguridad alimentaria y su derecho a la autodeterminación, exacerbando la marginación social (IPCC, 2023).

Para abordar estas desigualdades, es fundamental promover políticas de mitigación y adaptación que incorporen un enfoque de justicia social. Esto incluye inversiones en infraestructura resiliente, programas de capacitación, acceso a recursos financieros y participación comunitaria en la toma de decisiones (Resnik, 2022).

Importancia de las microalgas como parte de la solución contra el CG

Ante los desafíos ambientales actuales, la búsqueda de soluciones sostenibles se ha vuelto imperativa. Entre las propuestas biológicas, las microalgas destacan como una alternativa prometedora por su capacidad fotosintética, su papel en el ciclo del carbono y su potencial para la depuración de aguas residuales y la generación de biomasa con múltiples aplicaciones.

Las microalgas conforman un grupo diverso de microorganismos fotosintéticos que habitan en ecosistemas acuáticos. Son fundamentales en las cadenas tróficas marinas, ya que convierten el CO₂ en materia orgánica mediante la fotosíntesis, actuando como sumideros biológicos de este gas y contribuyendo a la reducción de GEI en la atmósfera (Ren et al., 2023). Además, asimilan nitrógeno y fósforo, elementos esenciales para su crecimiento, lo que las hace útiles en procesos de biorremediación.

Se estima que las microalgas contribuyen con aproximadamente 50 gigatoneladas de CO₂ fijado por año, una cifra comparable a la productividad primaria de las plantas terrestres (Perin et al., 2022). Su origen se remonta a células fotosintéticas similares a las cianobacterias, que aparecieron hace más de 3 mil millones de años (Schopf y Packer, 1987).

Taxonómicamente, se agrupan en cianobacterias (algas verdeazules), clorofitas (algas verdes), bacilariofíceas (diatomeas), haptófitas y dinoflagelados. Se estima que existen más de 50,000

especies, aunque solo una fracción ha sido estudiada para aplicaciones biotecnológicas, lo que representa un vasto potencial aún por explorar.

Biodiversidad de microalgas y su importancia ecológica

Las microalgas comprenden tanto cianobacterias como células eucariotas, y en su mayoría son organismos autótrofos. Las cianobacterias, únicas entre las algas por ser procariotas, realizan fotosíntesis oxigénica y algunas especies fijan nitrógeno, enriqueciendo suelos y cuerpos de agua. Ejemplos como *Arthrospira platensis* han sido aprovechados como fuente alimenticia por su alto contenido proteico y antioxidante (Hoek *et al.*, 1995; Pulz y Gross, 2004).

Las clorofitas incluyen géneros como *Chlorella* y *Scenedesmus*, adaptadas a ambientes de agua dulce. Se destacan por su capacidad de capturar CO₂ y producir biomasa útil para biocombustibles y compuestos industriales, gracias a su rápido crecimiento y facilidad de cultivo en sistemas cerrados (Hoek *et al.*, 1995; Pulz y Gross, 2004).

Las diatomeas son abundantes en ambientes marinos y contribuyen con hasta el 25 % de la fotosíntesis global. Poseen frústulas de sílice que optimizan la captura de luz, y son esenciales en la cadena trófica marina como alimento para zooplancton y organismos filtradores (Hoek *et al.*, 1995; Pulz y Gross, 2004).

Los dinoflagelados incluyen especies fotosintéticas y heterotróficas. Algunas, como *Alexandrium* y *Gymnodinium*, generan floraciones nocivas; otras, como *Symbiodinium*, forman simbiosis con corales, siendo clave para la salud de los arrecifes (Hoek *et al.*, 1995; Pulz y Gross, 2004).

Gracias a su diversidad funcional y adaptativa, las microalgas desempeñan un papel crucial en la regulación ecológica y en el mantenimiento de la biodiversidad acuática.

Fotosíntesis y su impacto ambiental

La fotosíntesis es el proceso mediante el cual se convierte la energía lumínica en energía química. Es realizada por plantas, cianobacterias y microalgas, y permite fijar el CO₂ atmosférico para producir compuestos orgánicos esenciales. Este mecanismo es clave en la regulación del ciclo del carbono y en la mitigación del CG (Huntingford y Oliver, 2021).

En microalgas, la fotosíntesis ocurre en los cloroplastos y consta de dos fases: luminosa y oscura (Fig. 3). En la fase luminosa, los pigmentos fotosintéticos como la clorofila y los carotenoides captan

la energía solar, generando energía mediante la fotólisis del agua y liberando oxígeno. En la fase oscura, conocida como ciclo de Calvin, el CO_2 se fija en compuestos orgánicos a través de reacciones enzimáticas, siendo la RuBisCO (Ribulosa -1,5-bisfosfato carboxilasa/oxigenasa) la enzima principal (Masojídek *et al.*, 2021).

El papel de las microalgas en la mitigación del CG es especialmente relevante. En cultivos masivos, pueden absorber grandes cantidades de CO_2 y transformarlo en biomasa útil. Esta biomasa puede aprovecharse para producir biocombustibles como biodiesel o bioetanol, reduciendo las emisiones de GEI asociadas a fuentes fósiles.

Además, las microalgas generan proteínas, lípidos y carbohidratos con aplicaciones en las industrias alimentaria, farmacéutica y energética. A diferencia de otras tecnologías de captura de carbono, como las centrales eléctricas con almacenamiento, el cultivo de microalgas no produce residuos tóxicos ni requiere grandes cantidades de energía. Incluso puede realizarse en aguas residuales o salinas, lo que permite reciclar nutrientes y reducir la contaminación hídrica (Salgueiro *et al.*, 2016; Oliveira *et al.*, 2019; Ugya y Meguellati, 2022).

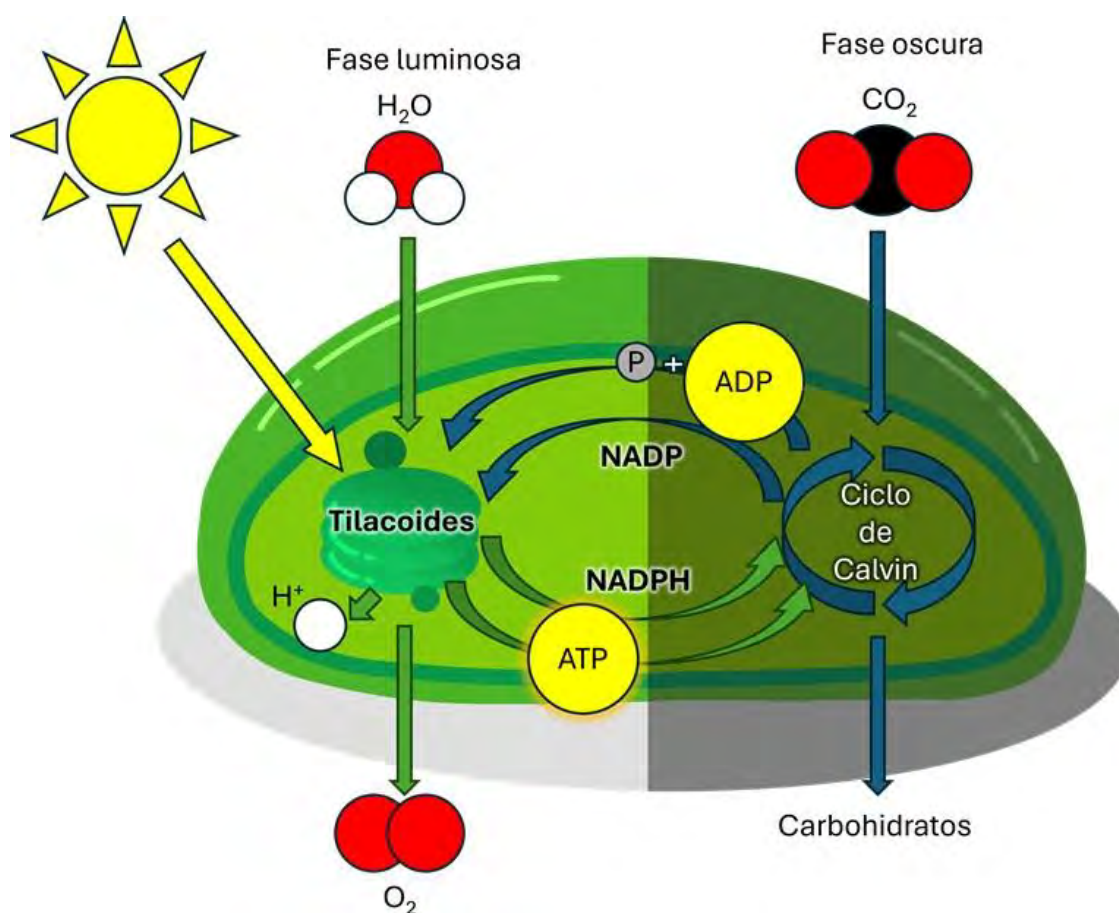


Figura 3. Fases de la fotosíntesis en el cloroplasto.

Composición bioquímica de las microalgas

Las microalgas presentan una composición bioquímica diversa y altamente valiosa, lo que las hace fundamentales en ecosistemas acuáticos y aplicaciones biotecnológicas. Su biomasa contiene macronutrientes esenciales, compuestos bioactivos y elementos con propiedades funcionales específicas.

Las proteínas representan un porcentaje significativo de la biomasa en muchas especies, alcanzando hasta el 70 % en cianobacterias como *Arthrospira*. Estas proteínas contienen todos los aminoácidos esenciales, lo que las convierte en una fuente proteica de alta calidad para la nutrición humana y animal (Ramírez-Rodrigues *et al.*, 2021).

Los lípidos también son componentes clave, especialmente en especies como *Nannochloropsis* e *Isochrysis galbana*, que presentan altos niveles de ácidos grasos poliinsaturados como EPA y DHA. Estos ácidos grasos esenciales, que no pueden ser sintetizados por el cuerpo humano, son fundamentales para la salud cardiovascular, inmunológica y neurológica (Nuño *et al.*, 2013).

Los carbohidratos están presentes en proporciones variables y pueden emplearse como fuente energética en aplicaciones industriales, como la producción de bioetanol. Algunas especies, como *Porphyridium* y *Chlamydomonas*, producen polisacáridos sulfatados con propiedades inmunoestimulantes y antivirales (Hernández *et al.*, 2015).

Las microalgas también son ricas en pigmentos y compuestos antioxidantes con actividad biológica. Ejemplos destacados incluyen la ficocianina en *Arthrospira*, la astaxantina en *Haematococcus pluvialis* y la luteína en *Chlorella*, todos con efectos protectores frente al estrés oxidativo y aplicaciones en la industria nutracéutica y cosmética (Coulombier *et al.*, 2021).

Además, algunas microalgas producen metabolitos secundarios con propiedades antibacterianas, antifúngicas y anticancerígenas, lo que ha despertado interés en la industria farmacéutica como fuente de agentes terapéuticos (Dewi *et al.*, 2018).

Conocer la composición bioquímica de las microalgas permite aprovechar sus beneficios en sectores como la salud, la alimentación y la sostenibilidad ambiental. También contribuye al desarrollo de estrategias de cultivo optimizadas para potenciar la producción de compuestos específicos.



Aplicaciones biotecnológicas de las microalgas

Gracias a su versatilidad metabólica y capacidad para producir biomoléculas de alto valor, las microalgas han demostrado gran potencial en sectores industriales, ambientales y de salud (Chisti, 2007; Abo *et al.*, 2019; Lopes-da Silva *et al.*, 2019).

En nutrición y acuicultura, microalgas como *A. platensis*, *Isochrysis*, *Chaetoceros* y *Thalassiosira* se utilizan en la alimentación de peces, moluscos y crustáceos por su aporte de proteínas, ácidos grasos esenciales y antioxidantes. *Spirulina* y *Chlorella* también se han incorporado ampliamente en la alimentación humana por su perfil nutricional (Guedes y Malcata, 2012).

En biorremediación, especies como *Chlorella* y *Scenedesmus* destacan por su capacidad para absorber metales pesados, degradar contaminantes y reciclar nutrientes, siendo eficaces en la remoción de nitratos, fosfato En biorremediación, especies como *Chlorella* y *Scenedesmus* destacan por su capacidad para absorber metales pesados, degradar contaminantes y reciclar nutrientes, siendo eficaces en la remoción de nitratos, fosfatos y compuestos tóxicos en aguas residuales (Leong y Chang, 2020).

En la industria farmacéutica y cosmética, algunas especies producen compuestos bioactivos con propiedades antioxidantes, antiinflamatorias y antibacterianas. Estos se emplean en cosméticos, protectores solares y suplementos dietéticos, y se investiga su potencial terapéutico contra enfermedades metabólicas y neurodegenerativas (Dewi *et al.*, 2018).

En agricultura, se utilizan como biofertilizantes por su capacidad de aportar nutrientes como nitrógeno, fósforo y potasio, fijar nitrógeno atmosférico, mejorar la retención de agua en el suelo y suministrar fitohormonas, favoreciendo el desarrollo vegetal (Al-Suhaibani *et al.*, 2021).

Cultivo de microalgas

El cultivo de microalgas es crucial para su aprovechamiento a gran escala, ya que permite maximizar la producción de biomasa y productos de interés. Existen diversos métodos de cultivo que varían en complejidad, eficiencia y costos operativos. La elección del sistema depende de factores como la especie, el propósito de producción y las condiciones ambientales disponibles.

Según su interacción con el ambiente, los sistemas de cultivo se dividen en abiertos y cerrados. Los sistemas abiertos se desarrollan en estanques, lagunas expuestas o canales con flujo continuo, aprovechando condiciones naturales. Son más económicos y fáciles de implementar a gran escala,

aunque presentan desafíos como la contaminación por otras especies y la variabilidad climática. En contraste, los sistemas cerrados utilizan fotobiorreactores que permiten controlar parámetros como temperatura, iluminación y nutrientes (Fig. 4). Estos sistemas ofrecen mayor eficiencia y evitan la contaminación externa, aunque requieren una inversión más alta en infraestructura (Andersen et al., 2005).



Figura 4. Ejemplos de sistemas de cultivo cerrados. En panel superior: cultivos en matraces y garrafones Panel inferior: columnas verticales.



De acuerdo con la fuente de carbono utilizada, los cultivos pueden clasificarse en autótrofos, heterótrofos y mixótrofos (Fig. 5). Los cultivos autótrofos emplean CO_2 y luz como fuente de energía, siendo altamente sostenibles, aunque dependientes de la disponibilidad lumínica. Los cultivos heterótrofos utilizan fuentes orgánicas de carbono como glucosa o acetato, lo que permite un crecimiento más rápido y controlado, pero con mayores costos por insumos. Los cultivos mixótrofos combinan ambos mecanismos, aprovechando tanto la luz como compuestos orgánicos, lo que los hace versátiles, pero más complejos de gestionar (Andersen *et al.*, 2005).

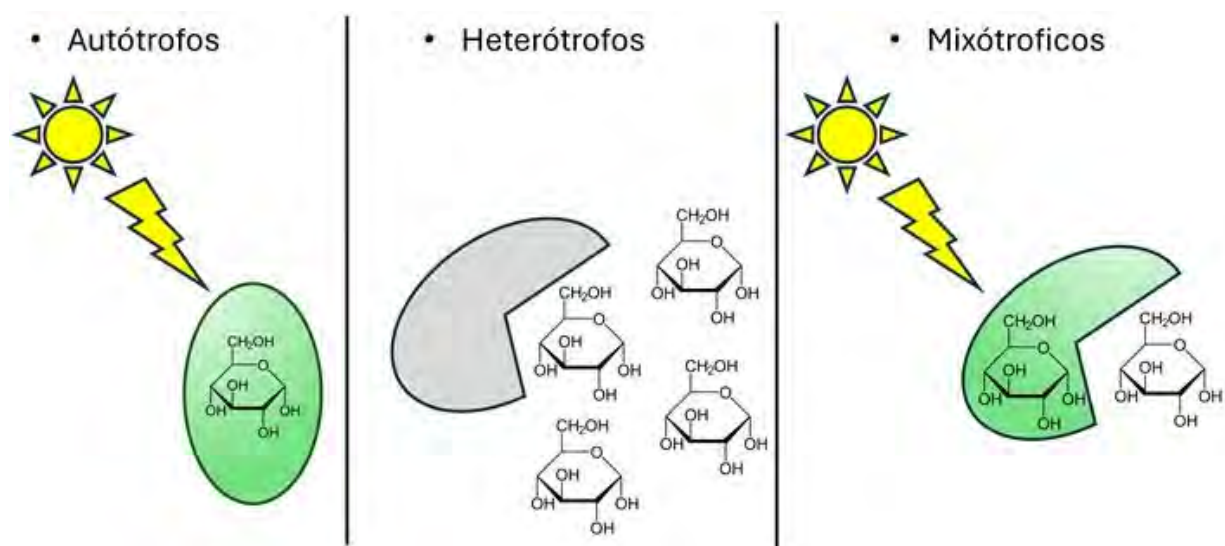


Figura 5. Tipos de cultivo según la fuente de carbono utilizada.

Según la estrategia de producción, los cultivos pueden ser discontinuos, semicontinuos o continuos. En los cultivos discontinuos (por lotes), se inocula el medio y se cosecha toda la biomasa al final del ciclo; son fáciles de implementar, pero menos eficientes para producción constante. Los cultivos semicontinuos permiten retirar parte del cultivo y reponer el medio periódicamente, optimizando recursos, aunque requieren monitoreo constante. Finalmente, los cultivos continuos mantienen un flujo constante de entrada de nutrientes y salida de biomasa, lo que permite una producción estable y prolongada, aunque con mayor complejidad operativa (Andersen *et al.*, 2005).

Los distintos sistemas de cultivo se adaptan a las necesidades de producción y a la capacidad económica, siendo clave para escalar el uso de microalgas como herramienta sostenible frente al cambio climático.

Alternativas para el cultivo

Algunas especies de microalgas pueden cultivarse utilizando aguas residuales, agua marina en superficies no aptas para la agricultura, lo que amplía significativamente sus posibilidades de producción. El uso de aguas residuales ofrece múltiples beneficios frente a cultivos tradicionales: aprovecha su alto contenido de nutrientes (principalmente nitrógeno y fósforo), reduce el consumo de agua dulce, valoriza residuos y permite la biorremediación, promoviendo un crecimiento acelerado de biomasa (Gupta *et al.*, 2019; Nagarajan *et al.*, 2020).

Además, el cultivo en agua marina permite aprovechar recursos salinos disponibles sin competir con fuentes agrícolas, y su implementación en terrenos marginales evita conflictos con la producción de alimentos. Estas alternativas refuerzan el carácter sostenible de las microalgas y su potencial para integrarse en estrategias de economía circular.

Limitantes en el cultivo o uso de biomasa de microalgas

A pesar de sus múltiples ventajas, el aprovechamiento de la biomasa de microalgas para la obtención de bioproductos enfrenta varios cuellos de botella.

Uno de los principales desafíos es la necesidad de agitación durante el cultivo, que se realiza mediante suministro de aire o agitadores mecánicos. Esto implica una inversión energética considerable, especialmente cuando el crecimiento celular genera autosombreado es decir que las mismas células al crecer obstruyen el paso de la luz hacia capas más profundas (Demory *et al.*, 2018) dificultando así la fotosíntesis.

Otro punto crítico es el consumo energético asociado a la cosecha y el secado de la biomasa, que representan una parte significativa de los costos operativos. Aunque estos pueden reducirse con la escala del proceso, siguen siendo etapas complejas. Las técnicas de cosecha incluyen floculación, centrifugación y filtración, cada una con ventajas y limitaciones: los métodos más económicos pueden comprometer la pureza del producto, mientras que los más eficientes suelen ser costosos y difíciles de implementar a gran escala.

En cuanto al secado, aunque existen opciones como el secado solar y tecnologías avanzadas, las ineficiencias en esta fase continúan siendo un obstáculo técnico y económico. Superar estas limitantes es clave para consolidar el uso industrial de las microalgas en aplicaciones sostenibles.



Conclusiones

El cambio climático representa un desafío global que exige la participación de todos los sectores. Entre las estrategias de mitigación, el uso de microalgas destaca como una alternativa biotecnológica prometedora por su capacidad de capturar CO₂ y transformarlo en biomasa útil. Este enfoque ofrece soluciones sostenibles en energía, salud, alimentación y medio ambiente.

No obstante, el cultivo y aprovechamiento de microalgas enfrenta limitantes técnicas y económicas, especialmente en las etapas de agitación, cosecha y secado. Superar estos obstáculos requiere continuar con investigaciones que optimicen los procesos y reduzcan los costos operativos.

Resulta paradójico que se recurra a estos microorganismos para enfrentar una crisis derivada del uso excesivo de combustibles fósiles, cuando fueron ellas quienes originalmente "secuestraron" ese carbono durante millones de años y se transformaron en combustibles fósiles (Falkowski, 2002). Esta ironía subraya su relevancia ecológica y refuerza el reconocimiento de que las microalgas no solo forman parte del origen del problema, sino también de su solución.

Bibliografía

- Abo, B.O., E.A. Odey, M. Bakayoko y L. Kalakodio. 2019. *Microalgae to biofuels production: a review on cultivation, application and renewable energy*. Reviews on Environmental Health 34(1): 91–99. doi: 10.1515/reveh-2018-0052
- Al-Suhaibani, N., M.F. Seleiman, S. El-Hendawy, K. Abdella, M. Alotaibi y A. Alderfasi. 2021. *Integrative effects of treated wastewater and synthetic fertilizers on productivity, energy characteristics, and elements uptake of potential energy crops in an arid agro-ecosystem*. Agronomy 11: 2250. doi: 10.3390/agronomy11112250
- Andersen, R.A., J.A. Berges, P.J. Harrison y M.M. Watanabe. 2005. *Algal culturing techniques*. Elsevier, Burlington. ISBN: 0120884267
- Bach, L.T., N. Hernández-Hernández, J. Taucher, C. Spisla, C. Sforza, U. Riebesell y J. Arístegui. 2019. *Effects of elevated CO₂ on a natural diatom community in the subtropical NE Atlantic*. Frontiers in Marine Science 6: 75. doi: 10.3389/fmars.2019.00075

- Bach, L.T. y J. Taucher. 2019. *CO₂ effects on diatoms: A synthesis of more than a decade of ocean acidification experiments with natural communities*. Ocean Science 15(4): 1159–1175. doi: 10.5194/os-15-1159-2019
- Chisti, Y. 2007. *Biodiesel from microalgae*. Biotechnology Advances 25(3): 294–306. doi: 10.1016/j.biotechadv.2007.02.001
- Coulombier, N., T. Jauffrais y N. Lebouvier. 2021. *Antioxidant compounds from microalgae: A review*. Marine Drugs 19(10): 549. doi: 10.3390/MD19100549/S1
- Demory, D., C. Combe, P. Hartmann, A. Talec, E. Pruvost, R. Hamouda, F. Souillé, P.-O. Lamare, M.-O. Bristeau, J. Sainte-Marie, S. Rabouille, F. Mairet, A. Sciandra y O. Bernard. 2018. *How do microalgae perceive light in a high-rate pond? Towards more realistic Lagrangian experiments*. Royal Society Open Science 5(5): 180523. doi: 10.1098/rsos.180523
- Dewi, I.C., C. Falaise, C. Hellio, N. Bourgougnon y J.-L. Mouget. 2018. *Anticancer, antiviral, antibacterial, and antifungal properties in microalgae*. pp. 235–261. En: Levine, I.A. y J. Fleurence (eds). Microalgae in Health and Disease Prevention. Elsevier. Londres, Inglaterra
- Essandoh, O.K., M. Islam y M. Kakinaka. 2020. *Linking international trade and foreign direct investment to CO₂ emissions: Any differences between developed and developing countries?* Science of The Total Environment 712: 136437. doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.136437
- Falkowski, P.G. 2002. *The Ocean's Invisible Forest*. Scientific American 287(2): 54–61. doi: 10.1038/scientificamerican0802-54
- Guedes, A.C. y F. Malcata. 2012. *Nutritional value and uses of microalgae in aquaculture*. pp. 59–78. En: Muchlisin, Z.A. (ed). Aquaculture. InTech. Londres, Inglaterra
- Guillén, B. 2024. *La victoria de El Bosque: los primeros desplazados climáticos de México son reubicados*. El País
- Gupta, S., S.B. Pawar y R.A. Pandey. 2019. *Current practices and challenges in using microalgae for treatment of nutrient rich wastewater from agro-based industries*. Science of The Total Environment 687: 1107–1126. doi: 10.1016/J.SCITOTENV.2019.06.115
- Hernández, D., B. Riaño, M. Coca y M.C. García-González. 2015. *Saccharification of carbohydrates in microalgal biomass by physical, chemical and enzymatic pre-treatments as a previous step for bioethanol production*. Chemical Engineering Journal 262: 939–945. doi: 10.1016/J.CEJ.2014.10.049
- Hoek, C. van den, D.G. Mann y H.Martin. Jahns. 1995. *Algae: an introduction to phycology*. Cambridge University Press, Cambridge . ISBN: 9780521316873
- Huntingford, C. y R.J. Oliver. 2021. *Converging towards a common representation of large-scale photosynthesis*. Global Change Biology 27(4): 716–718. doi: 10.1111/GCB.15398



- IPCC. 2023. *Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. IPCC, Geneva. doi: 10.59327/IPCC/AR6-9789291691647
- Jaiswal, K.K., S. Dutta, I. Banerjee, C.B. Pohrmen y V. Kumar. 2023. *Photosynthetic microalgae-based carbon sequestration and generation of biomass in biorefinery approach for renewable biofuels for a cleaner environment*. *Biomass Conversion and Biorefinery* 13(9): 7403–7421. doi: 10.1007/s13399-021-01504-y
- Jiao, Z., Z. Xing, G. Zhang, X. Ma y H. Wang. 2022. *Comparing decoupling and driving forces of CO₂ emissions in China and India*. *Frontiers in Environmental Science* 10: 847062. doi: 10.3389/FENVS.2022.847062/BIBTEX
- Leong, Y.K. y J.S. Chang. 2020. *Bioremediation of heavy metals using microalgae: Recent advances and mechanisms*. *Bioresource Technology* 303: 122886. doi: 10.1016/J.BIORTECH.2020.122886
- Lopes-da Silva, T., P. Moniz, C. Silva y A. Reis. 2019. *The dark side of microalgae biotechnology: A heterotrophic biorefinery platform directed to ω -3 rich lipid production*. *Microorganisms* 7(12): 670. doi: 10.3390/microorganisms7120670
- Masojídek, J., K. Ranglová, G.E. Lakatos, A.M. Silva Benavides y G. Torzillo. 2021. *Variables governing photosynthesis and growth in microalgae mass cultures*. *Processes* 9(5): 820. doi: 10.3390/pr9050820
- Morice, C.P., J.J. Kennedy, N.A. Rayner, J.P. Winn, E. Hogan, R.E. Killick, R.J.H. Dunn, T.J. Osborn, P.D. Jones y I.R. Simpson. 2021. *An updated assessment of near-surface temperature change from 1850: The HadCRUT5 data set*. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 126(3). doi: 10.1029/2019JD032361
- Nagarajan, D., D.J. Lee, C.Y. Chen y J.S. Chang. 2020. *Resource recovery from wastewaters using microalgae-based approaches: A circular bioeconomy perspective*. *Bioresource Technology* 302: 122817. doi: 10.1016/J.BIORTECH.2020.122817
- Nuño, K., A. Villarruel-López, A.M. Puebla-Pérez, E. Romero-Velarde, A.G. Puebla-Mora y F. Ascencio. 2013. *Effects of the marine microalgae *Isochrysis galbana* and *Nannochloropsis oculata* in diabetic rats*. *Journal of Functional Foods* 5(1): 106–115. doi: 10.1016/J.JFF.2012.08.011
- Oliveira, A.C., A. Barata, A.P. Batista y L. Gouveia. 2019. *Scenedesmus obliquus in poultry wastewater bioremediation*. *Environmental technology* 40(28): 3735–3744. doi: 10.1080/09593330.2018.1488003

- Pecl, G.T., M.B. Araújo, J.D. Bell, J. Blanchard, T.C. Bonebrake, I.C. Chen, T.D. Clark, R.K. Colwell, F. Danielsen, B. Evengård, L. Falconi, S. Ferrier, S. Frusher, R.A. Garcia, R.B. Griffis, A.J. Hobday, C. Janion-Scheepers, M.A. Jarzyna, S. Jennings, J. Lenoir, H.I. Linnetved, V.Y. Martin, P.C. McCormack, J. McDonald, N.J. Mitchell, T. Mustonen, J.M. Pandolfi, N. Pettorelli, E. Popova, S.A. Robinson, B.R. Scheffers, J.D. Shaw, C.J.B. Sorte, J.M. Strugnell, J.M. Sunday, M.N. Tuanmu, A. Vergés, C. Villanueva, T. Wernberg, E. Wapstra y S.E. Williams. 2017. *Biodiversity redistribution under climate change: Impacts on ecosystems and human well-being*. Science 355(6332). doi: 10.1126/SCIENCE.AAI9214/SUPPL_FILE/PECL.SM.PDF
- Perin, G., A. Bellan, D. Lyska, K.K. Niyogi y T. Morosinotto. 2022. *Modulation of xanthophyll cycle impacts biomass productivity in the marine microalga Nannochloropsis*. bioRxiv : 2022.08.16.504082. doi: 10.1101/2022.08.16.504082
- Pulz, O. y W. Gross. 2004. *Valuable products from biotechnology of microalgae*. Applied Microbiology and Biotechnology 65(6): 635–648. doi: 10.1007/s00253-004-1647-x
- Ramírez-Rodrigues, M.M., C. Estrada-Beristain, J. Metri-Ojeda, A. Pérez-Alva y D.K. Baigts-Allende. 2021. *Spirulina platensis protein as sustainable ingredient for nutritional food products development*. Sustainability 13(12): 6849. doi: 10.3390/SU13126849
- Rathi, B.S., P.S. Kumar y P.-L. Show. 2021. *A review on effective removal of emerging contaminants from aquatic systems: Current trends and scope for further research*. Journal of Hazardous Materials 409: 124413. doi: 10.1016/j.jhazmat.2020.124413
- Ren, H., D. Zhou, J. Lu, P.L. Show y F.F. Sun. 2023. *Mapping the field of microalgae CO₂ sequestration: a bibliometric analysis*. Environmental Science and Pollution Research 30(32): 78030–78040. doi: 10.1007/S11356-023-27850-0/TABLES/5
- Resnik, D.B. 2022. *Environmental justice and climate change policies*. Bioethics 36(7): 735–741. doi: 10.1111/BIOE.13042
- Ritchie, H., M. Roser y P. Rosado. 2020. *CO₂ and Greenhouse Gas Emissions*. En: Published online at OurWorldInData.org. Disponible en: <https://ourworldindata.org/co2-and-greenhouse-gas-emissions>. [consulta: 5 abril 2023]
- Salgueiro, J.L., L. Pérez, R. Maceiras, A. Sánchez y A. Cancela. 2016. *Bioremediation of wastewater using Chlorella Vulgaris microalgae: Phosphorus and organic matter*. International Journal of Environmental Research 10(3): 465–470.
- Schopf, J.W. y B.M. Packer. 1987. *Early archean (3.3-Billion to 3.5-Billion-Year-Old) microfossils from Warrawoona Group, Australia*. Science 237(4810): 70–73. doi: 10.1126/SCIENCE.11539686



- Siegfried, K. 2023. *Cambio climático y desplazamiento: mitos y realidades* | ACNUR. En: ACNUR. Disponible en: https://www.acnur.org/noticias/historias/cambio-climatico-y-desplazamiento-mitos-y-realidades?utm_source=chatgpt.com. [consulta: 9 febrero 2025]
- Ugya, A.Y. y K. Meguellati. 2022. *Microalgae biomass modelling and optimisation for sustainable biotechnology - A concise review*. Journal of Ecological Engineering 23(9). doi: 10.12911/22998993/150627
- Zahedi, A., P. Monis, D. Deere y U. Ryan. 2021. *Wastewater-based epidemiology—surveillance and early detection of waterborne pathogens with a focus on SARS-CoV-2, Cryptosporidium and Giardia*. Parasitology Research 120(12): 4167–4188. doi: 10.1007/S00436-020-07023-5/TABLES/3
- Zhang, Y. 2023. *The economic impact of the global warming*. Highlights in Business, Economics and Management 15: 8–11. doi: 10.54097/HBEM.V15I.9220

Semblanzas de los autores

- **Carlos Alejandro Pérez Rojas**. Doctor en Ciencias graduado en el Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste (CIBNOR) y reconocido con el nivel de “candidato” en el SNI a partir de 2025. Con experiencia en biología y cultivo de microalgas, cambio climático y bioinformática. Investigador del programa de Estancias Posdoctorales por México, el proyecto en el que trabaja actualmente busca desarrollar un sistema de tratamiento de aguas residuales caseras utilizando microalgas, organismos fotosintéticos y consorcios microbianos. crojas@pg.cibnor.mx.
- **María Concepción Lora Vilchis**. Doctora en Ciencias por el Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste (CIBNOR). Con experiencia en aspectos del aislamiento, biología y cultivo de microalgas, nutrición de bivalvos y ecofisiología de invertebrados. Investigadora titular del Programa de Acuicultura del CIBNOR, su línea de investigación es la ecofisiología de microalgas (específicamente producción de lípidos) y nutrición de zooplancton, dentro de la línea estratégica de Biotecnología de Plancton y Una Salud. Responsable académica del cepario de microalgas del CIBNOR desde 2005. cony04@cibnor.mx.

Cita

Pérez Rojas, C.A., y M.C. Lora Vilchis. *Microalgas: Aliadas potenciales contra el calentamiento global*. Recursos Naturales y Sociedad, 2025. Vol. 11 (3): 254-274. <https://doi.org/10.18846/renaysoc.2025.11.11.03.0015>.

Sometido: 5 de marzo de 2025

Aceptado: 6 de octubre de 2025

Editor asociado: Dr. Arturo Sánchez Paz

Editor ejecutivo: Dr. Arturo Sánchez Paz

Diseño gráfico editorial: Ing. Francisca Elizabeth Villegas Carrasco

Animal welfare in wildlife: a complex challenge

Bienestar animal en la fauna silvestre: un desafío complejo

Gustavo Arnaud-Franco^{1*}, Amaury Cordero-Tapia¹

Resumen

El bienestar de los animales silvestres en su entorno natural ha sido escasamente abordado debido a la complejidad que esto implica, dado que están sujetos a las presiones de la selección natural. Para la evaluación de su nivel de bienestar se requiere disponer de información de base del estado general ideal del individuo (físico y fisiológico), lo cual es poco factible obtener e incluso si se consigue, puede ser subjetivo, ya que el estrés es un factor inherente a la vida silvestre, el cual varía entre individuos, poblaciones y especies. El objetivo de este documento es el de mostrar la complejidad de definir con objetividad el nivel de bienestar en la fauna silvestre, porque hay factores como la alteración del hábitat, la cacería furtiva, la contaminación ambiental, el cambio climático y las interacciones con los humanos que los amenazan constantemente. Considerar el bienestar de los animales silvestres es necesario no solo debido a razones éticas, sino también de conservación y de salud pública.

Palabras clave: animales salvajes, bienestar, conservación, estrés, salud pública.

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

* Autor de correspondencia: garnaud04@cibnor.mx



Abstract

The welfare of wild animals in their natural environment, where they are subject to natural selection pressures, received scant attention due to the complexities involved. Assessing their level of well-being requires baseline information on the ideal general state (physical and physiological) of the individual, which is difficult to obtain, even when such data is available, it can be subjective, as stress is an inherent factor in wildlife, varying between individuals, populations, and species. The objective of this document is to show the complexity of objectively defining the level of well-being in wildlife, because there are factors such as habitat alteration, poaching, environmental pollution, climate change, and interactions with humans. Ensuring the welfare of wild animals involves multiple factors and challenges, but it needs to be considered not only for ethical reasons but also for conservation and public health.

Keyword: well-being, wild animals, stress, conservation, public health.

Introducción

El concepto de bienestar animal surgió al hacer conciencia de que los animales vertebrados experimentan dolor y otras formas de sufrimiento, por lo que fue considerado principalmente en relación a los animales con los cuales el humano tenía contacto, como aquellos que se utilizaban por su fuerza en el trabajo, o los que se encontraban en condiciones de cautiverio en los zoológicos o que servían de acompañamiento (PAOT, ----; Khillare y Kaushal, 2021), sin considerar a aquellos que vivían libres en la naturaleza.

El bienestar animal ha sido escasamente considerado en determinados aspectos de la interacción entre los seres humanos y la fauna silvestre, como en la cacería deportiva o en situaciones en las que los animales representan una amenaza para los intereses humanos (por ejemplo, al afectar los cultivos agrícolas y atacar al ganado). En estos casos, los ejemplares suelen ser sacrificados o capturados para su reubicación mediante métodos que les provocan pánico, estrés, sufrimiento o incluso la muerte (Fig. 1).



Figura 1. Gato montés (*Lynx rufus*) capturado con un cebo de doble muelle, que le lastimó la pata con el metal de la quijada. Para evitar dañar a los animales con el uso de estas trampas, se requiere que el metal de las quijadas sea recubierto con algún material como neopreno (fotografía tomada por: Gustavo Arnaud).

En el contexto académico, se suele pasar por alto el bienestar animal al llevar a cabo investigaciones sobre fauna en vida libre. Por lo regular se asume que la manipulación de los ejemplares y las técnicas de captura son poco estresantes, sin embargo, en la toma de muestras, marcaje o implantación de dispositivos ya sean internos o externos (como radiocollares, radiotransmisores o microchips), no se tiene conocimiento de la magnitud del estrés provocado en los animales y las posibles repercusiones subsecuentes en su sobrevivencia y comportamiento tras ser liberado de nuevo a su entorno natural. Esto es preocupante en México, debido a que un alto porcentaje de vertebrados silvestres presentan alguna categoría de riesgo en su conservación (DOF, 2019), siendo abordados en una amplia diversidad de estudios. En muchas de estas especies sus poblaciones son poco numerosas, por lo que el estrés generado en su manejo podría repercutir en su sobrevivencia. Por ello es preciso abordar en estas investigaciones aspectos de bienestar animal.

El presente documento analiza la complejidad que implica considerar el bienestar animal de la fauna silvestre, tanto en su interacción directa como en su relación indirecta con los seres humanos, definiendo a un animal silvestre como aquel que está sujeto a la selección natural y que no depende del humano para su sobrevivencia, incluyendo incluso a aquellos animales domésticos que se tornan salvajes (asilvestrados) (DOF, 1988).



¿Qué es bienestar animal?

El bienestar animal no se refiere a proteccionismo, ni tampoco es solo un aspecto ético que conciba un trato compasivo, sino que es el reconocimiento de las necesidades biológicas de la fauna para su adecuado crecimiento y desarrollo. Su definición, como el estado de salud física y mental en el cual un animal está en armonía con su ambiente (Hughes, 1976), ha evolucionado a través del tiempo. Las diversas definiciones que existen se agrupan en dos tendencias:

1) la que considera que el estado de salud física y mental del animal está en armonía con su ambiente (Hughes, 1976; McMillan, 2002) y 2) la que define el estado de un individuo respecto a sus intentos de enfrentar el ambiente en que se encuentra (Broom, 1986). En estas dos tendencias, el concepto de bienestar animal implica un estado dinámico que lo hace complejo, porque dicho bienestar es de carácter individual, con variación en un mismo individuo a través del tiempo, de acuerdo a la temporada del año, a su condición reproductiva y a su edad. También puede variar entre individuos de una misma especie, o debido a su capacidad para adaptarse a los cambios que ocurran en su entorno y que impliquen modificaciones conductuales o fisiológicas. En síntesis, dentro de este contexto complejo, los animales se relacionan con su entorno mediante una amplia gama de estrategias tanto conductuales como fisiológicas (Cabanac, 1979; Broom, 2008).

Identificación del estado de bienestar animal

Para identificar el estado de bienestar en el que se encuentra un animal, ya sea bueno, escaso o carente de él, es necesario llevar a cabo una evaluación de diferentes factores, para determinar si se encuentran presentes o ausentes. En este sentido, si un animal sufre de estrés y esto provoca una reducción en su desempeño físico, o parece probable que ocurra, se considera que su bienestar se encuentra comprometido. Asimismo, la evaluación objetiva de este bienestar requiere información de referencia sobre el estado general (físico y fisiológico) ideal del individuo, con la cual sea posible realizar comparaciones en distintas circunstancias (Broom, 2011). Sin embargo, esto es poco factible en ejemplares capturados en la vida silvestre y que serán objeto de una breve manipulación para su inmediata liberación. En estos casos, la toma de datos de algunos indicadores puede dar una idea relativa del estado de bienestar en el que vive el animal. Así, la presencia o ausencia de enfermedades, inmunosupresión, lesiones, crecimiento y desarrollo anormal, condición corporal, comportamientos estereotipados (como caminar de un lado a otro sin parar, balancearse, dormir excesivamente, automutilarse, acicalado excesivo), comportamientos agresivos, imposibilidad para aparearse y reproducirse, rechazo o aceptación al manejo humano, pueden ser indicativos de un determinado nivel de bienestar (Broom, 2000). Dichos indicadores pueden ser agrupados en

positivos o negativos de acuerdo a criterios que se relacionan con la fisiología del animal, con el estado psicológico o mental y con aspectos relativos a la biología de la especie a la que pertenece el individuo (Tabla 1). Sin embargo, es complicado establecer un estado de bienestar cuando están presentes indicadores positivos y negativos en un mismo criterio (fisiológico, afectivo y de la biología del animal).

Para la evaluación de bienestar es preciso considerar si ésta será de corto o largo plazo, ya que registros como la frecuencia cardíaca y la respiratoria, así como la concentración de cortisol en sangre, pueden ser apropiados para una evaluación a corto plazo durante el manejo o transporte de los animales, en cambio algunas estimaciones del comportamiento, la función del sistema inmunológico y el estado de una enfermedad, son más apropiadas para evaluaciones a largo plazo (Broom, 2011).

Es preciso enfatizar que la evaluación del bienestar animal se encuentra, en cierta medida, condicionada por la perspectiva del evaluador, lo que introduce un sesgo o grado de subjetividad en su interpretación. Sin embargo, la incorporación de datos fisiológicos obtenidos directamente de los individuos permite disminuir dicha subjetividad y realizar valoraciones más objetivas y comparables. Por lo tanto, será útil disponer de los niveles de la frecuencia cardíaca, frecuencia respiratoria o la presencia de la hormona adrenocorticotrófica (ACTH) después de un estímulo. La ACTH controla la producción de otra hormona, el cortisol, que ayuda a responder al estrés, a combatir las infecciones, a regular niveles de azúcar en la sangre, a mantener la presión arterial y a regular el metabolismo. Tener demasiado o muy poco cortisol puede causar problemas de salud graves. Su presencia es considerada como un indicador de un bienestar pobre (Broom, 2011). Sin embargo, en la vida silvestre el estrés es un factor que se presenta de manera constante a través de dos niveles, el individual (que le permite al animal responder a los desafíos del ambiente, tanto bióticos como abióticos) y el de especie (que desencadena adaptaciones evolutivas ante presiones ecológicas) (Laundré *et al.*, 2010; Silva y Eliosa, 2016). En este sentido, la presencia de cortisol puede originar subjetividad en el criterio de un evaluador del bienestar de un animal.

Por otra parte, hay animales silvestres que, al ser capturados, pueden presentar conductas anormales y ser evaluados con un pobre bienestar. Aquí habrá que considerar el estrés provocado en el animal durante su contención y manipulación. De igual forma, también aquellos que son extraídos del medio silvestre y mantenidos en cautiverio o semicautiverio, pueden presentar conductas anormales que no se presentan en condiciones de libertad o bien, de ocurrir, se expresan



en un contexto y una frecuencia muy diferentes a lo que se observa en cautiverio (Meyer-Holzapfel, 1968).

Entre los comportamientos anormales que presenta un animal sometido a confinamiento se encuentran los estereotipados, que se caracterizan por presentarse con alta frecuencia y carecer de un propósito aparente. Aparecen en algunos casos, como un patrón fijo de conducta que no varía en tiempo y duración (Mason, 1991). Estos comportamientos solo se han reportado en individuos bajo condiciones de cautiverio, no así en condiciones silvestres (Castillo-Guevara *et al.*, 2012). Se presentan en función de la especie y de su contexto físico y social, por ejemplo, en carnívoros las conductas más frecuentes son las relacionadas a sus desplazamientos (Carlstead, 1998; Clubb y Mason, 2003); en herbívoros como los venados, se presentan con mayor frecuencia las conductas orales, como lamer constantemente superficies, salivar demasiado, masticar constantemente, morder objetos o hacer movimientos con su lengua para compensar la falta de ramoneo (alimentación de hierbas y ramas de arbustos en el campo) (Bashaw *et al.*, 2001; Mason y Rushen, 2009). En primates no humanos estos comportamientos son más diversos, como los desplazamientos repetitivos (Novak y Sackett, 2006), el exceso de acicalamiento, chuparse el dedo, el balanceo (Bayne *et al.*, 1992; Berkson, 1968), la coprofagia (Akers y Schildkraut, 1985) o el regurgitamiento-reingesta (Lukas, 1999).

Tabla 1. Indicadores positivos y negativos de bienestar animal de acuerdo con el estado fisiológico, afectivo y de la biología de un animal.

Criterios	Indicadores negativos	Indicadores positivos
Estado fisiológico	<ul style="list-style-type: none">➤ Deficiente estado corporal (deshidratado, magro, con mala calidad de plumas, pelo o escamas)➤ Presencia de lesiones o escoriaciones➤ Incapacidad para reproducirse➤ Presencia constante de cortisol➤ Presencia de enfermedades o afecciones➤ Depresión del sistema inmunológico➤ Valores basales extremos (química sanguínea, otros)	<ul style="list-style-type: none">➤ Buen estado corporal (hidratado, robusto, buena calidad de plumaje, pelo o escamas)➤ Ausencia de lesiones o escoriaciones➤ Sin problemas para reproducirse➤ Escasa o ausente presencia de cortisol➤ Ausencia de enfermedades o afecciones➤ Valores basales estables (química sanguínea, otros)
Estado afectivo	<ul style="list-style-type: none">➤ Dolor, miedo, irritación, frustración, ansiedad, fobia, angustia➤ Agresividad anormal➤ Reducida diversidad de comportamientos➤ Presencia de comportamientos anormales y estereotipos➤ Dificultad para realizar movimientos➤ Escasas interacciones sociales➤ Automutilaciones	<ul style="list-style-type: none">➤ Ausencia de dolor, miedo, irritación, frustración, ansiedad, fobia, angustia➤ Presencia de comportamientos similares a los que presenta en libertad➤ Presencia de una amplia diversidad de comportamientos (curiosidad, lúdicos)➤ Agilidad en sus movimientos➤ Presencia de interacciones sociales y proximidad entre individuos
Biología del animal	<ul style="list-style-type: none">➤ Baja o nula sobrevivencia de juveniles➤ No se alimenta➤ Se alimenta, pero regurgita o vomita lo consumido➤ Ingiere materiales que le pueden hacer daño➤ Evidencias de no estar confortable debido a la temperatura o espacio físico➤ Reducida esperanza de vida	<ul style="list-style-type: none">➤ Alta sobrevivencia de juveniles➤ Se alimenta sin problema➤ Alta tasa reproductiva➤ Evita consumir materiales que le pueden hacer daño➤ Evidencias de sentirse confortable➤ Elevada esperanza de vida

Fuente: modificado de Fraser y Weary (2005).



Satisfacción de necesidades y estrés

Si el bienestar de un animal se encuentra en estrecho vínculo con la manera en que se relaciona con su entorno, implica por lo tanto la satisfacción de sus necesidades. Surge entonces la pregunta ¿cómo saber cuáles son las necesidades de un animal silvestre? Para responder, habría que identificar las necesidades particulares del o los individuos involucrados, con base en el conocimiento de sus características biológicas, identificando así los requisitos para su mantenimiento y desarrollo, lo cual está a su vez relacionado a su dieta, espacio, temperatura, humedad y cobertura del hábitat (características de los sitios para resguardo y protección), para que no se enfrenten a situaciones de ansiedad. Sin embargo, el estrés es un factor inherente a la vida silvestre, variando entre individuos, especies y poblaciones, toda vez que no tienen garantizados permanentemente el abastecimiento de los recursos (como el alimento y sitios de refugio) e inclusive, al existir disposición de estos, puede ocurrir competencia intra o interespecífica que genere dificultad por hacerse del recurso (Fig. 2). El estrés también varía entre tipos de animales (por ejemplo, carnívoros y herbívoros), de tal manera que es diferente el experimentado por los depredadores con relación al de las presas.



Figura 2. El estrés es un factor inherente a la vida silvestre, aún entre los depredadores, que no siempre satisfacen sus necesidades de alimento debido a la competencia con otras especies, sequías y escases de alimento. En la imagen un coyote evidencia su estrés a través de lo erizado de su pelaje y mostrando sus colmillos (imagen generada con inteligencia artificial, ChatGTP).

El estrés es una respuesta fisiológica a un estímulo que se percibe como amenazante, producido por una presión ambiental o psicológica (Allaby, 2009), que propicia la acumulación de adrenalina y cortisol, originando a su vez un incremento del ritmo cardíaco y de la presión arterial, con una afectación en el sistema inmunológico (Alkema, 2019) y aparición de miopatías (degeneración de los músculos que conectan con los huesos) (Munro, 1994; Paterson, 2014). La miopatía puede ser clasificada en cuatro síndromes clínicos: 1) shock de captura, 2) atáxico mioglobínúrico (debilidad, rigidez y descoordinación), 3) ruptura de las fibras musculares (liberando mioglobina en la sangre y provocando una coloración oscura de la orina y posible daño en riñones) y 4) reacción intensa y temporal al evento traumático (Paterson, 2014; Dechen *et al.*, 2014). De acuerdo con Spreker (2005), dependiendo del síndrome que se trate, los signos aparecerán de manera inmediata, unas horas después o hasta semanas después del evento. En las primeras etapas se presenta hipertermia (temperatura corporal anormalmente alta), taquipnea (frecuencia respiratoria más rápida de lo normal) y taquicardia (aceleramiento de los latidos del corazón). A medida que progresa el padecimiento ocurre dolor o rigidez muscular, paresia (debilidad muscular parcial, o pérdida limitada de la fuerza y capacidad de movimiento), tortícolis (afectación de los músculos del cuello que provoca que la cabeza se incline, gire o tuerza hacia un lado, causando dolor, rigidez y dificultad para mover el cuello), parálisis total, postración y muerte. En este contexto, identificar el estrés en un animal para relacionarlo con su nivel de bienestar, llega a ser altamente complejo, lo que puede llevar a un evaluador al plano de la subjetividad. Dado lo anterior, debe tomarse en cuenta el bienestar de un animal para no incrementar el estrés con o después de la captura y la manipulación, por lo que es pertinente el análisis y evaluación de las técnicas a utilizar y sus implicaciones en la generación de traumas. En este sentido, si bien hay técnicas que pueden proporcionar mucha información de la fisiología y características de la biología y ecología de los animales, pueden ser al mismo tiempo altamente invasivas. Tal es el caso de la telemetría en serpientes, que se utiliza para estudios de uso de hábitat, desplazamiento o termorregulación (Shine *et al.*, 2003). Esta técnica implica el implante de un radiotransmisor en la cavidad intraperitoneal mediante una intervención quirúrgica. La afectación en el comportamiento del animal que provoca el radiotransmisor, así como la cirugía en sí, aún no ha sido evaluada, pudiendo afectar también el proceso reproductivo en hembras (Graves y Duvall, 1993) e incluso comprometer su sobrevivencia (Rudolph *et al.*, 1998). Tampoco ha sido evaluado si el radiotransmisor provoca incomodidad, dolor o sufrimiento y, por lo tanto, se desconoce el nivel de afectación en el bienestar de estos reptiles.

Otras técnicas comúnmente utilizadas para el estudio de aspectos ecológicos de la fauna silvestre son la captura y marcaje, que pueden causar algún tipo de afectación en el individuo afectando así



su bienestar. Dependiendo del tipo de marcaje que se utilice (permanente o semipermanente como collares con radiotransmisores o geolocalizadores (GPS), anillos o aretes de plástico o metálicos, pinturas, tatuajes, ectomización de falanges, cortes o muescas en las orejas), pueden provocar un trauma en el individuo y originar alteraciones en sus comportamiento, así como dificultar su desplazamiento, generar incomodidad por su tamaño o por el lugar en el cuerpo en que fueron colocadas, o por su peso, ya que además de la molestia por portar un objeto extraño, les provocan riesgos a su integridad física al hacerlos más evidentes a los depredadores. Regularmente en la utilización de cierto tipo de marcajes se privilegia la identificación de los individuos, sin prestar la suficiente atención a su bienestar (Fig. 3).



Figura 3. El marcaje en fauna silvestre puede causar afectaciones al animal que la porta (imagen generada con inteligencia artificial, ChatGTP).

La captura de animales a través de la utilización de trampas (cepos, de caja o reja, de nudo corredizo, de caída o de golpe, redes), también son generadoras de estrés en el individuo capturado, con detrimento en su integridad física. Si el lapso para la revisión de las trampas es prolongado, se puede acumular ansiedad en el animal y provocar lesiones, insolación, padecer hambre, sed, calor o frío, y producto de ello pueden morir (Fig. 4).



Figura 4. Una trampa de reja puede generar menor estrés, comparado con el uso de un cebo que puede dañar una extremidad del animal. Sin embargo, si se mantiene al individuo capturado en la trampa por un tiempo inadecuado, se genera ansiedad y presentará comportamientos estereotipados. En la foto se observa un mapache (*Procyon lotor*) (fotografía tomada por: Gustavo Arnaud).

Una vez que se ha capturado un animal, se deben seguir protocolos para su manejo y reducir al máximo la afectación, considerando el menor tiempo posible para la toma de datos o muestras, procurando un entorno apacible, donde no haya movimientos bruscos ni ruido que los pudieran alterar. Tapar los ojos y oídos, puede ayudar al animal a reducir la ansiedad. En muchos casos en la manipulación de fauna silvestre no se utilizan anestésicos, por desconocimiento de su uso, sin embargo la contención química es muy útil facilitando el manejo. Al respecto, la NOM-033-SAG/ZOO-2014, hace referencia que quien aplique anestésicos para un objetivo determinado, deberá contar con una capacitación específica para ello. Por otra parte, dado que es posible la transmisión de agentes patógenos del manipulador hacia el animal (zoonosis inversa), es preciso considerar el estado de salud de quien tiene contacto con el animal, de tal manera que si el manipulador presenta un resfrío, gripe, o cualquier otro padecimiento transmisible, deberá de abstenerse de participar en la manipulación, considerando así efectos potencialmente negativos en el bienestar no solo del animal capturado, sino inclusive de su población. (OPS y OMS, 2003)



Considerar el bienestar de la fauna silvestre implica por lo tanto evaluar las técnicas utilizadas, privilegiando aquellas que sean no invasivas, con el fin de no causar algún nivel de afectación o, si se provoca, que sea mínima. En este sentido, para la toma de datos de temperatura de reptiles, puede llevarse a cabo con termómetros láser, que permiten hacer el registro a cierta distancia, evitando tener que capturarlos para introducirles un termómetro en la cloaca, o implantarse un dispositivo. Este tipo de termómetros láser se han usado eficientemente para estimar la temperatura de lagartijas y serpientes (Gadsden *et al.*, 2015; Arnaud *et al.*, 2019). El uso de cámaras con sensor de movimiento (cámaras-trampa) pueden sustituir en ciertos casos, dependiendo de los objetivos de la investigación, la utilización de otro tipo de trampas, ya que no perturban la vida de los animales (Chávez, 2013), y por lo tanto, no afectan su bienestar.

Importancia del bienestar en la fauna silvestre

Existen razones éticas, de conservación y de salud pública por las que es preciso considerar el bienestar animal al abordar la fauna silvestre. Entre ellas se encuentran:

- 1) Razones éticas: los animales silvestres son seres vivos que sienten y que están sujetos a la selección natural, por lo que su estado de bienestar es una condición inherente a su biología y ecología. En condiciones de vida libre no necesitan del humano, sin embargo, es preciso que se consideren aspectos de su bienestar cuando ocurran interacciones humano-animal, ya sean directas o indirectas.
- 2) Razones de conservación: la conservación de los recursos naturales es una estrategia de sobrevivencia para el humano, porque depende de la naturaleza para vivir. En este sentido, el procurar el bienestar de los animales silvestres está estrechamente relacionado con la salud de las poblaciones y de los ecosistemas. Un animal con un bienestar deficiente puede tener una menor capacidad de reproducirse, criar a su progenie o defenderse de enfermedades y depredadores, lo que repercute forzosamente en un detrimento en las condiciones ambientales que a su vez pueden ser negativas para el humano.
- 3) Razones de salud pública: un bienestar animal deficiente puede aumentar el riesgo de zoonosis y por lo tanto incrementar la posibilidad de enfermedades transmisibles no sólo a humanos sino también a los animales domésticos.

Amenazas que afectan el bienestar de la fauna silvestre

La afectación al bienestar de la fauna silvestre no solo ocurre en una interacción directa en su manipulación. Existen otros factores que inciden directamente en su amenaza, entre los que figuran:

- 1) **La alteración del hábitat** (reducción de superficie, pérdida, degradación y fragmentación, cambio de uso del suelo). Este factor es considerado como la principal amenaza en la disminución o declinación de las poblaciones silvestres (George y Dobkin, 2002). El impacto del humano sobre el medio ambiente se ha extendido más allá de los límites urbanos, lo que ha implicado el aislamiento de poblaciones o la dificultad para la fauna de satisfacer sus requerimientos para su sobrevivencia.
- 2) **Cacería furtiva y tráfico ilegal de fauna silvestre.** Estas actividades tienen un impacto directo e irreversible sobre los ecosistemas y su biodiversidad (SEMARNAT, 2013). Son sobre todo una gran amenaza para las especies endémicas o carismáticas que representan un atractivo económico para los traficantes; provocan la disminución de poblaciones al grado de llevarlas hacia extinciones locales.
- 3) **Contaminación ambiental.** La contaminación del agua, aire y suelo tiene un impacto negativo en los ecosistemas y en el flujo de nutrientes y de energía. La contaminación química es importante en aves, reptiles y carnívoros silvestres, ya que se asocia a un menor éxito reproductivo y/o menores probabilidades de supervivencia, lo que puede ser causa directa o indirecta del declive de las poblaciones (De Francisco *et al.*, 2003; Ortiz-Santaliestra y Egea-Serrano, 2013; Rodríguez-Estival y Mateo, 2019).
- 4) **Cambio climático.** Los cambios en la temperatura ambiental y las modificaciones en los regímenes de precipitaciones y presencia de sequías propician cambios en los hábitats, generando afectaciones en la fauna silvestre que tiene que adaptarse al entorno cambiante, o morir. Ante estos cambios, la búsqueda de otros sitios con condiciones favorables implica estrés y riesgos de sobrevivencia (WWF, 2018).
- 5) **Interacciones con humanos.** Los encuentros entre humanos y animales silvestres varían dependiendo del grado de temor que exista entre uno y otro, o entre ambos. Una interacción negativa es aquella en la que uno de los dos (humano o animal) resulte perjudicado (con la presencia de estrés, miedo, ansiedad, lesiones o la muerte); una interacción neutral es aquella en la que se tolera la presencia del otro, pero sin existir contacto físico y sin generar



una respuesta agresiva; una interacción positiva es aquella en la que la tolerancia permite la aproximación y el eventual contacto físico. Una interacción positiva puede transformarse en una negativa, si después de la aproximación positiva se lleva a cabo la manipulación o manejo del animal silvestre utilizando movimientos rápidos y toscos, con materiales que lo lastimen o le provoquen ansiedad, convirtiéndolo en negativa.

Hay interacciones negativas en las cuales la presencia humana afecta la sobrevivencia de los animales, por ejemplo, al acercarse a zonas de anidación de aves, propiciando el alejamiento de la madre y dejando expuestos los huevos o crías (Albores-Barajas y Soldatini, 2011). En otros casos las interacciones negativas son debido a información falsa o mitos que se tienen sobre los animales, por lo que al encontrarlo se busca sacrificarlo, como regularmente ocurre con las serpientes.

Consideraciones finales y perspectivas

Garantizar el bienestar de los animales en vida silvestre, así como de sus poblaciones, tiene implicaciones y desafíos complejos, ya que no basta centrarse solo en ellos, sino también es necesario considerar sus interacciones inter-específicas y el estado de conservación del hábitat en el que viven.

Si bien es posible realizar una evaluación preliminar del bienestar de un animal silvestre, esto no es más que una aproximación de la realidad, ya que resulta complejo definir con objetividad el nivel de bienestar si no se dispone de información de referencia. Aunque se pueden identificar indicadores positivos y negativos del bienestar, se puede incurrir en una valoración subjetiva si no se tiene conocimiento de su biología y ecología.

Con relación a la satisfacción de sus necesidades, esto les provoca cierto nivel de bienestar, sin embargo, es poco probable que un evaluador pueda objetivamente argumentar que un animal tiene satisfechas sus necesidades, ya que esto no siempre es evidente, por lo que es un desafío la estimación objetiva del bienestar en fauna silvestre, ya que el estrés es un factor común en la naturaleza. En este sentido, un animal con una buena condición corporal puede reflejar su aceptable grado de alimentación, pero no el grado de estrés en el que vive.

En relación a los métodos no invasivos, si bien es factible utilizarlos para la contención y manejo, es poco claro el efecto que se pueda provocar en la fisiología y comportamiento del animal una vez que es reintegrado a su hábitat. En la manipulación es preciso seguir normas éticas, lo cual involucra actitudes y comportamientos relacionados al respeto por todos los seres vivos y sus características biológicas particulares, así como el respeto de sus espacios silvestres y del ecosistema en general.

Finalmente, para considerar el bienestar animal de la fauna silvestre a largo plazo, es preciso tener en cuenta acciones que contribuyan a enfrentar las amenazas de las que es sujeta y que pueden ser precursoras de estrés, por lo tanto, es recomendable:

- Proteger y restaurar el hábitat natural de la fauna silvestre, lo que implica su conservación, evitando la fragmentación, la escasez de recursos y el aislamiento de las poblaciones.
- Implementar medidas para combatir la cacería furtiva y el tráfico ilegal de animales silvestres.
- Reducir la contaminación del agua, el aire y el suelo por químicos y sólidos, para proteger la salud de los ecosistemas.
- Implementar medidas de mitigación del cambio climático.
- Implementar prácticas de contención y manipulación de la fauna silvestre que minimicen el estrés y el sufrimiento.
- Educar y sensibilizar a la población sobre la importancia del bienestar animal de la fauna silvestre y promover prácticas que lo respeten.



Literatura citada

- Akers, J.S. y D.S. Schildkraut. 1985. *Regurgitation/reingestion and coprophagy in captive gorillas*. Zoo Biology, 4: 99-109. <https://doi.org/10.1002/zoo.1430040203>
- Albores-Barajas, Y.V. y C. Soldatini. 2011. *Effects of human disturbance on a burrow nesting seabird*. Revista Mexicana de Biodiversidad, 82(4): 1262-1266. <https://doi.org/10.22201/ib.20078706e.2011.4.747>
- Allaby, M. 2009. *Oxford dictionary of zoology*. 3th edition. Oxford: Oxford University Press.
- Alkema, M. 2019. *How stress can weaken defenses. How the 'fight-or-flight' response impairs cellular defense mechanisms*. ScienceDaily. <https://www.sciencedaily.com/releases/2019/09/190909134912.htm>
- Arnaud, G., S. Sandoval, J. Escobar-Flores, V. Gómez-Muñoz, J.L. Burguete. 2019. *Thermal ecology of the rattlesnake Crotalus catalinensis from Santa Catalina Island, Gulf of California*. Acta Universitaria, 28(6):1-8. <https://doi.org/10.15174/au.2018.1667>
- Bashaw, M.J., L.R. Tarou, T.S. Maki, T.L. Maple. 2001. *A survey assessment of variables related to stereotypy in captive giraffe and okapi*. Applied Animal Behaviour Science, 73:235-247. [https://doi.org/10.1016/S0168-1591\(01\)00137-X](https://doi.org/10.1016/S0168-1591(01)00137-X)
- Bayne, K., S. Dexter, S. Suomi. 1992. *A preliminary survey of the incidence of abnormal behaviors in rhesus monkey (Macaca mulatta) relative to housing condition*. Laboratory Animal, 21(5):38-46.
- Berkson, G. 1968. *Development of abnormal stereotyped behaviours*. Developmental Psychobiology, 1(2):118-132. <https://doi.org/10.1002/dev.420010210>
- Broom, D.M. 1986. *Indicators of poor welfare*. British Veterinary Journal, 142(6):524-526. [https://doi.org/10.1016/0007-1935\(86\)90109-0](https://doi.org/10.1016/0007-1935(86)90109-0)
- Broom, D.M. 1991. *Assessing welfare and suffering*. Behavioural Processes, 25(2-3):117-123. [https://doi.org/10.1016/0376-6357\(91\)90014-Q](https://doi.org/10.1016/0376-6357(91)90014-Q)
- Broom, D.M. 2000. *Welfare assessment and welfare problem areas during handling and transport*. Pp. 43-62. En: Grandin T. (ed.). *Livestock Handling and Transport*. 2nd edition. CABI Publishing, UK. <https://doi.org/10.1079/9780851994093.0043>
- Broom, D.M. y A.F. Fraser. 2007. *Domestic Animal Behaviour and Welfare*. 4th edition. CABI Publishing. Wallingford, UK.
- Broom, D.M. 2008. *Welfare assessment and relevant ethical decisions: key concepts*. Annual Review of Biomedical Sciences, 10, T79-T90. <https://doi.org/10.5016/1806-8774.2008.v10pT79>

- Broom, D.M. 2011. *Bienestar animal: conceptos, métodos de estudio e indicadores*. Revista Colombiana de Ciencias Pecuarias, 24(3):306-321.
- Cabanac, M. 1979. *Sensory pleasure*. The Quarterly Review of Biology, 54(1):1-29. <https://doi.org/10.1086/410981>
- Carlstead, K. 1998. *Determining the causes of stereotypic behaviours in zoo carnivores*. Pp. 172-183. En: Shepherdson, D., J. Mellen y M. Hutchins. (eds.). *Second Nature: environmental enrichment for captive animals*. Smithsonian Press. Washington, USA.
- Castillo-Guevara, C., K. Unda-Harp, C. Lara y J.C. Serio-Silva. 2012. *Enriquecimiento ambiental y su efecto en la exhibición de comportamientos estereotipados en jaguares (Panthera onca) del Parque Zoológico "Yaguar Xoo", Oaxaca*. Acta Zoológica Mexicana, 28(2):365-377.
- Chávez, C., A. de la Torre, H. Bárcenas, R. Medellín, H. Zarza y G. Ceballos. 2013. *Manual de fototrampeo para estudio de fauna silvestre. El jaguar en México como estudio de caso*. 1ª edición. México:Alianza WWF-Telcel, Universidad Nacional Autónoma de México. México
- Clubb, R. y G. Mason. 2003. *Captivity effects on wide-ranging carnivores*. Nature, 425:473-474. <https://doi.org/10.1038/425473a>
- De Francisco, N., J.D. Ruiz y E.I. Aguera. 2003. *Lead and lead toxicity in domestic and free living birds*. Avian Pathology, 32(1):3-13. <https://doi.org/10.1080/0307945021000070660>
- Dechen, A., D. Williams, W. Porter, S. Fitzgerald y K. Hynes. 2014. *Effects of capture- related injury on postcapture movement of white-tailed deer*. Journal Wildlife Disease, 50(2):250-258. <https://doi.org/10.7589/2012-07-174>
- Diario Oficial de la Federación (DOF). 1988. DOF. 1988. *Ley general del equilibrio ecológico y protección al ambiente*. (28 de enero de 1988), Secretaría de Gobernación, México, D.F.
- Diario Oficial de la Federación (DOF). 2019. *Modificación del Anexo Normativo III, Lista de especies en riesgo de la 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*. México. Diario Oficial de la Federación.
- Fraser, D. y D. Weary. 2005. *Applied animal behavior and animal welfare*. Pp. 345-366. En: Bolhuis, J. y L. Giraldeau. (eds.). *The Behavior of Animals. Mechanisms, Function and Evolution*. Blackwell Publishing. USA.
- Gadsden, H., G. Castañeda, y R. Rodríguez. 2015. *Xantusia extorris (Durango Night lizard). Field and preferred body temperature*. Herpetological Review, 46(3):440-441.



- George, T.L. y D.S. Dobkin. 2002. *Effects on habitat fragmentation on birds in western landscapes: contrasts with paradigms from the eastern United States*. Studies in Avian Biology. Cooper Ornithological Society. Allen Press, Inc., Lawrence, Kansas.
- Graves, B.M. y D. Duvall. 1993. *Reproduction, rookery use, and thermoregulation in free-ranging, pregnant Crotalus v. viridis*. Journal Herpetology, 27(1):33-41. <https://doi.org/10.2307/1564902>
- Hughes, B. 1976. *Behavior as an index of welfare*. Pp.1005-1012. En: Malta: World's Poultry Science Association (WPSA). Proceedings 5th European Poultry Conference and exhibition. Malta.
- Khillare, R.S. y M. Kaushal. 2021. *Animal welfare and its importance*. Agriculture Letters, 2(11):3-7.
- Laundré, J. W., L. Hernández y W. J. Ripple. 2010. *The landscape of fear: ecological implications of being afraid*. The Open Ecology Journal 3:1-7. <https://doi.org/10.2174/1874213001003030001>
- Lukas, K.E. 1999. *A review of nutritional and motivational factors contributing to the performance of regurgitation and reingestion in captive lowland gorillas (Gorilla gorilla gorilla)*. Applied Animal Behaviour Science 63(3):237-249. [https://doi.org/10.1016/S0168-1591\(98\)00239-1](https://doi.org/10.1016/S0168-1591(98)00239-1)
- Mason, G. 1991. *Stereotypics: A critical review*. Animal Behaviour, 41:1015-1037. [https://doi.org/10.1016/S0003-3472\(05\)80640-2](https://doi.org/10.1016/S0003-3472(05)80640-2)
- Mason, G.L. y J. Rushen. 2009. *Stereotypic animal behavior: fundamentals and applications to welfare*. Second Edition. Commonwealth Agricultural Bureau International Wallingford. Oxon, UK.
- McMillan, F.D. 2002. *Development of a mental wellness program for animals*. Journal of the American Veterinary Medical Association, 220(7):965-972. <https://doi.org/10.2460/javma.2002.220.965>
- Meyer-Holzapfel, M. 1968. *Abnormal behavior in zoo animals*. En: Fox M.M. (ed.). Abnormal Behavior in Animals. Saunders. London, UK.
- Munro, R. 1994. *Capture myopathy*. En: Alexander, T.L. y D. Buxton, (eds.). Management and diseases of deer: a handbook for the veterinary surgeon. 2nd ed. The Veterinary Deer Society. London, UK.
- Novak, M.A. y G.P. Sackett. 2006. *The effects of rearing experiences: the early years*. En: Sackett, G.P., G.C. Ruppenthal y K. Elias. (eds). Nursery rearing of nonhuman primates in the 21st century. Springer Science and Business Media Inc. New York, USA. https://doi.org/10.1007/978-0-387-25640-5_1

- Organización Panamericana de la Salud (OPS), y Organización Mundial de la Salud (OMS). 2003. *Zoonosis y enfermedades transmisibles comunes al hombre y a los animales*. 3a. edición. Organización Panamericana de la Salud, Organización Mundial de la Salud. Washington, USA:
- Ortiz-Santaliestra, M.E. y A. Egea-Serrano. 2013. *Análisis del impacto de la contaminación química sobre la herpetofauna: nuevos desafíos y aplicaciones prácticas*. Boletín de la Asociación Herpetológica de España, 24(1):2-34.
- Procuraduría Ambiental y del Ordenamiento Territorial del D.F. (PAOT). (sin año). *Guía de bienestar en animales de compañía*. https://paot.org.mx/micrositios/animales/pdf/Resumen_bienestar_animal.pdf
- Paterson, J. 2014. *Capture myopathy*. Pp. 171-179. En: West, G., D. Heard y N. Caulkett. (eds.). *Zoo Animal and Wildlife Immobilization and Anesthesia*. Wiley and Blackwell. 2nd edition. Iowa, USA. <https://doi.org/10.1002/9781118792919>
- Rodríguez-Estival, J. y R. Mateo. 2019. *Exposure to anthropogenic chemicals in wild carnivores: a silent conservation threat demanding long-term surveillance*. Current Opinion in Environmental Science and Health, 11:21-25. <https://doi.org/10.1016/j.coesh.2019.06.002>
- Rudolph, D.C., S.J. Burgdorf, R.R. Schaefer, R.N. Conner y R.T. Zappalorth. 1998. *Snake mortality associated with late season radio-transmitter implantation*. Herpetological Review, 29(3):155-156.
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). 2013. *Tráfico ilegal de vida silvestre*. Centro de Educación y Capacitación para el Desarrollo Sustentable; Procuraduría Federal de Protección al Ambiente. México.
- Shine, R., M. Sun, M. Fitzgerald y A. Kearney. 2003. *A radiotelemetric study of movements and thermal biology of insular Chinese pit-vipers (Gloydius shedaoensis, Viperidae)*. Oikos, 100(2):343-352. <https://doi.org/10.1034/J.1600-0706.2003.11942.X>
- Silva, A.B. y H.R. Eliosa. 2016. *El estrés en vertebrados silvestres, su efecto fisiológico y evolutivo*. Ciencias, (120-121):22-28.
- Spraker, T.R. 2005. *Capture myopathy/transportation myopathy in cervids and small ruminants*. North American Veterinary Conference, Orlando, Florida.
- WWF. 2018. *La vida silvestre en el calentamiento global*. WWF-Reino Unido. https://wwflac.awsassets.panda.org/downloads/wwf_reporte_la_vida_silvestre_en_el_calentamiento_global.pdf



Semblanzas de los autores

- **Gustavo Arnaud-Franco.** Doctor en Ciencias por la Universidad de Paris XIII. Miembro del SIN-Nivel 1. Investigador titular del Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste (CIBNOR), Programa de Planeación Ambiental y Conservación. Desarrolla investigación sobre manejo y conservación de fauna silvestre del noroeste de México, con énfasis en historia natural y venenos de serpientes de cascabel y ecología de pequeños mamíferos. Correo electrónico: garnaud04@cibnor.mx
- **Amaury Cordero-Tapia.** Doctor en Ciencias por el Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste (CIBNOR). Especialista en Patología Diagnóstica Veterinaria, con experiencia en estudios sobre tortugas marinas y enfermedades emergentes en fauna silvestre. Especialización en áreas forenses y criminológicas, incluyendo entomología forense, victimología, perfilación criminal y bioética. Responsable del Bioterio del CIBNOR. Correo electrónico: acordero@cibnor.mx

Cita

Arnaud-Franco, G. y Amaury Cordero-Tapia. Bienestar animal en la fauna silvestre: un desafío complejo. *Recursos Naturales y Sociedad*, 2025. Vol. 11 (3): 276-295. <https://doi.org/10.18846/renaysoc.2025.11.11.03.0016>.

Sometido: 19 de agosto de 2025

Aceptado: 9 de octubre de 2025

Editor asociado: Dr. Arturo Sánchez Paz

Editor ejecutivo: Dr. Arturo Sánchez Paz

Diseño gráfico editorial: Ing. Francisca Elizabeth Villegas Carrazco

Selenium nanoparticles in hydroponic systems
as a novel strategy for plant fortification

Nanopartículas de selenio en sistemas hidropónicos como estrategia para la fortificación vegetal

Alejandra Jarero Hernández¹, Luis Hernández Adame^{2,4*},
Paola Magallón Servín³, Luis Guillermo Hernández Montiel³

Resumen

La agronanotecnología es un campo emergente de investigación que ha logrado combinar la agronomía con el uso de nanopartículas. Esto con el fin de mejorar los cultivos, incrementar su productividad, protegerlos y bio-fortificarlos. El selenio es considerado un micronutriente esencial para el ser humano y, sobre todo, para las plantas. En los sistemas vegetales ayuda a mejorar la germinación y crecimiento, mientras que, en los humanos, estimula varios procesos relacionados a la salud. En este sentido, este artículo explica brevemente la importancia del selenio en los alimentos, su ruta de absorción en sistemas vegetales y el aporte benéfico en la salud humana. Igualmente, se analiza el enfoque de cultivo vegetal por sistema hidropónico como herramienta para fortificar los alimentos con nanopartículas de selenio, reduciendo con esto algún impacto negativo en el ambiente por el uso de nanopartículas.

Palabras clave: nanopartículas, selenio, hidroponía, cultivos, fortificación.

¹ Unidad Académica de Ciencias Químicas. Universidad Autónoma de Zacatecas. Carr. Zacatecas – Guadalajara Km. 6, Ejido la Escondida C.P. 98160, Zacatecas, Zac. México.

² SECIHTI-Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste, Instituto Politécnico Nacional 195, La Paz, BCS, México.

³ Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste, S.C. Av. Instituto Politécnico Nacional 195, Playa Palo de Santa Rita Sur, C. P. 23096, La Paz, Baja California Sur, México

⁴ Sección de Biotecnología, Centro de Investigación en Ciencias de la Salud y Biomedicina, Universidad Autónoma de San Luis Potosí, Av. Sierra Leona 550, Lomas 2ª. Sección, San Luis Potosí 78210 México.

* Autor de correspondencia: ladame@cibnor.mx



Abstract

Agronanotechnology is an emerging field of research that combines agronomy with nanoparticles to improve crops, their fortification, productivity and protect them from potential pathogens. Selenium (Se) is considered an essential micronutrient for humans and plants. In plant systems, it helps improve germination and growth; in humans, it stimulates various health-related processes. In this sense, this article briefly explains the importance of Se in plants, its absorption route, and its beneficial contribution to human health. Likewise, the approach to plant cultivation by the hydroponic system is analyzed as a tool to fortify foods with selenium nanoparticles, reducing any negative impact on the environment due to the use of nanoparticles.

Keywords: nanoparticles, selenium, hydroponics, crops, fortification.

Antecedentes

En la última década, la agro-nanotecnología se ha convertido en una de las innovaciones tecnológicas más importantes utilizadas en los sistemas agroalimentarios de todo el mundo. La agro-nanotecnología es un área de las ciencias y tecnologías que se encarga de diseñar y aplicar nanomateriales que pueden ser utilizados como un agente activo, o bien, como un vehículo de transporte de agroquímicos o moléculas de interés biológico, con objetivos que incluyen: I) El aumento de la calidad y cantidad de la cosecha, II) Mejorar la sanidad de las plantas, III) Disminuir el impacto ambiental por el uso excesivo de plaguicidas, IV) Incrementar la vida de anaquel de los alimentos y V) Generar nuevos productos con valor agregado, entre otros. En el área de la nanotecnología, las nanopartículas (NPs) son partículas muy pequeñas que están formadas por átomos o moléculas a escala nanométrica ($1 \text{ nm} = 10^{-9} \text{ m}$), lo que significa que son diminutas, incluso de un tamaño menor al de una bacteria (Fig. 1).

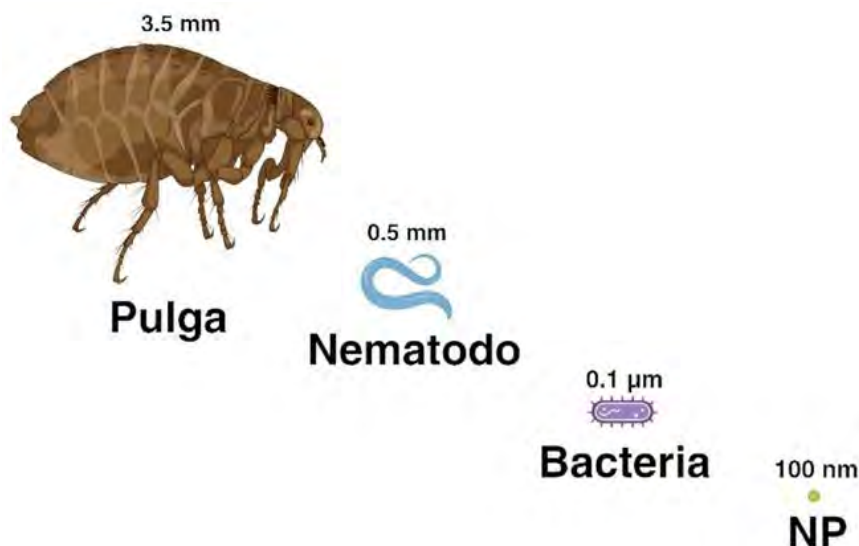


Figura 1. Representación esquemática de los tamaños de diferentes organismos. Las nanopartículas están ubicadas en una región donde su tamaño es menor a 100 nm.

Las nanopartículas en las plantas

En la agricultura, por ejemplo, se han aplicado NPs de hierro (Fe), zinc (Zn), selenio (Se), titanio (Ti) o cobre (Cu) en plantas como; tomate, acelga, trigo, chile, cítricos, lechuga, albahaca, haba, café, maíz, fresa, entre otros, para incrementar la absorción de nutrientes y, en consecuencia, mejorar la cantidad y calidad de la cosecha. En diversos estudios se ha demostrado que los micronutrientes o macronutrientes, cuando son aplicados a las plantas en forma de NPs, son absorbidos de manera más eficiente en comparación con los fertilizantes químicos usados de manera tradicional, y esto se debe a que las NPs permiten mejorar la estabilidad fisicoquímica de los compuestos activos protegiéndolos de la degradación térmica, degradación por radiación UV, además permiten mejorar los procesos de absorción y distribución de nutrientes dentro de la planta, lo que incrementa su aprovechamiento. Por estas razones, el uso de NPs se ha convertido en una estrategia prometedora para mejorar la nutrición vegetal.

El selenio como nutriente en los seres vivos

El selenio (Se), es un micronutriente esencial para los seres humanos y plantas. Según la organización mundial de la salud (OMS), la dosis diaria de Se recomendada por persona es entre 55 a 70 μg. El Se es un elemento importante en la regulación de diversas funciones del cuerpo humano, como la glándula tiroidea, la replicación del ácido desoxirribonucleico (ADN), el cofactor de enzimas antioxidantes, es modulador del sistema inmune, entre algunas otras funciones. En contraparte, si hay deficiencia de Se, el cuerpo presenta un mal funcionamiento del metabolismo que induce



enfermedades del corazón, hipertiroidismo, reducción de la fertilidad (principalmente en el sexo masculino), mayor susceptibilidad al cáncer, entre otros.

En relación con las plantas, el Se es fundamental para el crecimiento vegetal ya que induce protección contra el estrés oxidativo, aumenta la tolerancia al estrés biótico (ocasionado por animales, insectos, hongos y bacterias) y abiótico (ocasionado por factores físicos y químicos, como temperatura, sequía, e inundaciones), entre otros.

El uso de Se brinda múltiples beneficios al sector agroalimentario y a la sociedad en general. Sin embargo, aún existen grandes desafíos asociados a la administración de Se en plantas, que se deben principalmente a factores como la poca o nula concentración de selenio natural en los suelos agrícolas, un estado químico no biodisponible y la baja presencia de microorganismos capaces de transformar y movilizar el selenio.

¿Cuáles son las fuentes naturales de selenio y cómo lo absorben las plantas?

El Se es un elemento que puede encontrarse en pequeñas cantidades en las rocas, suelo y agua, sin embargo, no todo está disponible, ya que depende de su forma química para que este pueda ser aprovechado por los sistemas biológicos. En relación con las plantas, la absorción de Se es un proceso complejo. Para empezar, el Se debe estar en una de sus formas más comunes y asimilables por las plantas, el selenato (SeO_4^{2-}) y el selenito (SeO_3^{2-}). La absorción del SeO_4^{2-} y SeO_3^{2-} es bastante simple, ya que el SeO_4^{2-} entra fácilmente por medio de las raíces y viaja hasta los brotes de las plantas a través de transportadores de fosfato. Por otro lado, el SeO_3^{2-} se encuentra principalmente en el suelo agrícola, y solo una pequeña cantidad permanece en las raíces, por este motivo se considera bioacumulable y puede ser aprovechado para siembras posteriores. Una vez absorbido el SeO_4^{2-} , se realiza en la planta un proceso metabólico, el cual comienza con la asimilación del Se en formas orgánicas. Esta asimilación comienza reduciendo el SeO_4^{2-} a SeO_3^{2-} y a continuación a selenida. Después, esta pasa a reemplazar las moléculas de azufre que se encuentran en la planta, formando así la selenocisteína (SeCis). A raíz de la SeCis se logra sintetizar la selenometionina (SeMet). Al incorporar la SeCys y la SeMet a las proteínas, se generan las selenoproteínas que son las responsables de participar en la prevención del estrés oxidativo y los demás procesos biológicos. Con este proceso el SeO_4^{2-} se convierte en una selenoproteína y entonces representa un poco más del 80% del Se metilado en las plantas. Por otra parte, como ruta para eliminar el exceso de SeCis y SeMet, las plantas disipan estas moléculas a la atmósfera por medio de las hojas o directamente

desde el suelo. Un diagrama representativo a los mecanismos de absorción de selenio por las plantas se muestra en la Figura 2.

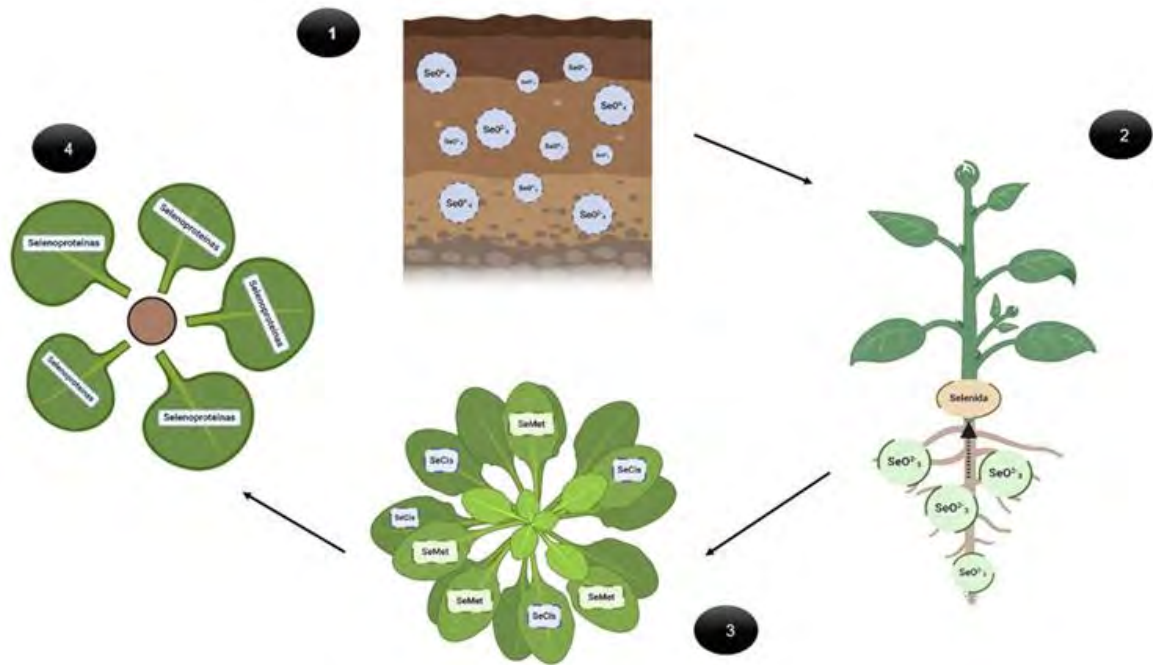


Figura 2. Etapas y rutas generales de absorción de selenio por las plantas.

Fortificación de alimentos con nanopartículas de selenio en sistemas hidropónicos

La fortificación o enriquecimiento de alimentos consiste en adicionar vitaminas, minerales u otros nutrientes a alimentos de consumo habitual con el fin de mejorar su valor nutricional. Existen 3 tipos de fortificación: 1) fortificación industrial, 2) fortificación doméstica y 3) biofortificación (modificado genéticamente).

El grupo de Nanotecnología y Biocontrol Microbiano del Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste (CIBNOR) ha estado trabajando en los últimos años en la fortificación de alimentos utilizando nanopartículas. Entre los resultados más destacados, se ha observado que los sistemas hidropónicos son más eficientes en la fortificación de alimentos utilizando NPs en comparación con otros sistemas de cultivo. Este hecho se debe a que, en un cultivo tradicional, las plantas obtienen los nutrientes del suelo a través de sus raíces. Este proceso requiere de tiempo y energía, y su eficiencia está en función de diversos factores, como tipo de suelo, presencia de microorganismos, condiciones ambientales, manejo agronómico, entre otros. Por otra parte, en los sistemas hidropónicos, las plantas reciben los nutrientes directamente en las raíces a través de una solución nutritiva, siendo más eficiente este sistema en la absorción de nutrientes por las plantas. Para el caso de las NPs, al estar suspendidas en la solución nutritiva, estas pueden ser captadas de una



manera más eficaz por las estructuras de las raíces y, debido a su diminuto tamaño, ser absorbidas y distribuidas de una mejor manera a través de toda la planta. Otras ventajas adicionales pueden ser la liberación controlada de nutrientes al interior de la planta, que impactaría en una notable disminución del uso de fertilizantes químicos y en la reducción de la contaminación de suelos y ecosistemas.

¿Qué es un sistema hidropónico? ¿podría servirnos para fortificar alimentos con nanopartículas?

Un sistema hidropónico se basa principalmente en el cultivo de plantas por medio de soluciones acuosas ricas en nutrientes, y una de sus diferencias más importantes con el sistema de cultivo tradicional es que la hidroponía no utiliza suelo o sustratos. Antes de decidir utilizar alguno de estos métodos para cultivar alimentos, es necesario analizar las ventajas y desventajas que tienen ambos sistemas (Cuadro1).

Cuadro 1. Comparación entre un sistema hidropónico y un sistema tradicional de producción de cultivos en el suelo

	CULTIVO			
	HIDROPÓNICO		EN SUELO	
	Ventajas	Desventajas	Ventajas	Desventajas
Nutrientes	Se puede tener un control sobre la cantidad de nutrientes que reciben las plantas	Una acumulación de sales minerales afecta la absorción de nutrientes por parte de las plantas	El suelo agrícola contiene una gran variedad de nutrientes que son benéficos en el crecimiento de la planta	No todos los nutrientes son aprovechados por la planta
Agroquímicos	No se necesita aplicar herbicidas	Puede existir una mayor dependencia a los fertilizantes químicos	Logran reducir la propagación de plagas y enfermedades, así aumentar la productividad del cultivo	Existe contaminación ambiental y riesgos a la salud humana y animal
Enfermedades y Plagas	Al proporcionar un ambiente más limpio reduce la probabilidad de contaminación y así prevenir la propagación de enfermedades	Existen microorganismos que pueden contaminar el agua y producir enfermedades en las plantas	Se conserva la sanidad vegetal	Tienen una mayor susceptibilidad a enfermedades y plagas
Agua	Se disminuye el gasto de agua	Se debe tener un monitoreo constante para evitar la salinización y el cambio de pH para garantizar un ambiente adecuado para el crecimiento de las plantas	El suministro adecuado de agua puede aumentar la productividad agrícola	La pérdida de agua que puede ser causada por evaporación puede causar una reducción en la eficiencia de riego y aumentar la demanda de agua para así conservar un nivel adecuado de humedad
Contaminación	Genera menos contaminación, es decir, ya que es un sistema cerrado, no se contamina el medioambiente	Contiene residuos orgánicos y químicos, que al no ser tratados de la forma correcta tienen un impacto negativo en el agua o en los suelos	Requiere menos energía para mantener los cultivos, en consecuencia, existe una reducción en la huella de carbono asociada con la producción de alimentos	El uso excesivo de agroquímicos provoca contaminación en suelos agrícolas y así afectar la salud de la planta y la calidad del suelo, así mismo la biodiversidad del ecosistema
Costos	Se implementan nuevas tecnologías para lograr una optimización en el rendimiento y eficiencia del cultivo	Requiere de una mayor inversión para equipos y materiales, como lo pueden ser los sistemas de riego y contenedores	Requiere un menor costo inicial ya sea en infraestructura y tecnología	Se suele requerir de un manejo regular del suelo como lo puede ser la fertilización, control de maleza, etc. Por lo que deriva a un costo adicional por maquinaria o mano de obra



Actualmente existen varios métodos de cultivo por hidroponía, entre los cuales se incluye el sistema hidropónico de mecha o pabito, la técnica de película nutritiva, sistema hidropónico de raíz flotante, aeropónica, sistema hidropónico de flujo y reflujo, sistemas hidropónicos de flujo laminar (NFT) y el sistema por goteo. Para conocer qué tipo de sistema se debe utilizar, hay que considerar los recursos que se tienen disponibles, como presupuesto, condiciones climáticas, recurso hídrico, tipo de cultivo y disponibilidad de espacio.

La hidroponía ha tomado relevancia en todos los países del mundo, incluido México, debido a que es una tecnología de cultivo que puede establecerse en zonas urbanas y periurbanas, permite la intensificación de los cultivos vegetales e incrementa la productividad por m^2 de alimentos; asimismo, permite el reciclamiento y administración de los recursos hídricos. Un esquema representativo de un sistema hidropónico se muestra en la Figura 3.

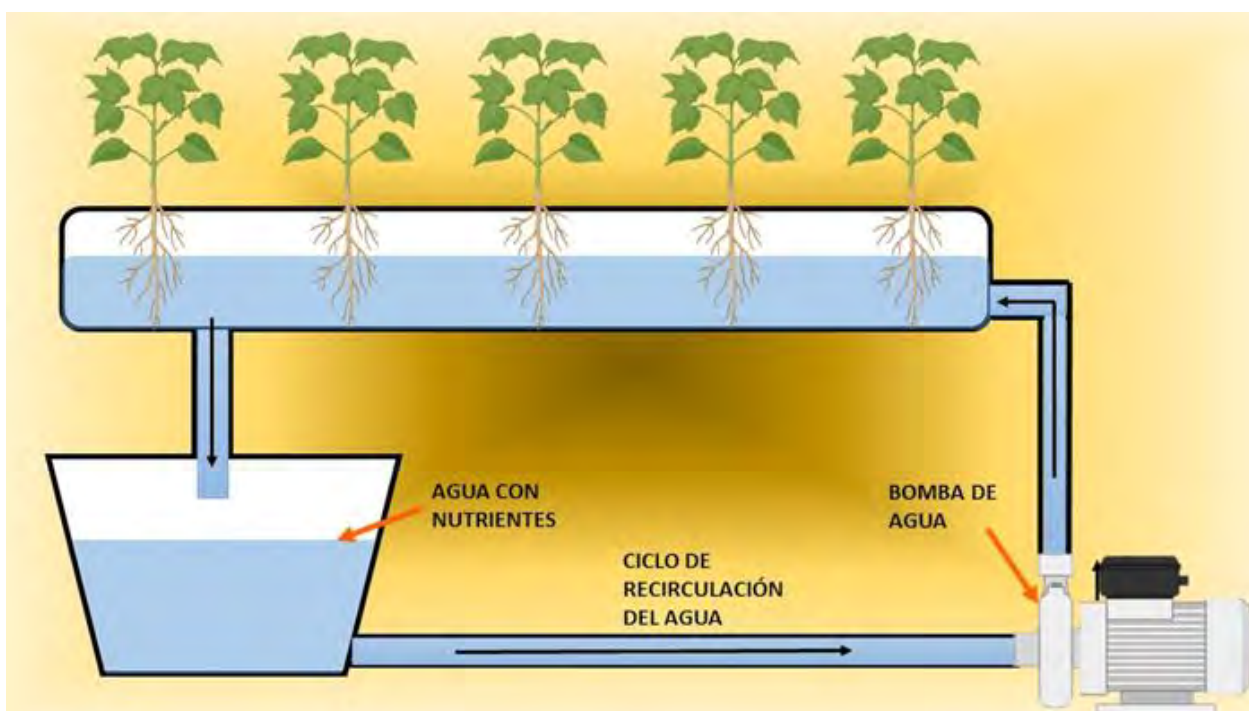


Figura 3. Representación de un sistema hidropónico usando el método de la técnica de película nutritiva.

Conclusiones

La agro-nanotecnología permite mejorar la calidad y cantidad de alimentos. Las SeNP pueden ser utilizadas para fortificar alimentos. La hidroponía como método de cultivo es una alternativa sostenible para la producción de alimentos, principalmente en áreas urbanas o regiones con escasez de territorios agrícolas. La combinación de la tecnología con la agricultura representa una oportunidad para mejorar el control de plagas y enfermedades en los cultivos, así como también incrementar la eficiencia en el uso de recursos y en la aportación de nutrientes.

Perspectivas

- La integración de la agro-nanotecnología debe incrementar en el corto plazo el aprovechamiento de recursos y la administración eficiente de nutrientes en la producción de alimentos.
- A través de los sistemas hidropónicos y agro-nanotecnología se podrá producir y abastecer de alimentos regiones con pobreza extrema. Se espera que esta tecnología pueda contribuir como alternativa para abordar los desafíos relacionados al crecimiento exponencial de la población mundial.

Agradecimientos

Alejandra Jarero Hernández agradece al CIBNOR por la estancia para realizar su Tesis de licenciatura. Luis Hernández Adame agradece al proyecto Coscyt_CAR_25_2024.



Referencias

- Bano, I., S. Skalickova, H. Sajjad, J. Skladanka y P. Horky. 2021. *Uses of selenium nanoparticles in the plant production*. Agronomy, 11(11):2229. <https://doi.org/10.3390/agronomy11112229>.
- Hernández-Hernández, M., J. León-Morales, Y. López-Bibiano, W.D. Saldaña-Sánchez, y S. García-Morales. 2018. *Efecto comparativo de selenito y selenato en el crecimiento y contenido de pigmentos fotosintéticos en plantas de pimiento*. Biotecnología y Sustentabilidad, 3(2):26-37. <https://doi.org/10.57737/biotecnologiaysust.v3i2.489>.
- Nasrollahzadeh, M., S.M, Sajadi, M. Sajjadi, y Z. Issaabadi. 2019. *An introduction to nanotechnology*. En: Nasrollahzadeh, M., S.M, Sajadi, M. Sajjadi, y Z. Issaabadi. (Eds.) Interface Cience and Technology. 28:1-27. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-813586-0.00001-8>.
- Peñaloza, H.E. 2017. *El selenio en la planta y en los suelos del sur de Chile*. Revista Phloem. <https://phloem.cl/el-selenio-en-la-planta-y-en-los-suelos-del-sur-de-chile/>

Semblanza de los autores

- **Alejandra Jarero Hernández** es Ingeniera Química y actualmente cursa una Maestría en Agroplasticultura en Centro de Investigación en Química Aplicada (CIQA). Su formación le ha permitido integrar conocimientos de procesos químicos con prácticas agrícolas sustentables. Ha colaborado en proyectos enfocados en el manejo eficiente de recursos en sistemas de producción. Le interesa la innovación en tecnologías aplicadas al agro, especialmente en fertirrigación y uso de plásticos agrícolas.
- **Dr. Luis Hernández Adame** tiene doctorado en Ingeniería y Ciencia de Materiales egresado de la Universidad Autónoma de San Luis Potosí, México. Actualmente es Investigador SECIHTI adscrito al Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste (CIBNOR) con sede en La Paz, BCS. Sus líneas de investigación se enfocan en el desarrollo de materiales avanzados para la fabricación de biosensores, bioacarreadores, nanofertilizantes y sistemas de bio - control. Es miembro del Sistema Nacional de Investigadores en México nivel 2.

- **Dra. Paola Magallón Servín** es Investigadora Titular A del Programa de Acuacultura del CIBNOR y Coordinadora del Programa de Acercamiento a la Ciencia y la Educación (PACE). Bióloga Marina por la UABCS, Maestra en Ciencias por el CIBNOR y Doctora en Microbiología Agroalimentaria por la Universidad Laval (Canadá). SNI Nivel I, ex Investigadora por México e investigadora adscrita al CIBNOR desde el Programa. Su trabajo se centra en el desarrollo de sistemas agroacuícolas multitróficos e integrados, con un enfoque en la bioseguridad, la eficiencia ecológica y la sostenibilidad.
- **Dr. Luis Guillermo Hernández Montiel** es Doctor en Ciencias en el Uso, Manejo y Preservación de los Recursos Naturales del Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste (CIBNOR). Sus líneas de investigación son: fitopatología molecular, microbiología, biocontrol de enfermedades vegetales y sistema inmune de plantas. Es nivel 3 del Sistema Nacional de Investigadoras e Investigadores (SNII) de la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI).

Cita

Jaleo Hernández, A., L. Hernández Adame, P. Magallón Servín y L.G. Hernández Montiel. Nanopartículas de selenio en sistemas hidropónicos como estrategia para la fortificación vegetal. Recursos Naturales y Sociedad, 2025. Vol. 11 (3): 297-307. <https://doi.org/10.18846/renaysoc.2025.11.11.03.0017>.

Sometido: 14 de mayo de 2025

Aceptado: 6 de noviembre de 2025

Editor asociado: Dr. Arturo Sánchez Paz

Editor ejecutivo: Dr. Arturo Sánchez Paz

Diseño gráfico editorial: Ing. Francisca Elizabeth Villegas Carrazco

Effects of massive and homeopathic doses of caffeine on living organisms, and their level of social awareness in La Paz, Mexico

Efectos de dosis masivas y homeopáticas de cafeína en organismos vivos, y su nivel de conocimiento social en La Paz, México

Alexander Lopeztegui-Castillo¹, Guadalupe Fabiola Arcos-Ortega¹,
Elizabeth M. Zavala-García², José Manuel Mazón-Suástegui^{1*}

Resumen

La cafeína es un antioxidante alcaloide estimulante del sistema nervioso central, con un efecto dual en seres humanos y animales. En cantidad moderada, e incluso en dosis medicinal homeopática ofrece beneficios al ser humano, pero su consumo excesivo genera varias reacciones adversas. Debido a múltiples factores antropogénicos, la presencia de cafeína se ha incrementado progresivamente en diversos ambientes y regiones del planeta y actualmente es considerada un contaminante emergente pseudopersistente que puede impactar negativamente los ecosistemas acuáticos, a diferentes niveles. Considerando que éste es un tema poco difundido, el objetivo de esta revisión es divulgar la información científica y el conocimiento popular disponibles, esperando beneficios para la comunidad local (La Paz, MX), que podría modular su consumo y hacer un adecuado desecho de los productos que la contienen. Se revisó literatura de sitios especializados como Elsevier y ScienceDirect, y se aplicó una encuesta que permitió identificar temas poco conocidos por la ciudadanía: (1) principales productos que contienen cafeína; (2) presencia de cafeína, como contaminante emergente en organismos acuáticos y principales efectos nocivos asociados; (3) uso benéfico de la cafeína y aprovechamiento de subproductos ensilados; y (4) estrategias y buenas prácticas para minimizar sus impactos. Finalmente, se muestra evidencia científica experimental desarrollada en el CIBNOR, sobre los efectos positivos que tiene la aplicación del medicamento homeopático *Coffea cruda*, de uso en humanos, para reducir los efectos nocivos de la cafeína en el camarón blanco *Penaeus vannamei*.

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

² Universidad Mundial, Blvd. Mariano Abasolo, La Paz, B.C.S., México.

* Autor de correspondencia: jmazon04@cibnor.mx ORCID: 0000-0003-4074-1180



Palabras clave: Fauna acuática, acuicultura, contaminación ambiental, contaminantes emergentes, café

Abstract

Caffeine is an alkaloid antioxidant that stimulates the central nervous system, with a dual effect on humans and animals. In moderate amounts and even in homeopathic medicinal doses, it offers benefits to humans, but excessive consumption generates several adverse reactions. Due to multiple anthropogenic factors, the presence of caffeine has progressively increased in various environments and regions of the planet. It is currently considered an emerging pseudo-persistent contaminant that can negatively impact aquatic ecosystems, at levels that vary by region. Considering that this is a little-known topic, the objective of this review is to disseminate available scientific information and popular knowledge, hoping to benefit the local community (La Paz, MX), which could regulate its consumption and make appropriate use of the waste from products containing it. Literature from specialized sites such as Elsevier and ScienceDirect was reviewed, and a survey was applied to identify topics that are little known by the public: (1) main products containing caffeine; (2) the presence of caffeine as an emerging contaminant in aquatic organisms and its associated harmful effects; (3) the beneficial use of caffeine and utilization of silage by-products; and (4) strategies and best practices to minimize its impacts. Finally, experimental scientific evidence developed at CIBNOR is presented on the positive effects of the application of the homeopathic medicine *Coffea cruda*, for human use, in reducing the harmful effects of caffeine on the white shrimp *Penaeus vannamei*.

Keywords: Aquatic fauna, aquaculture, environmental pollution, emerging contaminants, coffee

¿Qué es la cafeína?

La cafeína es una sustancia de origen vegetal y componente natural en los arbustos de café, con una elevada concentración en granos y hojas. Sin embargo, también está presente en plantas de té, guaraná y yerba mate, por lo que ocasionalmente se le dice teína, guaranina o mateína, pero en realidad es la misma sustancia y también está presente en nueces de cola y vainas de cacao (Veracruz-Dólera et al., 2022). Químicamente se denomina “1,3,7-trimetilxantina” y se considera un alcaloide con importantes efectos antioxidantes y una intensa acción fisiológica en humanos y

animales (Weinberg y Bealer, 2012). Se metaboliza en el hígado mediante un complejo sistema enzimático y se descompone en otros alcaloides (paraxantina, teobromina, y teofilina) que tienen a su vez importantes efectos fisiológicos, benéficos o nocivos, conforme a la cantidad consumida (Fredholm *et al.*, 1999; Nehlig, 2018).

¿Hay contaminación ambiental por cafeína?

El incremento de la concentración ambiental de cafeína y sus metabolitos derivados se debe en buena medida al consumo humano de productos alimentarios, cosméticos, farmacéuticos y herbolarios que la contienen de manera natural o que son incorporados mediante procesos industriales. La producción creciente de estos productos se debe a su demanda cada vez mayor, asociada al crecimiento demográfico, la urbanización y la industrialización (Picinini-Zambelli *et al.*, 2025; Trombini *et al.*, 2019).

La contaminación ambiental por cafeína es un problema mundial que implica tanto a productores como a consumidores de productos cuya industrialización genera desechos, ya que a nivel mundial son escasas las plantas de tratamiento de aguas residuales que sean 100% eficientes para su eliminación (Jiang *et al.*, 2024; Picinini-Zambelli *et al.*, 2025).

Por lo antes expuesto, el presente trabajo tiene el propósito de proveer información a la sociedad nacional y local de La Paz, que ayude a (a) identificar los productos que contienen cafeína para modular su consumo, (b) enfatizar que este alcaloide tiene un efecto dual positivo-negativo en función de la dosis, (c) que su acumulación en localidades específicas podría tener efectos nocivos en el ambiente, y (d) dar difusión a las investigaciones novedosas del CIBNOR sobre los efectos positivos de algunos medicamentos homeopáticos de uso humano en la acuicultura, incluyendo a *Coffea cruda*, elaborado a partir de granos de café sin tostar, para reducir los efectos nocivos de la cafeína en camarón blanco *Penaeus vannamei*.

Efectos positivos y negativos de la cafeína en seres humanos

Las propiedades antioxidantes del café, estrechamente ligadas a sus efectos positivos en la salud humana, no son sólo responsabilidad de la cafeína sino de otros compuestos como los ácidos cafeico, sinápico, ferúlico, y p-cumárico (Benoit *et al.*, 2007; Grosso *et al.*, 2017). Comúnmente, estos ácidos se encuentran en las células vegetales y su consumo es beneficioso para la salud humana. Además del café, otros alimentos como manzanas, peras y berenjenas contienen ácidos clorogénicos cuya ingestión es benéfica.



Debido a la relevancia del tema, que comprende aspectos directamente relacionados con la alimentación y la atención médica especializada a la población, se resumieron los principales impactos positivos y negativos que evidencian el efecto dual de la cafeína en los seres humanos. Diversos estudios han demostrado que tanto la dosis como la hora y forma de consumo modulan los efectos de la cafeína sobre el cuerpo humano y la realización de ejercicio físico (García-Moreno, 2016). La difusión social de esta información puede favorecer un consumo popular responsable de aquellos productos que contienen dosis masivas ("superiores a 0.1 mg/L o 0.1 mg/ g") de cafeína. Por este motivo, a partir de los datos publicados por Ramírez-Montes y Osorio (2013), se elaboró una síntesis de los principales efectos de la cafeína en los seres humanos (Tabla 1).

Tabla 1. Principales efectos, positivos y negativos, del consumo moderado de dosis masivas (0.1 mg <) de cafeína en humanos de varias regiones geográficas del mundo (Modificado de Ramírez-Montes y Osorio, 2013).

Efectos positivos del consumo moderado de cafeína en la salud humana	Referencias bibliográficas
Incrementa actividad de las enzimas que regulan la presión arterial	Robertson <i>et al.</i> , 1978
Incrementa actividad lipolítica y ahorra glucógeno	Erickson <i>et al.</i> , 1987
Posterga la fatiga posterior al ejercicio físico	Anselme <i>et al.</i> , 1992
Aumenta sensibilidad del centro respiratorio al CO ₂	Sawynok y Yaksh, 1993
Efecto antidepresivo y aumenta el estado de alerta	Fredholm <i>et al.</i> , 1999
Efecto protector de las células del cerebro (neuronas)	Fredholm <i>et al.</i> , 1999
Adyuvante analgésico	Bell y McLellan, 2002
Efecto diurético leve	Maughan y Griffin, 2003
Aumenta la presión arterial y disminuye la frecuencia cardíaca	Seifert <i>et al.</i> , 2011
Previene la acumulación de grasa en las células (anticelulítico); disminuye el enrojecimiento y las zonas oscuras en la piel	Herman y Herman, 2013
Mejora la memoria espacial y la actividad de enzimas antioxidantes	Gil <i>et al.</i> , 2017
Mejor desempeño muscular durante el ejercicio aeróbico	Grgic <i>et al.</i> , 2020
Estimula secreción gástrica y de enzimas digestivas	Katzung y Vanderah, 2024
Mejora el desarrollo cognitivo y las funciones mentales	Thanawala <i>et al.</i> , 2024

Disminuye el riesgo de infartos cardíacos y mejora la función y estructura de las cavidades del corazón (aurículas y ventrículos)	Zheng <i>et al.</i> , 2024
Disminuye el consumo de opioides en pacientes operados de escoliosis	Stuedemann <i>et al.</i> , 2025
Efectos negativos del consumo excesivo de cafeína en la salud humana	
Ataques de pánico	Klein <i>et al.</i> , 1991
Insomnio y ansiedad, nerviosismo, palpitaciones, temblores, taquicardia, alcalosis respiratoria, crisis de angustia.	Juliano y Griffiths, 2004
Gastritis, úlcera péptica, reflujo gastroesofágico, esofaguitis erosiva	Juliano y Griffiths, 2004
Hipertensión arterial (en dosis elevadas o personas no habituadas)	Karatzis <i>et al.</i> , 2005
Psicosis aguda	Cauli y Morelli, 2005
Cefalea, irritabilidad, hiperreflexia, espasmos musculares	Ribeiro y Sebastiao, 2010
Arritmia cardíaca en función del tipo de café, dosis, y hábito de consumo	Zheng <i>et al.</i> , 2024

El consumo de cafeína (cantidades y frecuencia de ingestión) varía en dependencia de numerosos factores como la edad, el entorno social, los hábitos alimenticios, el estado nutricional, el sexo, la formación cultural e incluso la personalidad (Doepker *et al.* 2016; Frary *et al.* 2005). Estos factores varían de una región a otra, e incluso dentro de un mismo país. Por este motivo, aunque el café se considera una bebida universal, los aspectos relacionados con su consumo y efectos son considerablemente variables y deben analizarse también de manera local.

A pesar de que existe variabilidad a nivel global, entre el 80% y el 90% de las personas adultas son consumidores habituales de cafeína, ingiriendo entre 200 y 250 mg diarios (Doepker *et al.* 2016; Frary *et al.* 2005). Estas cantidades son inferiores a la dosis diaria máxima sugerida (400 mg) para personas adultas saludables y sin riesgo previsible de daños (Vester y Koenig, 2018). En Estados Unidos de América, el mayor consumo diario de cafeína corresponde a personas de 50 a 64 años (246 ± 4.5 mg de cafeína), pero el consumo total integrando todos los rangos de edades, puede alcanzar los 520



mg por día, e incluso niños de 2 a 5 años consumen diariamente 42 ± 2.4 mg de cafeína (Mitchell et al., 2025).

En personas tanto sanas como enfermas la cafeína tiene efectos relevantes que han sido convenientemente aprovechados en diversos sectores del desempeño social en materia de salud, nutrición, educación y actividades deportivas. Generalmente, el consumo moderado (menos de 400 mg diarios) de cafeína se asume como positivo y ha sido relacionado con un menor riesgo de muerte por accidente cardiovascular o por cáncer (Peñaloza et al., 2020; Wee, 2022).

La cafeína incrementa los períodos de vigilia y actividad, numerosos estudios concluyen que en dosis moderada mejora el rendimiento del cuerpo y su capacidad de recuperación ante el ejercicio físico, siendo mayor en individuos no entrenados que en individuos entrenados, y usualmente más notorio durante ejercicios que involucran al metabolismo aeróbico (Grgic et al., 2020; Ramírez-Montes y Osorio, 2013). Sin embargo, el consumidor no siempre está consciente de que puede consumirla incluso en goma de mascar (chicle), donde su absorción es rápida porque comienza en la mucosa oral (Kamimori et al., 2002). El contenido de cafeína en gomas de mascar generalmente varía entre 10 mg (equivalente a una taza pequeña de café ligero) y 300 mg (equivalente a dos expreso dobles en su preparación más concentrada) por pieza (Chia-Cheng et al., 2024). Numerosos efectos positivos han sido médicamente atribuidos al consumo moderado de chicles con cafeína, no obstante, varios efectos nocivos se reportan en casos de consumo excesivo (Chia-Cheng et al., 2024; Natale et al., 2009; Smith, 2009, 2021).

De modo similar a como lo hacen los factores que influyen en el consumo de cafeína, los que influyen en su impacto en los seres humanos son altamente variables a nivel local y regional. Algunos factores que influyen en los efectos de la cafeína en el organismo humano son la edad, peso corporal, enfermedades crónicas y eventuales, embarazo, tabaquismo, condición física (obesidad, desnutrición, sedentarismo o ejercicio habitual), consumo combinado con otros alimentos y bebidas (principalmente alcohólicas), y finalmente las predisposiciones genéticas (Nehlig, 2018). A partir de la información consultada, se comprobó que, en países como Estados Unidos de América, Canadá, Austria, Australia y Reino Unido, se han establecido dosis óptimas para el consumo sin riesgo por rango de edad y sexo, con valores regionales diferentes (Doepker et al. 2016; Mitchell et al., 2025). Esto sugiere que, en México, estudios similares deberían abordarse de manera local y regional para generar datos y valores promedio ponderados acordes con la situación nacional.

Nivel de conocimiento: necesidad de capacitación en sectores comunitarios

La información generada a partir de una encuesta en línea (analizada y distribuida mediante las herramientas de Google) realizada de forma anónima a 109 personas de la comunidad de La Paz, BCS, permitió identificar los sectores de la población que requieren de mayor instrucción. Debido a que la encuesta aplicada incluyó una combinación de preguntas abiertas, cerradas, de opción múltiple y demográficas, fue posible identificar cuáles de los temas abordados deben ser más estudiados y divulgados a nivel comunitario. El 73.4% de las personas encuestadas fueron mujeres, por lo que la población masculina pudo haber sido minimizada. La mayoría de los encuestados fueron jóvenes de 15 a 25 años (Fig. 1A) con nivel universitario (Fig. 1B), que toman café sólo una vez al día (Fig. 1C), e iniciaron su consumo antes de los 15 años (Fig. 1D).

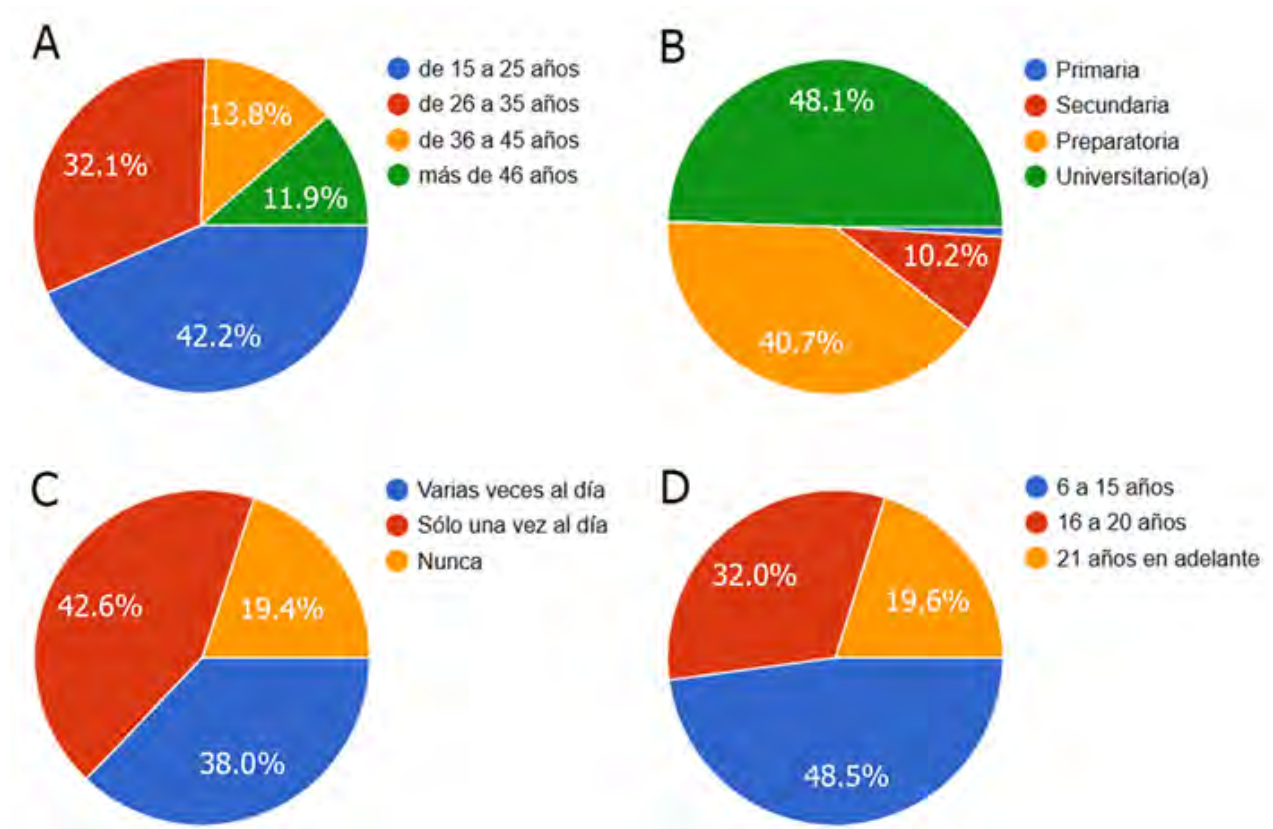


Figura 1. Grupo etario (A), nivel escolar (B), frecuencia (C) y edad de inicio (D) en el consumo de café, conformado a partir del criterio de 109 personas de la población de La Paz, B.C.S., México.

El 81% de la población encuestada sabe que la cafeína es psicoactiva y estimulante del sistema nervioso central, y que está contenida en algunas plantas. Sin embargo, el mayor porcentaje de respuestas incorrectas con respecto a la cafeína fue su potencial como contaminante emergente para los organismos acuáticos (Fig. 2A y B), y con respecto al consumo de cafeína al ingerir té o café descafeinado (Fig. 2C y D).

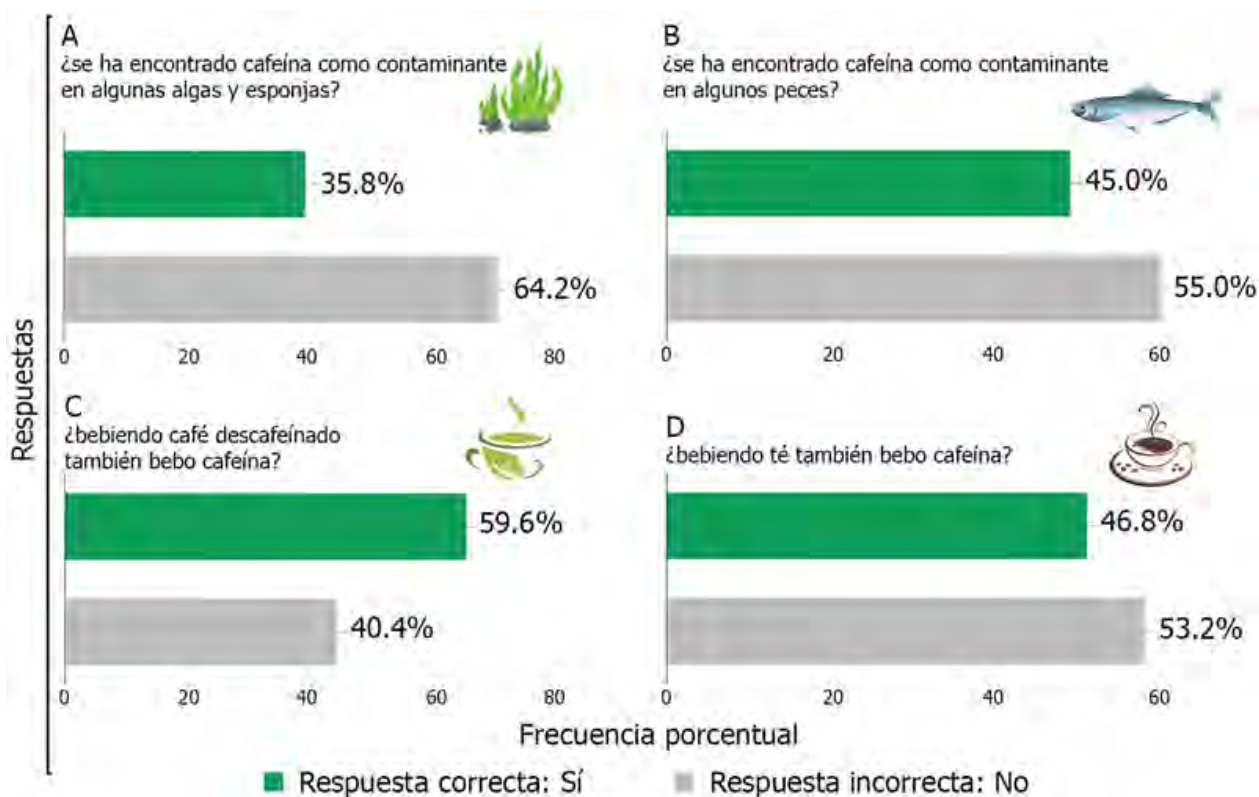


Figura 2. Temáticas en las que hubo una mayor frecuencia de respuestas incorrectas entre las 109 personas encuestadas. A partir de esta información, se identificaron los aspectos sobre los que hay que aumentar la divulgación de la información existente. A y B: contaminación por cafeína en organismos acuáticos; C y D: contenido de cafeína en bebidas de consumo frecuente.

Un pequeño porcentaje (menos del 10%) de los encuestados desconoce que algunos medicamentos contienen cafeína, lo que podría derivar en su consumo “no consentido”. Sin embargo, una fracción importante (48.6%) desconoce que algunos productos cosméticos contienen cafeína. Adicionalmente, se observó un impacto positivo inmediato de la encuesta relativo al interés de las personas en las problemáticas formuladas y sus preguntas asociadas. La necesidad de reafirmación y validación del conocimiento, producto de una autoestima no deformada y en satisfactorio crecimiento, motivó a numerosas personas a buscar “la información correcta”, al concluir la encuesta. Esto constituye *per se*, un aumento en el nivel de instrucción de la comunidad.

Con base en estos resultados y con el apoyo de la investigación documental, se identificaron cuatro temas relevantes para la población que podrían incrementar su nivel de instrucción sobre los efectos benéficos y perjudiciales de la cafeína: 1.- Principales productos que contienen cafeína (bebidas y alimentos); 2.- Presencia de cafeína, como contaminante emergente, en organismos acuáticos y principales efectos nocivos asociados; 3.- Uso benéfico de la cafeína en dosis adecuadas y aprovechamiento de subproductos ensilados como insumos nutritivos para el sector

acuícola y agropecuario, y 4.- Estrategias y buenas prácticas para minimizar impactos de la cafeína en ecosistemas y organismos acuáticos, incluyendo la aplicación de medicamentos homeopáticos de uso humano, como *Coffea cruda*, para reducir sus efectos tóxicos en el camarón blanco *P. vannamei*.

1-. Principales productos que contienen cafeína

La información consultada confirma que la cafeína es consumida deliberadamente por la población mundial y también por la población local. Es importante mencionar, que a diferencia de fármacos como la carbamazepina, el paracetamol, el ibuprofeno o el diclofenaco, considerados también contaminantes emergentes y cuyo consumo se limita al tratamiento médico, el consumo de cafeína no está restringido a la prescripción médica. A pesar de las normativas y exigencias respecto al etiquetado de los productos comerciales, en numerosas ocasiones dichas etiquetas no contienen toda la información necesaria o no son leídas o bien interpretadas por los consumidores, de manera que la cafeína es frecuentemente ingerida sin el conocimiento y/o consentimiento.

A pesar de que el café, el té y los refrescos se reportan como las principales fuentes de la cafeína ingerida por la población de algunos países de Europa (Verster y Koenig, 2018), la variedad de alimentos y bebidas que la contienen es mayor. Por esto, se consideró pertinente presentar la síntesis de un sondeo en comercios locales (La Paz, MX) sobre productos con cafeína, altamente demandados por la población regional (Tabla 2).



Tabla 2. Productos comerciales de alta demanda en el mercado regional, con su respectivo contenido de cafeína acorde a las cantidades de referencia. Fuente: Autoría propia con verificación en locales comerciales de venta al público, en La Paz, B.C.S., México.

Líquidos			
Tipo de bebida	Denominación del producto comercial	Contenido declarado en el producto comercial (mg/unidad)	Contenido neto de cafeína (mg/mL)
Refresco	Pepsi Black	11.4/100	0.114
Refresco	Pepsi Cola	38.0/355	0.107
Refresco	Pepsi Kick	93.3/500	0.187
Refresco	Pepsi Light	10.4/100	0.104
Refresco	Sunkist naranja	5.1/100	0.051
Refresco	Red Cola	8.2/100	0.082
Refresco	Red Cola Light	8.5/100	0.085
Refresco	Coca Cola con Café	69.0/355	0.194
Refresco	Coca Cola original	9.4/100	0.094
Refresco	Coca Cola	34.0/355	0.096
Refresco	Coca Cola Light	12.4/100	0.124
Refresco	Coca Cola Energy	115.4/355	0.325
Refresco	Dr. Pepper Light	10.9/100	0.109
Refresco	Dr. Pepper uva	11.2/100	0.112
Bebida energética	Monster	160.0/473	0.338
Bebida energética	Red Bull	80.0/250	0.320
Bebida energética	Vive100%GinsengCitrus	96.1/500	0.192
Bebida energética	AmperEnergy OntheGo	95.5/473	0.202
Infusión	Café americano	95-200/250	0.800
Infusión	Café descafeinado	2-12/250	0.048
Infusión	Café instantáneo	27-173/250	0.692
Infusión	Café con leche	63-175/250	0.700
Infusión	Café expreso	100-150/60	2.500
Infusión	Expreso descafeinado	20-30/60	0.500
Infusión	Crema Irlandesa	70/250	0.280
Infusión	Cappuccino	96/250	0.384
Infusión	Té negro	5/250	0.020
Licuada	Chocolate con leche	5-10/250	0.040
Sólidos			
Chocolates	Denominación del producto comercial	Contenido declarado en el	Contenido neto de

		producto comercial (mg/100g)	cafeína (mg/g)
Chocolate negro (45-59% cacao)	SR Legacy	43	0.430
Chocolate negro (70-85% cacao)	SR Legacy	71-107	1.070
Chocolate negro (>90% cacao)	SR Legacy	125-195	1.950
Crunch Nestlé	SR Legacy	156	1.560
Kit Kat	SR Legacy	100	1.000
Té negro	FOUR O ´CLOCK	1870	18.700
Té verde descafeinado	BIGELOW	250	2.500
Te sin cafeína	ALESSA Peppermint	20	0.200
Café 100% puro soluble	Ke! Precio	4300	43.000
Café 100% puro soluble	Oro 24 Kilates	4200	42.000
Café 100% puro soluble	Great Value	4000	40.000
Café 100% puro soluble	Jacobs Gourmet	3500	35.000
Café 100% puro soluble	Cafiver negro	3500	35.000

2-. Presencia de cafeína en organismos acuáticos

Se ha reportado contaminación por cafeína en varias especies acuáticas residentes en su hábitat natural (Fig. 3), estableciendo que tejidos como glándula digestiva, branquias, intestino y músculo, tienen un alto riesgo de afectación por su toxicidad (Ojemaye y Petrik, 2019). Sin embargo, no se han determinado sus efectos sobre el comportamiento y la fisiología de los organismos en los que se ha encontrado (Vieira *et al.*, 2022). El estudio de los efectos negativos de la cafeína en el desempeño fisiológico de organismos acuáticos requiere del control estricto de un amplio grupo de variables y situaciones, que sólo se consigue en ambiente controlado de laboratorio. Usualmente, tales estudios se realizan con especies cuyas características biológicas facilitan su adaptación y manejo en cautiverio, y no necesariamente con las especies más importantes para el ecosistema.



Figura 3. Organismos acuáticos en los que se ha reportado contaminación por cafeína a partir de estudios en el hábitat natural (cantidades reportadas en peso seco a partir de lo referido en Vieira et al., 2022).

2.1-. Efectos negativos de la cafeína en organismos acuáticos

Las referencias bibliográficas consultadas corroboran que, entre los organismos acuáticos más estudiados en lo que respecta a los efectos tóxicos de la cafeína, se encuentran los moluscos bivalvos (5 especies) y los peces (6 especies), ambos con representantes tanto marinos como dulceacuícolas. Aunque los efectos nocivos de la cafeína se han determinado también en crustáceos (6 especies) y poliquetos (3 especies), el número de estudios en bivalvos y peces duplica los realizados en otros grupos biológicos (Tabla 3). Entre los bivalvos más estudiados destacan los mejillones marinos del género *Mytilus*, la almeja dulceacuícola *Corbicula fluminea*, y el mejillón de agua dulce *Elliptio complanata* (Afsa et al., 2023). El mayor número de estudios realizados en peces corresponde al pez cebra de agua dulce *Danio rerio*. Entre los efectos que con mayor frecuencia se describen en organismos acuáticos con exposición a cafeína, se incluyen cambios conductuales, morfométricos, histológicos y bioquímicos (Tabla 3).

Tabla 3. Efectos negativos de la cafeína en especies acuáticas estudiadas en ambiente controlado de laboratorio. Fuente: Referencias citadas.

Grupo	Especie	Principales impactos	Referencias
Cnidarios	<i>Hydra (attenuata)</i> <i>thomsoni</i>	Impactos no significativos o estadísticamente no detectables. Disminuye adhesiones corporales a 25 mg/L y las aumenta a 50 mg/L	Quinn <i>et al.</i> , 2008
Miroalgas	<i>Isochrysis galbana</i>	Inhibición del crecimiento	Aguirre-Martínez <i>et al.</i> , 2015
Moluscos bivalvos	<i>Ruditapes philippinarum</i>	Aumento de la actividad metabólica y el flujo de cargas eléctricas en las células. Reducción de la estabilidad de la membrana de los lisosomas. Inducción de estrés oxidativo y activación de los mecanismos para desintoxicar. Neurotoxicidad (afectación de las células del sistema nervioso)	Aguirre-Martínez <i>et al.</i> , 2016; Cruz <i>et al.</i> , 2016; Maranhão <i>et al.</i> , 2015b; Trombini <i>et al.</i> , 2019
Moluscos bivalvos	<i>Mytilus californianus</i>	Desregulación génica y problemas en la expresión de proteínas vinculadas a la mejor tolerancia térmica y asimilación de condiciones de estrés	Del Rey <i>et al.</i> , 2011
Moluscos bivalvos	<i>Mytilus galloprovincialis</i>	Incremento en la actividad en la actividad de enzimas que evidencian estrés oxidativo. Reducción de la estabilidad de la membrana de los lisosomas. Reducción del conteo total de hemocitos. Incremento del volumen y el diámetro de los hemocitos. Infiltración hemocítica, inducción de estrés oxidativo y neurotoxicidad	Afsa <i>et al.</i> , 2023; Capolupo <i>et al.</i> , 2016; De Marco <i>et al.</i> , 2022; Impellitteri <i>et al.</i> , 2023; Munari <i>et al.</i> , 2020
Moluscos bivalvos	<i>Corbicula fluminea</i>	Incremento en el gasto energético y en la actividad de enzimas que evidencian estrés oxidativo. Cambios en la estabilidad de la membrana lisosomal y alteraciones en el ADN	Aguirre-Martínez <i>et al.</i> , 2015; Aguirre-Martínez <i>et al.</i> , 2018



Moluscos bivalvos	<i>Elliptio complanata</i>	Inducción de estrés oxidativo y alteraciones en el ADN. Peroxidación lipídica, inducción de la actividad fagocítica e inhibición de la adherencia celular	Gagné et al., 2007; Martín-Díaz et al., 2009
Gusanos poliquetos	<i>Diopatra neapolitana</i>	Mortalidad y estrés oxidativo inferido a partir de cambios en la actividad de enzimas como superóxido dismutasa (SOD), catalasa (CAT), y glutatión S transferasa (GST). Pérdida de la capacidad de regeneración	Pires et al., 2016 a, c
Gusanos poliquetos	<i>Arenicola marina</i>	Mortalidad y estrés oxidativo inferido a partir de cambios en los niveles de SOD, CAT, y GST	Pires et al., 2016a
Gusanos poliquetos	<i>Hediste diversicolor</i>	Mortalidad y estrés oxidativo inferido a partir de cambios en los niveles de SOD, CAT, y GST. Peroxidación lipídica	Pires et al., 2016b
Equinodermos	<i>Paracentrotus lividus</i>	Trastornos en la reproducción	Aguirre-Martínez et al., 2015
Crustaceos	<i>Ampelisca brevicornis</i>	Alteraciones en el ADN	Maranho et al., 2015a
Crustaceos	<i>Palaemonetes pugio</i>	Trastornos en la reproducción	García et al., 2014
Crustaceos	<i>Carcinus maenas</i>	Estrés oxidativo, pérdidas en la estabilidad de la membrana de los lisosomas, peroxidación lipídica	Aguirre-Martínez et al., 2013
Crustaceos	<i>Daphnia magna</i>	Mortalidad. Establecimiento de la concentración letal media (48hLC ₅₀ = 445.3 mg/L). Variaciones en la expresión (regulación) de los genes vitales para la reproducción, la función sanguínea y el metabolismo. Trastornos en los procesos de selección de hábitats	Hyuck-Bang et al., 2015; Pilar-González et al., 2025

Crustaceos	<i>Artemia salina</i>	Establecimiento de la concentración letal media (LC_{50} = 334.04 ppm)	Barrera y Suárez, 2007
Crustaceos	<i>Ceriodaphnia dubia</i>	Mortalidad. Establecimiento de concentración letal media ($48hLC_{50}$ = 60 mg/L). Trastornos en la reproducción	Moore <i>et al.</i> , 2008
Peces	<i>Danio rerio</i>	Edema y alteraciones en la morfología y locomoción de huevos y larvas. Deterioro de la función cognitiva durante la abstinencia. Cambios en la actividad motora y ansiedad, evidenciando un impacto en la actividad cerebral. Afectaciones en el metabolismo y disminución del peso y la tasa de crecimiento. Inducción de comportamiento agresivo y pérdida de la sociabilidad	Diogo <i>et al.</i> , 2023; Félix <i>et al.</i> , 2021; Nazario <i>et al.</i> , 2015; Neri <i>et al.</i> , 2019; Santos <i>et al.</i> , 2016, 2017; Santos <i>et al.</i> , 2023; Wang <i>et al.</i> , 2024
Peces	<i>Pimephales promelas</i>	Mortalidad. Establecimiento de concentración letal media ($48hLC_{50}$ = 100 mg/L). Inhibición del crecimiento. Trastornos hepáticos y ansiedad	Bikker <i>et al.</i> , 2024; Moore <i>et al.</i> , 2008
Peces	<i>Cyprinus carpio</i>	Alteración irreversible (efecto teratogénico) en el desarrollo embrionario. Edema pericárdico y malformaciones en los embriones. Estrés oxidativo y desregulación génica	Casas-Hinojosa <i>et al.</i> , 2023
Peces	<i>Oncorhynchus mykiss</i>	Activación del metabolismo oxidativo y peroxidación lipídica	Gagné <i>et al.</i> , 2006
Peces	<i>Astyanax altiparanae</i>	Peroxidación lipídica en tejido hepático. En combinación con el diclofenaco inhibe la actividad de SOD y de GST	Muñoz-Peñuela <i>et al.</i> , 2021
Peces	<i>Rhamdia quelen</i>	Deformación esquelética de las larvas e inhibición del crecimiento	Dos Santos <i>et al.</i> , 2022



3-. Beneficios naturales de la cafeína y aprovechamiento de subproductos ensilados como insumos nutritivos para la industria acuícola y agropecuaria

Es importante mencionar que la cafeína tiene un impacto positivo en la polinización natural, debido a que crea “memoria o adicción” en insectos polinizadores como las abejas, y propicia su rápido regreso una vez visitada por primera vez la flor del cafeto (Arnold *et al.*, 2021; Wright *et al.*, 2013). Por otro lado, se sabe que la cafeína protege a la planta que la contiene debido a su toxicidad y concentración en sus hojas que repele a los herbívoros, inhibe la capacidad reproductiva de algunas especies depredadoras, y al caer las hojas elimina algunos patógenos del suelo, e incluso impide la germinación de especies competidoras, contribuyendo a mantener alejados a varios organismos dañinos (Denoeud *et al.*, 2014; Yun-Soo *et al.*, 2006).

No fue posible presentar una tabla resumiendo “los efectos positivos de la cafeína en los organismos acuáticos”, porque la literatura existente al respecto es en extremo reducida. Este es un tópico sobre el que deben profundizarse las investigaciones, haciendo énfasis en especies de interés para la industria acuícola nacional, como el camarón blanco *P. vannamei*. Relativo a los efectos positivos en especies dulceacuícolas como el pez cebra *D. rerio*, se ha descrito que concentraciones de hasta 10 mg/L de cafeína, inducen una mejora en el aprendizaje y un aumento en las funciones de memoria y capacidad de concentración (Ruiz-Oliveira *et al.*, 2019). Previamente, Nazario *et al.* (2015) reportaron que el tratamiento preventivo con bajas dosis de cafeína contribuye a atenuar el efecto nocivo del cannabidiol en los procesos cognitivos y la conducta del pez cebra.

Con respecto al empleo de subproductos, se encontró documentación sobre el empleo de pulpa de café, y por tanto de su contenido de cafeína, como suplemento dietético para el cultivo de peces dulceacuícolas de interés comercial. La pulpa de café contiene altos valores de proteína cruda y bajos niveles de taninos y de extracto libre de nitrógeno (Noriega-Salazar *et al.*, 2008). Se mencionan resultados positivos de su utilización tanto en alevines como en adultos de tilapia (*Oreochromis aureus* y *O. niloticus*), y del híbrido resultante de la crucea de *Colossoma x Piaractus* (Bautista *et al.*, 1999a, 2005; Castillo *et al.*, 2002; García y Bayne, 1974; Moreau *et al.*, 2003).

La pulpa de café ensilada se ha utilizado también para la alimentación de distintos tipos de aves, obteniendo la mejor respuesta de energía metabolizable cuando se incluye un 5% de melaza (Acosta *et al.*, 1997; Romero *et al.*, 1995). Este producto ensilado se ha utilizado como componente de dietas para mantenimiento de conejos en fases de crecimiento y engorde, siendo factible una inclusión de hasta un 85% (Bautista *et al.*, 1999b). Igualmente, la pulpa de café ha sido valorada como componente dietético en la alimentación de ganado porcino, obteniendo mejoras en el factor de conversión del alimento y ganancia en peso cuando es administrada en proporción de hasta un 20%, mezclada con melaza (Bautista *et al.*, 1999c; Braham y Bressani, 1979). Finalmente, la pulpa de café ensilada constituye un aditivo en dietas formuladas para manutención de ganado porcino, ovino y bovino, con proporciones diferentes para animales destinados a la producción de leche o de carne (Noriega-Salazar *et al.*, 2008; Pinto-Ruiz *et al.*, 2017).

4-. Estrategias y buenas prácticas para minimizar los impactos de la cafeína en ecosistemas y organismos acuáticos

Actualmente, la presencia de cafeína como contaminante emergente en ecosistemas acuáticos es un tema de interés internacional y se han intensificado las investigaciones y revisiones exhaustivas sobre el tema (Picinini-Zambelli *et al.*, 2025; Vázquez-Tapia *et al.*, 2022; Vieira *et al.*, 2022). Igualmente, se han propuesto y evaluado diversas e ingeniosas soluciones para disminuir las concentraciones ambientales de cafeína del medio acuoso, incluyendo procesos de oxidación electroquímica con electrodos de grafito y PVC (Al-Qaim *et al.*, 2015; Raj *et al.*, 2021), con resultados alentadores.

En ese sentido, deben destacarse las soluciones basadas en el uso de productos naturales, como las propuestas por Torres-Castillo *et al.* (2021), acerca de la utilización de la cáscara del café, y de otros subproductos, como bio-absorbentes de la cafeína presente tanto en ecosistemas acuáticos como terrestres. Existen también otras soluciones basadas en la preparación de filtros de fibra vegetal natural para absorber la cafeína presente en las aguas residuales (Beltrame *et al.*, 2018; Francoeur *et al.*, 2021).

A pesar de la importancia comercial de moluscos y crustáceos marinos, son escasos los estudios que evalúan algún efecto positivo de la cafeína en el desempeño fisiológico y



productivo de estos grupos biológicos de importancia ecológica o productiva-comercial. En el escenario actual se ha conceptualizado justificadamente a la cafeína como un contaminante pseudopersistente (sustancia contaminante que, si bien se degrada con rapidez, su introducción continua y a altas tasas en el medio ambiente hace que parezca estar siempre presente). Esto significa que a nivel mundial se le considera una sustancia peligrosa cuya presencia constante, creciente y asociada a la actividad humana, ocasiona impactos negativos en la biota acuática. Esto enmascara la posibilidad de vislumbrar potenciales beneficios que podrían resultar de la aplicación de cafeína en dosis reguladas, a organismos marinos cuyo cultivo contribuye a la producción de alimentos para el ser humano.

En la sección siguiente se describen brevemente los resultados inéditos de investigaciones que actualmente se desarrollan en el Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste (CIBNOR-SECIHTI), La Paz B.C.S., México, que validan efectos positivos de la aplicación del medicamento homeopático *Coffea cruda* autorizado para uso humano por la Secretaría de Salud y supervisado por COFEPRIS, para atenuar los efectos tóxicos de la cafeína en especies de interés para la acuicultura.

4.1-. Evidencia científica experimental positiva desarrollada en CIBNOR

Con carácter innovador, desde hace más de 10 años se desarrolla en el CIBNOR investigación de frontera buscando desarrollar alternativas naturales, inocuas y eco-amigables, para mitigar los efectos negativos de diferentes patógenos y agentes ambientales estresantes en especies marinas de interés acuícola para México y principalmente para Baja California Sur. Entre las especies estudiadas se incluyen la almeja catarina y generosa, ostión de placer, ostión japonés, ostión americano y Kumamoto; mejillón nativo, pargo, jurel y camarón (Mazón-Suástegui et al., 2018).

Estas investigaciones de frontera se han enfocado a la aplicación profiláctica (preventiva) de medicamentos homeopáticos de uso humano, que son por definición “Compuestos Bioactivos Altamente Diluidos” (CBAD), también conocidos como “Highly-Diluted Bioactive Compounds” (HDBC) por sus siglas en inglés (García-Corona et al., 2024; López-Carvallo et al., 2022; Mazón-Suástegui et al., 2018, 2023, 2025). Los estudios experimentales

desarrollados en CIBNOR fueron diseñados para evaluar un medicamento que podría identificarse popularmente como “la cafeína homeopática” (*Coffea cruda* de Laboratorios Similia®; Farmacia Homeopática Nacional; CDMX), con una concentración de cafeína varios cientos de veces inferior a 0.1 mg/L, lo que a efectos de esta publicación se denominó como “dosis homeopáticas”. Este medicamento homeopático se aplicó en camarón blanco *Penaeus vannamei*, de gran importancia para la industria acuícola nacional. *Coffea cruda* (Similia®) es elaborado a partir de granos de café sin tostar, con efectos positivos probados en seres humanos (Bell *et al.*, 2012) y ratas (Ruiz-Vega *et al.*, 2000), pero no se conocen registros previos de su aplicación en organismos acuáticos.

Una manera de aprovechar los beneficios de las dosis extremadamente bajas (homeopáticas o ultradiluidas) de la cafeína, es precisamente realizar bioensayos experimentales aplicando medicamentos homeopáticos de uso humano, como *Coffea cruda*, que en México se producen en laboratorios autorizados por la Secretaría de Salud conforme a la “Farmacopea Homeopática de los Estados Unidos Mexicanos” (Secretaría de Salud, 2015). Este medicamento (=CBAD) fue evaluado para determinar su potencial aplicación para elevar la tolerancia del camarón blanco *P. vannamei* a la toxicidad de la cafeína. Las investigaciones se realizaron en el Laboratorio Experimental de Homeopatía Acuícola y Semillas Marinas del Programa de Acuicultura del CIBNOR (LEHASM-PAC-CIBNOR)), y se logró inducir un mejor desempeño fisiológico de los organismos profilácticamente tratados con *Coffea cruda*. Este Proyecto de Investigación se desarrolla con apoyo económico institucional y beca posdoctoral (SECIHTI-890685) al Dr. Alexander Lopeztegui Castillo.

4.1.1. Resultados sobre toxicidad de la cafeína y efectos positivos del CBAD *Coffea cruda*

Esta investigación posdoctoral se realizó bajo condiciones experimentales controladas de laboratorio (LEHASM-PAC-CIBNOR), en las cuales el CBAD *Coffea cruda* se aplicó de manera profiláctica (preventiva) a juveniles de camarón blanco *P. vannamei* para fortalecer sus sistemas naturales de defensa y resistencia al estrés químico nocivo de la cafeína. Después de haber aplicado el CBAD de manera preventiva durante siete días, los camarones fueron expuestos por otros siete días a diferentes concentraciones de cafeína (25, 50, 100 mg/L).



Estas concentraciones fueron inferiores a la concentración letal media (CL-50) que es aquella a la cual mueren en promedio el 50% de los organismos. El valor de CL-50 se determinó experimentalmente utilizando cafeína con 99% de pureza de Laboratorios SIGMA-Aldrich (Merck Group, USA).

Entre otros efectos positivos, se observó que la aplicación profiláctica del CBAD *Coffea cruda* disminuyó la mortalidad de los camarones experimentales y el gasto energético que tuvieron que “aplicar” para contrarrestar la toxicidad de la cafeína. Esto sugiere que el tratamiento con el CBAD *Coffea cruda* podría ayudar a mitigar los impactos negativos de la cafeína en otros organismos acuáticos de interés acuícola.

Debido a su alta dilución, estos tratamientos poseen alta inocuidad y son eco-amigables; se ha comprobado que su aplicación en juveniles de almeja Catarina puede tener mayores efectos positivos que los antibióticos (Mazón-Suástegui et al., 2017) y no generan efectos tóxicos secundarios, por lo que su uso y aplicación tiende a incrementarse a nivel nacional e internacional (López-Carvallo et al., 2022; Schmidt, 2020). Numerosos resultados positivos avalan la aplicación de esta alternativa tanto en acuicultura (García-Corona et al., 2024; Mazón-Suástegui et al., 2023, 2025) como en agricultura (Mazón-Suástegui et al., 2022; Ojeda-Silvera et al., 2025).

Los efectos de la medicación homeopática se explican considerando que una sustancia que causa síntomas patológicos a un ser vivo en dosis masiva, puede también curar dichos síntomas si se aplica en dosis mínima (Toledo et al., 2011). Este concepto filosófico y científico es un pilar fundamental de la medicina homeopática y se le conoce como el “principio de los similares” (*Similia Similibus Curentur = Like treats Like*), que junto al principio de la “dosis mínima” y al “fenómeno de hormesis”, explican la doble acción que pueden tener algunos patógenos y agentes estresores que afectan a los seres vivos durante todas las etapas de su vida. La suma de esos conceptos da soporte a la aplicación de los CBADs (Calabrese and Baldwin, 2003; Cho et al., 2016; López-Carvallo et al., 2022; Mazón-Suástegui et al., 2018) y explica los resultados obtenidos al aplicar *Coffea cruda* (Similia®) en camarones. Una muestra significativa de los avances logrados es que el Instituto Mexicano de la Propiedad Industrial

(IMPI) otorgó al CIBNOR una patente en materia de homeopatía agrícola (2024) y dos en materia de homeopatía acuícola (2025).

Consideraciones finales

Es importante notar que el consumo de cafeína se produce no sólo a partir del consumo de café sino de una variedad de productos, incluso medicamentos legalmente prescritos, lo que incrementa el número de factores sociales en los que puede impactar. Igualmente, debe notarse que el café contiene numerosas sustancias bioactivas, por lo que sus efectos, tanto positivos como negativos, no son sólo consecuencia de la cafeína. Recientemente, se ha determinado que el 69% de la población estadounidense consume diariamente al menos una bebida con cafeína, pero el café es responsable sólo del 69% de la cafeína consumida diariamente por la población (Mitchell *et al.*, 2025). Actualmente, varios autores coinciden en que a pesar de que existen numerosos libros y artículos científicos sobre el café, aún es poco el conocimiento y la comprensión que se tiene acerca de los efectos de la cafeína y de las demás sustancias que contiene, en seres humanos y en los organismos vivos en general (Doepker *et al.*, 2016; Weinberg y Bealer, 2012).

En estas circunstancias, la falta de información y de publicaciones formales, difusión y divulgación de los conocimientos que ya se tienen, se convierten en un peligro potencial, debido a que varios sectores vulnerables de la población tienen acceso prácticamente libre al consumo de cafeína, incluso sin su conocimiento ni consentimiento. Niños, adultos mayores, y personas discapacitadas o enfermas, pueden estar consumiendo cafeína “sin saberlo” debido a un nivel de instrucción deficiente o, en el peor de los casos, inexistente. La mayoría de los chocolates (casi todos, excepto el chocolate blanco), varios tipos de yogurt (saborizados con café), y algunas gomas de mascar (chicles), son energéticamente enriquecidas con cafeína. Sin embargo, esta información no es de absoluto dominio público aun cuando esté contenida en las etiquetas de los mencionados productos.

Esta publicación contribuye a difundir estos contenidos, y a generar nueva información científica de frontera sobre la potencialidad que tienen los medicamentos homeopáticos en la



acuicultura de especies marinas, como un primer paso para su aplicación productiva. Además, permite elaborar programas y campañas de divulgación sobre temas generales (efectos de la cafeína en humanos y organismos marinos) y temas específicos (toxicidad de la cafeína en camarón blanco *P. vannamei* y atenuación mediante la aplicación del CBAD *Coffea cruda*) que constituyen información novedosa ya que, a nivel internacional, son las primeras investigaciones sobre el tema.

En lo que respecta a la aplicación de medicamentos homeopáticos en especies marinas de interés acuícola, existen numerosas publicaciones científicas y tesis de Licenciatura, Maestría y Doctorado (UABCS, CICIMAR, CIBNOR), que reflejan el grado de avance científico y tecnológico del CIBNOR-SECIHTI en este campo del conocimiento que sigue siendo paradigmático y controversial, pero experimentalmente comprobable y con gran potencial para aplicaciones futuras en la producción eco-amigable de alimentos.

Agradecimientos

A los habitantes de La Paz, BCS, que amable y desinteresadamente accedieron a responder las preguntas de la encuesta. Al personal del CIBNOR involucrado en el trabajo experimental y a revisores y editores de la Revista Recursos Naturales y Sociedad. ALC es beneficiario de la beca posdoctoral (SECIHTI-890685), por lo que se agradece a la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación por el apoyo financiero.

Literatura citada

- Acosta, I., A. Márquez, T. Huérfano e I. Chacón. 1997. *Evaluación de la pulpa de café en aves: digestibilidad y energía metabolizable*. Archivos Latinoamericanos de Producción Animal 5 (1): 311-312.
- Afsa, S., G. De Marco, A. Cristaldi, A. Giannetto, M. Galati, B. Billé, G.O. Conti, H. ben Mansour, M. Ferrante, T. Cappello. 2023. *Single and combined effects of caffeine and salicylic acid on mussel Mytilus galloprovincialis: Changes at histomorphological, molecular and biochemical levels*. Environmental Toxicology and Pharmacology 101: 104167. <https://doi.org/10.1016/j.etap.2023.104167>.
- Aguirre-Martínez, G.V., T.A. Del Valls y M.L. Martin-Díaz. 2013. *Identification of biomarkers responsive to chronic exposure to pharmaceuticals in target tissues of Carcinus maenas*. Marine Environmental Research 87/88: 1-11. <http://dx.doi.org/10.1016/j.marenvres.2013.02.011>.
- Aguirre-Martínez, G.V., T.A. Del Valls y M.L. Martin-Díaz. 2015. *Yes, caffeine, ibuprofen, carbamazepine, novobiocin and tamoxifen have an effect on Corbicula fluminea (Müller, 1774)*. Ecotoxicology and Environmental Safety 120: 142-154. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecoenv.2015.05.036>.
- Aguirre-Martínez, G.V., T.A. Del Valls y M.L. Martin-Díaz. 2016. *General stress, detoxification pathways, neurotoxicity and genotoxicity evaluated in Ruditapes philippinarum exposed to human pharmaceuticals*. Ecotoxicology and Environmental Safety 124: 18-31. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecoenv.2015.09.031>.
- Aguirre-Martínez, G.V., C. André, F. Gagné y M.L. Martín-Díaz. 2018. *The effects of human drugs in Corbicula fluminea. Assessment of neurotoxicity, inflammation, gametogenic activity, and energy status*. Ecotoxicology and Environmental Safety 148: 652-663. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2017.09.042>.
- Ali, A.M., H.T. Rønning, L.K. Sydnés, W.M. Alarif, R. Kallenborn y S.S. Al-Lihaibi. 2018. *Detection of PPCPs in marine organisms from contaminated coastal waters of the Saudi Red Sea*. Science of the Total Environment 621: 654-662. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.11.298>.



- Al-Qaim, F.F., Z.H. Mussa, M.R. Othman y M.dP. Abdullah. 2015. *Removal of caffeine from aqueous solution by indirect electrochemical oxidation using a graphite-PVC composite electrode: A role of hypochlorite ion as an oxidising agent*. Journal of Hazardous Materials 300: 387-397. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2015.07.007>.
- Anselme, F., K. Collomp, B. Mercier, S. Ahmaïdi y C. Prefaut. 1992. *Caffeine increases maximal anaerobic power and blood lactate concentration*. European journal of applied physiology and occupational physiology 65 (2): 188-191. <https://doi.org/10.1007/BF00705079>.
- Arnold, S.E.J., J.H. Dudenhöffer, M.T. Fountain, K.L. James, D.R. Hall, D.I. Farman, F.L. Wäckers y P.C. Stevenson. 2021. *Bumble bees show an induced preference for flowers when primed with caffeinated nectar and a target floral odor*. Current Biology 31: 4127-4131. <https://doi.org/10.1016/j.cub.2021.06.068>.
- Barrera, C.E.D. y C.L.E. Suárez. 2007. *Metabolitos con actividad biológica aislados de especies pertenecientes a la familia Lauraceae*. Scientia Et Technica 13 (33): 363-364.
- Bautista E.O., E. Barrueta y L. Acevedo. 1999c. *Utilización de la pulpa de café ensilada en raciones para cerdos en crecimiento y acabado*. pp. 84-101. En Ramírez J. (Ed). Pulpa de Café Ensilada. Producción, Caracterización y Utilización en la Alimentación Animal. Consejo de Desarrollo Científico y Humanístico, Universidad Central de Venezuela. Caracas, Venezuela.
- Bautista E.O., N. Molina y L. Rodríguez. 1999b. *Utilización de la pulpa de café ensilada con melaza y bacterias en raciones para conejos en crecimiento y engorde*. X Congreso Venezolano de Zootecnia. San Cristóbal, Táchira. Venezuela.
- Bautista E.O., M. Useche, P. Pérez y F. Linares. 1999a. *Utilización de la pulpa de café ensilada y deshidratada en la alimentación de Cachamay (Colossoma x Piaractus)*. pp. 109-135. En Ramírez J. (Ed) Pulpa de Café Ensilada. Producción, Caracterización y Utilización en la Alimentación Animal. Consejo de Desarrollo Científico y Humanístico, Universidad Central de Venezuela.
- Bautista E.O., J. Pernía, D. Barrueta y M. Useche. 2005. *Pulpa ecológica de café ensilada en la alimentación de alevines del híbrido de cachamay (Colossoma macropomum x Piaractus brachypomus)*. Revista científica de la facultad de ciencias veterinarias 15 (1): 33-40.

- Bayen, S., E.S. Estrada, G. Juhel, L.W. Kit y B.C. Kelly. 2016. *Pharmaceutically active compounds and endocrine disrupting chemicals in water, sediments and mollusks in mangrove ecosystems from Singapore*. Marine Pollution Bulletin 109 (2): 716-722. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2016.06.105>.
- Bell, I.R., A. Howerter, N. Jackson, M. Aickin, R.R. Bootzin y A.J. Brooks. 2012. *Nonlinear dynamical systems effects of homeopathic remedies on multiscale entropy and correlation dimension of slow wave sleep EEG in young adults with histories of coffee-induced insomnia*. Homeopathy 101 (3): 182-192. <http://dx.doi.org/10.1016/j.homp.2012.05.007>.
- Bell, D.G. y T.M. McLellan. 2002. *Exercise endurance 1, 3, and 6 h after caffeine ingestion in caffeine users and nonusers*. Journal of Applied Physiology 93: 1227-1234. <https://doi.org/10.1152/japplphysiol.00187.2002>.
- Beltrame, K.K, A.L. Cazetta, P.S.C. de Souza, L. Spessato, T.L. Silva y V.C. Almeida. 2018. *Adsorption of caffeine on mesoporous activated carbon fibers prepared from pineapple plant leaves*. Ecotoxicology and Environmental Safety 147: 64-71. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecoenv.2017.08.034>.
- Benoit, I., M. Asther, Y. Bourne, D. Navarro, S. Canaan, L. Lesage-Meessen, M. Herweijer, P.M. Coutinho, M. Asther y E. Record. 2007. *Gene overexpression and biochemical characterization of the biotechnologically relevant chlorogenic acid hydrolase from Aspergillus niger*. Applied and Environmental Microbiology 73 (17): 5624-5632. <https://doi.org/10.1128/AEM.00374-07>.
- Bikker, J., H. MacDougall-Shackleton, L.M. Bragg, M.R. Servos, B.B.M. Wong y S. Balshine. 2024. *Impacts of caffeine on fathead minnow behaviour and physiology*. Aquatic Toxicology 273: 106982. <https://doi.org/10.1016/j.aquatox.2024.106982>.
- Braham J. y R. Bressani. 1979. *Coffee Pulp. Composition, technology and utilization*. International Development Research Centre, Ottawa, Canada. 95 pp.
- Calabrese E.J., Baldwin L.A., 2003. Hormesis: The dose-response revolution. Annu. Rev. Pharmacol. Toxicol. 43, 175-197. <https://doi.org/10.1146/annurev.pharmtox.43.100901.140223>.



- Capolupo, M., P. Valbonesi, A. Kiwan, S. Buratti, S. Franzellitti y E. Fabbri, 2016. *Use of an integrated biomarker-based strategy to evaluate physiological stress responses induced by environmental concentrations of caffeine in the Mediterranean mussel *Mytilus galloprovincialis**. Science of The Total Environment 563: 538–548. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.04.125>.
- Casas-Hinojosa, I., L.M. Gómez-Oliván, V.M. Gutierrez-Noya, S. Gracia-Medina, K.E. Rosales-Pérez, J.M. Orozco-Hernández, G.A. Elizalde-Velázquez, M. Galar-Martínez, O. Dublán-García, M.D. Hernández-Navarro y H. Islas-Flores. 2023. *Integrative approach to elucidate the embryological effects of caffeine in *Cyprinus carpio*: Bioconcentration and alteration of oxidative stress-related gene expression patterns*. Science of the Total Environment 894: 165016. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.165016>.
- Castillo, E., Y. Acosta, N. Betancourt, E. Castellanos, A. Matos, V. Téllez y M. Cerdá. 2002. *Utilización de la pulpa de café en la alimentación de alevines de tilapia roja*. Revista AquaTIC 16: 1-7.
- Cauli, O. y M. Morelli. 2005. *Caffeine and the dopaminergic system*. Behavioural Pharmacology 16 (2): 63-77. <https://doi.org/10.1097/00008877-200503000-00001>.
- Chan, S.M., Rankin, S.M., Keeley, L.L., 1988. Characterization of the molt stages in *Penaeus vannamei*: setogenesis and hemolymph levels of total protein, ecdysteroid, and glucose. Biol. Bull. 175, 185–192. <https://doi.org/10.2307/1541558>.
- Chia-Cheng, Y., H. Meng-Hung, H. Chien-Chang, C. Ya-Hui y S.Y. Yi-Jie. 2024. *Effects of Caffeinated Chewing Gum on Exercise Performance and Physiological Responses: A Systematic Review*. Nutrients 16 (21): 3611. <https://doi.org/10.3390/nu16213611>.
- Cho K., Jwa M.S., Moon H.N. Hur S.P., Kim D., Yeo I.K., 2016. Hormetic effect of 60Co gamma radiation on tolerance to salinity and temperature stress in *Haliotis discus discus*. Aquaculture 451, 473–479. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture>.
- Cruz, D., A. Almeida, V. Calisto, V.I. Esteves, R.J. Schneider, F.J. Wrona, A.M. Soares, E. Figueira y R. Freitas. 2016. *Caffeine impacts in the clam *Ruditapes philippinarum*: alterations on energy reserves, metabolic activity and oxidative stress biomarkers*. Chemosphere 160: 95–103. <http://dx.doi.org/10.1016/j.chemosphere.2016.06.068>.

- De Marco, G., S. Afsa, M. Galati, B. Billé, V. Parrino, H. ben Mansour y T. Cappello. 2022. *Comparison of cellular mechanisms induced by pharmaceutical exposure to caffeine and its combination with salicylic acid in mussel Mytilus galloprovincialis* Environmental Toxicology and Pharmacology 93: 103888. <https://doi.org/10.1016/j.etap.2022.103888>.
- Del Rey, Z.R., E.F. Granek y B.A. Buckley. 2011. *Expression of HSP70 in Mytilus californianus following exposure to caffeine.* Ecotoxicology 20: 855-861. <https://doi.org/10.1007/s10646-011-0649-6>.
- Denoeud, F., et al. 2014. *The coffee genome provides insight into the convergent evolution of caffeine biosynthesis.* Science 345 (6201): 1181-1184. <https://doi.org/10.1126/science.1255274>.
- Diogo, B.S., S.C. Antunes, I. Pinto, J. Amorim, C. Teixeira, L.O. Teles, O. Golovko, V. Žlábek, A.P. Carvalho, S. Rodrigues. 2023. *Insights into environmental caffeine contamination in ecotoxicological biomarkers and potential health effects of Danio rerio.* Heliyon 9: e19875. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e19875>.
- Doecker, C., H.R. Lieberman, A.P. Smith, J.D. Peck, A. El-Sohemy y B.T. Welsh. 2016. *Caffeine: friend or foe?* Annual Review of Food Science and Technology 7: 117-137. <https://doi.org/10.1146/annurev-food-041715-033243>.
- Dos Santos, J.A., et al. 2022. *Sublethal effects of environmental concentrations of caffeine on a neotropical freshwater fish.* Ecotoxicology 31 (10): 161-167. <https://doi.org/10.1007/s10646-021-02498-z>.
- Erickson, M.A., R.J. Schwarzkopf y R.D. McKenzie. 1987. *Effects of caffeine, fructose, and glucose ingestion on muscle glycogen utilization during exercise.* Medicine & Science in Sports & Exercise 19 (6): 579-583.
- Félix, L., C. Lobato-Freitas, S.M. Monteiro y C. Venâncio. 2021. *24-Epibrassinolide modulates the neurodevelopmental outcomes of high caffeine exposure in zebrafish (Danio rerio) embryos.* Comparative Biochemistry and Physiology, Part C 249: 109143. <https://doi.org/10.1016/j.cbpc.2021.109143>.



- Francoeur, M., A. Ferino-Pérez, C. Yacou, C. Jean-Marius, E. Emmanuel, Y. Chérémond, U. Jauregui-Haza y S. Gaspard. 2021. *Activated carbon synthesized from Sargassum (sp) for adsorption of caffeine: Understanding the adsorption mechanism using molecular modeling*. Journal of Environmental Chemical Engineering 9: 104795. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2020.104795>.
- Frary, C.D., R.K. Johnson y M.Q. Wang. 2005. *Food sources and intakes of caffeine in the diets of persons in the United States*. Journal of the American Dietetic Association 105 (1): 110-113. <https://doi.org/10.1016/j.jada.2004.10.027>.
- Fredholm, B.B., K. Bättig, J. Holmén, A. Nehlig y E.E. Zvartau. 1999. *Actions of caffeine in the brain with special reference to factors that contribute to its widespread use*. Pharmacological Reviews 51 (1): 83-133. [https://doi.org/10.1016/S0031-6997\(24\)01396-6](https://doi.org/10.1016/S0031-6997(24)01396-6).
- Gagné, F., C. Blaise y C. André. 2006. *Occurrence of pharmaceutical products in a municipal effluent and toxicity to rainbow trout (Oncorhynchus mykiss) hepatocytes*. Ecotoxicology and Environmental Safety 64 (3): 329-336. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2005.04.004>.
- Gagné, F., C. Blaise, C. André, C. Gagnon y M. Salazar. 2007. *Neuroendocrine disruption and health effects in Elliptio complanata mussels exposed to aeration lagoons for wastewater treatment*. Chemosphere 68: 731-743. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2006.12.101>.
- García, C. y R. Bayne. 1974. *Cultivo de Tilapia aurea (Steindachner) en corrales alimentadas artificialmente con gallinaza y un alimento preparado con 30% de pulpa de café*. Ministerio de Agricultura y Cría. Caracas, Venezuela.
- Garcia, R.N., K.W. Chung, M.E. De Lorenzo y M.C. Curran. 2014. *Individual and mixture effects of caffeine and sulfamethoxazole on the dagger blade grass shrimp Palaemonetes pugio following maternal exposure*. Environmental Toxicology and Chemistry 33: 2120-2125. <https://doi.org/10.1002/etc.2669>.

- García-Corona, J.L., G.F. Arcos-Ortega, C. Rodríguez-Jaramillo, J.A. López-Carvallo, J.M. Mazón-Suástegui. 2024. *Examination of the effects of highly diluted bioactive compounds on gametogenesis in relation to energy budget and oocyte quality in mussel (Modiolus capax) broodstock*. Aquaculture 578: 740080. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2023.740080>.
- García-Moreno, A. 2016. *La cafeína y su efecto ergogénico en el deporte* (primera parte). Archivos de Medicina del Deporte 33 (3): 200-206.
- Gil, E., F. Luna, L. Mendieta, V. Alatríste, D. Limón e I. Martínez. 2017. *La administración crónica de cafeína mejora la memoria espacial y la actividad de enzimas antioxidantes*. Revista Mexicana de Ciencias Farmacéuticas 48 (2): 49-55.
- Grgic J., I. Grgic, C. Pickering, B.J. Schoenfeld, D.J. Bishop y Z. Pedisic. 2020. *Wake up and smell the coffee: caffeine supplementation and exercise performance-an umbrella review of 21 published meta-analyses*. British Journal of Sports Medicine 54: 681-688. <http://dx.doi.org/10.1136/bjsports-2018-100278>.
- Grosso, G., J. Godos, F. Galvano y E.L. Giovannucci. 2017. *Coffee, caffeine, and health outcomes: An umbrella review*. Annual Review of Nutrition 37: 131-156. <https://doi.org/10.1146/annurev-nutr-071816-064941>.
- Herman, A. y A.P. Herman. 2013. *Caffeine's mechanisms of action and its cosmetic use*. Skin Pharmacology and Physiology 26: 8-14. <https://doi.org/10.1159/000343174>.
- Hyuck-Bang, S., A. Ji-Young, H. Nam-Hui, S. Simranjeet-Singh, K. Yang-Hoon y M. Jiho. 2015. *Acute and chronic toxicity assessment and the gene expression of Dhb, Vtg, Arnt, CYP4, and CYP314 in Daphnia magna exposed to pharmaceuticals*. Molecular & Cellular Toxicology 11: 153-160. <https://doi.org/10.1007/s13273-015-0013-7>.
- Impellitteri, F., K. Yunko, V. Martyniuk, T. Matskiv, S. Lechachenko, V. Khoma, A. Mudra, G. Piccione, O. Stoliar y C. Faggio. 2023. *Physiological and biochemical responses to caffeine and microplastics in Mytilus galloprovincialis*. Science of the Total Environment 890: 164075. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.164075>.
- Jiang, T., W. Wu, M. Ma, Y. Hu y R. Li. 2024. *Occurrence and distribution of emerging contaminants in wastewater treatment plants: A globally review over the past two decades*. Science of the Total Environment 951: 175664. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2024.175664>.



- Juliano, L.M. y R.R. Griffiths. 2004. *A critical review of caffeine withdrawal: empirical validation of symptoms and signs, incidence, severity, and associated features*. *Psychopharmacology* 176: 1-29.
- Kamimori, G.H., C.S. Karyekar, R. Otterstetter, D.S. Cox, T.J. Balkin, G.L. Belenky y N.D. Eddington. 2002. *The rate of absorption and relative bioavailability of caffeine administered in chewing gum versus capsules to normal healthy volunteers*. *International Journal of Pharmaceutics* 234 (1-2): 159-167. [https://doi.org/10.1016/S0378-5173\(01\)00958-9](https://doi.org/10.1016/S0378-5173(01)00958-9).
- Karatzis, E., T.G. Papaioannou, K. Aznaouridis, K. Karatzi, K. Stamatelopoulos, A. Zampelas, C. Papamichael, J. Lekakis y M. Mavrikakis. 2005. Acute effects of caffeine on blood pressure and wave reflections in healthy subjects: should we consider monitoring central blood pressure?. *International Journal of Cardiology* 98 (3): 425-30. <https://doi.org/10.1016/j.ijcard.2003.11.013>.
- Katzung, B.G. y T.W. Vanderah. 2024. *Farmacología Básica y Clínica* (16ª Edición). Editorial McGraw Hill Education, New York, EUA. 1235 pp.
- Klein, E., J. Zohar, M.F. Geraci, D.L. Murphy y T.W. Uhde. 1991. *Anxiogenic effects of m-CPP in patients with panic disorder: comparison to caffeine's anxiogenic effects*. *Biological Psychiatry* 30: 973-984.
- López-Carvallo, J.A., J.M. Mazón-Suástegui, G.F. Arcos-Ortega, M.A. Hernández-Oñate, D. Tovar-Ramírez, F. Abasolo-Pacheco y M. García-Bernal. 2022. *Highly diluted bioactive compounds in marine aquaculture: a potential alternative for sustainable production*. *Reviews in Aquaculture* 14: 1170-1193. <https://doi.org/10.1111/raq.12644>.
- Maranho, L.A., C. Andre, T.A. Del Valls, F. Gagné y M.L. Martín-Díaz. 2015b. *Adverse effects of wastewater discharges in reproduction, energy budget, neuroendocrine and inflammation processes observed in marine clams *Ruditapes philippinarum**. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 164: 324-334. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2015.07.044>.

- Maranho, L.A., L.B. Moreira, R.M. Baena-Nogueras, P.A. Lara-Martín, T.A. Del Valls y M.L. Martín-Díaz. 2015a. *A candidate short-term toxicity test using *Ampelisca brevicornis* to assess sublethal responses to pharmaceuticals bound to marine sediments*. Archives of Environmental Contamination and Toxicology 68 (2): 237-258. <https://doi.org/10.1007/s00244-014-0080-0>.
- Martín-Díaz, M.L., F. Gagné y C. Blaise. 2009. *The use of biochemical responses to assess ecotoxicological effects of pharmaceutical and personal care products (PPCPs) after injection in the mussel *Elliptio complanata**. Environmental Toxicology and Pharmacology 28: 237-242. <https://doi.org/10.1016/j.etap.2009.04.009>.
- Maruya, K.A., N.G. Dodder, S.B. Weisberg, D. Gregorio, J.S. Bishop, S. Klosterhaus, D.A. Alvarez, E.T. Furlong, S. Bricker, K.L. Kimbrough, G.G. Lauenstein. 2014. *The Mussel Watch California pilot study on contaminants of emerging concern (CECs): synthesis and next steps*. Marine Pollution Bulletin 81: 355-363. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2013.04.023>.
- Maughan, R.J. y J. Griffin. 2003. *Caffeine ingestion and fluid balance: a review*. Journal of Human Nutrition and Dietetics 16 (6): 411-420. <https://doi.org/10.1046/j.1365-277X.2003.00477.x>.
- Mazón-Suástegui J.M., M. García-Bernal, P.E. Saucedo PE, A.I. Campa-Córdova y F. Abasolo-Pacheco. 2017. Homeopathy outperforms antibiotics treatment in juvenile scallop *Argopecten ventricosus*: Effects on growth, survival, and immune response. Homeopathy (2017) 106, 18-26. <http://dx.doi.org/10.1016/j.homp.2016.12.002>.
- Mazón-Suástegui, J.M., D. Tovar-Ramírez, J.S. Salas-Leiva, G.F. Arcos-Ortega, M. García-Bernal, M.A. Avilés-Quevedo, et al. 2018. *Aquacultural homeopathy: a focus on marine species*. pp. 67-91. En: Diarte-Plata, G. y R. Escamilla (Eds.). Aquaculture: plants and invertebrates. IntechOpen, London. 116 pp. <https://dx.doi.org/10.5772/intechopen.78030>.
- Mazón-Suástegui, J.M., M. García-Bernal, C.M. Ojeda-Silvera, D. Batista-Sánchez y H. Ruiz-Espinoza. 2022. *Índice de tolerancia al estrés salino y análisis de crecimiento de dos variedades de frijol (*Phaseolus vulgaris* L. y *Vigna unguiculata* L., Walp.), cultivadas en un medio salino (NaCl) y tratadas con medicamentos homeopáticos*. Terra Latinoamericana 40: e1083. <https://doi.org/10.28940/terra.v40i0.1083>.



- Mazón-Suástegui, J.M., M. García-Bernal, R. Medina-Marrero, G.F. Arcos-Ortega, A.I. Campa-Córdova y J.A. López-Carvalho. 2023. *Individual and synergistic effects of highly diluted bioactive compounds and probiotic actinomycetes on the growth and survival of juvenile shrimp *Penaeus vannamei**. Latin American Journal of Aquatic Research 51: 145-152. <http://dx.doi.org/10.3856/vol51-issue1-fulltext-2959>.
- Mazón-Suástegui, J.M., M. García-Bernal, R. Medina-Marrero, A.I. Campa-Córdova, J. Salas-Leiva, G.F. Arcos-Ortega y C.M. Ojeda-Silvera. 2025. *Growth, survival, and modulation of the intestinal microbiota of shrimp *Penaeus vannamei* fed with probiotic actinomycetes and highly diluted bioactive compounds*. Latin American Journal of Aquatic Research 53: 242-254. <http://dx.doi.org/10.3856/vol53-issue2-fulltext-3292>.
- Mitchell, D.C., M. Trout, R. Smith, R. Teplansky y H.R. Lieberman. 2025. *An update on beverage consumption patterns and caffeine intakes in a representative sample of the US population*. Food and Chemical Toxicology 196: 115237. <https://doi.org/10.1016/j.fct.2025.115237>.
- Moore, M.T., S.L. Greenway, J.L. Farris y B. Guerra 2008. *Assessing caffeine as an emerging environmental concern using conventional approaches*. Archives of Environmental Contamination and Toxicology 54: 31-35. <https://doi.org/10.1007/s00244-007-9059-4>.
- Moreau, Y., J. Arredondo, I. Perraud y S. Roussos. 2003. *Utilización dietética de la proteína y de la energía de la pulpa de café fresca y ensilada por la tilapia del Nilo (*Oreochromis niloticus*)*. Brazilian Archives of Biology and Technology 46(2): 35-347.
- Munari, M., V. Matozzo, G. Benetello, V. Riedl, P. Pastore, D. Badocco y M.G. Marin. 2020. *Exposure to decreased pH and caffeine affects hemocyte parameters in the mussel *Mytilus galloprovincialis**. Journal of Marine Science and Engineering 8 (4): 238. <https://doi.org/10.3390/jmse8040238>.
- Muñoz-Peñuela, M., F.L. Lo-Nostro, A. Dalólio-Gomes, C. Eduardo-Tolussi, G. Souza-Branco, J.P. Silva-Pinheiro, F.G. Andrade de Godoi y R. Guimarães-Moreira. 2021. *Diclofenac and caffeine inhibit hepatic antioxidant enzymes in the freshwater fish *Astyanax altiparanae* (Teleostei: Characiformes)*. Comparative Biochemistry and Physiology, Part C 240: 108910. <https://doi.org/10.1016/j.cbpc.2020.108910>.

- Natale, F., C. Cirillo, G.M. Di Marco, L.S. Di Vetta, L. Aronne, A. Siciliano, R. Mocerino, M.A. Tedesco, P. Golino y R. Calabrò. 2009. *When chewing gum is more than just a bad habit*. Lancet 373: 1918. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(09\)60730-3](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(09)60730-3)
- Nazario, L.R., R.A. Junior, K.M. Capiotti, J.E.C. Hallak, A.W. Zuardi, J.A.S. Crippa, C.D. Bonan y R.Souza da Silva. 2015. *Caffeine protects against memory loss induced by high and non-anxiolytic dose of cannabidiol in adult zebrafish (Danio rerio)*. Pharmacology, Biochemistry and Behavior 203: 134-140. <http://dx.doi.org/10.1016/j.pbb.2015.06.008>.
- Nehlig, A. 2018. *Interindividual differences in caffeine metabolism and factors driving caffeine consumption*. Pharmacological Reviews 70(2): 384-411. <https://doi.org/10.1124/pr.117.014407>.
- Neri, D., T. Ruberto, V. Mwaffo, T. Bartolini y M. Porfiri. 2019. *Social environment modulates anxiogenic effects of caffeine in zebrafish*. Behavioural Pharmacology 30 (1): 45-58. <https://doi.org/10.1097/FBP.0000000000000415>.
- Noriega-Salazar, A., R. Silva-Acuña y M. García de Salcedo. 2008. *Utilización de la pulpa de café en la alimentación animal*. Zootecnia Tropical 26 (4): 411-419.
- Ojeda-Silvera, C.M., J.M. Mazón-Suástegui, B. Murillo-Amador, D. Batista-Sánchez, D. Batista-Sánchez y M. García-Bernal. 2025. *Capsicum annuum L. response to highly diluted bioactive compounds application in germination and initial growth under saline conditions*. Terra Latinoamericana 43: e2162. <https://doi.org/10.28940/terra.v43i.2162>.
- Ojemaye, C.Y. y L. Petrik. 2019. *Occurrences, levels and risk assessment studies of emerging pollutants (pharmaceuticals, perfluoroalkyl and endocrine disrupting compounds) in fish samples from Kalk Bay harbour, South Africa*. Environmental Pollution 252: 562-572. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.05.091>.
- Peñaloza, M., L.H. Alba, J.S. Castillo, V. Gutiérrez, A. Ibarra y N. Badoui. 2020. *Relación entre el consumo habitual de café y la mortalidad general y cardiovascular: revisión de revisiones sistemáticas de la literatura*. Revista Chilena de Nutrición 47 (3): 503-511. <http://dx.doi.org/10.4067/S0717-75182020000300503>.



- Picinini-Zambelli, J., A.L. Hilário-Garcia y J. Da Silva. 2025. *Emerging pollutants in the aquatic environments: A review of genotoxic impacts*. Mutation Research-Reviews in Mutation Research 795: 108519. <https://doi.org/10.1016/j.mrrev.2024.108519>.
- Pilar-González, M., I. Cecconi, D. Salvatierra, M. Úbeda-Manzanaro, G. Parra, E. Ramos-Rodríguez y C.V.M. Araújo. 2025. *Multi-generational exposure of Daphnia magna to pharmaceuticals: Effects on colonization, reproduction, and habitat selection behavior*. Ecotoxicology and Environmental Safety 289: 117633. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2024.117633>.
- Pinto-Ruiz, R., F. Guevara-Hernández, J.A. Medina, D. Hernández-Sánchez, A. Leyde-Coss y E. Guerra-Medina. 2017. *Conducta ingestiva y preferencia bovina por el ensilaje de Pennisetum y pulpa de café*. Agronomía Mesoamericana 28 (1): 59-69. <https://doi.org/10.15517/am.v28i1.23120>.
- Pires, A., A. Almeida, V. Calisto, R.J. Schneider, V.I. Esteves, F.J. Wrona, A.M.V.M. Soares, E. Figueira y R. Freitas. 2016a. *Long-term exposure of polychaetes to caffeine: biochemical alterations induced in Diopatra neapolitana and Arenicola marina*. Environmental Pollution 214: 456-463. <http://dx.doi.org/10.1016/j.envpol.2016.04.031>.
- Pires, A., A. Almeida, V. Calisto, R.J. Schneider, V.I. Esteves, F.J. Wrona, A.M.V.M. Soares, E. Figueira y R. Freitas. 2016b. *Hediste diversicolor as bioindicator of pharmaceutical pollution: results from single and combined exposure to carbamazepine and caffeine*. Comparative Biochemistry and Physiology Part C: Toxicology & Pharmacology 188: 30-38. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cbpc.2016.06.003>.
- Pires, A., A. Almeida, J. Correia, V. Calisto, R.J. Schneider, V.I. Esteves, A.M.V.M. Soares, E. Figueira y R. Freitas. 2016c. *Long-term exposure to caffeine and carbamazepine: Impacts on the regenerative capacity of the polychaete Diopatra neapolitana*. Chemosphere 146: 565-573. <http://dx.doi.org/10.1016/j.chemosphere.2015.12.035>.
- Quinn, B., F. Gagné y C. Blaise. 2008. *An investigation into the acute and chronic toxicity of eleven pharmaceuticals (and their solvents) found in wastewater effluent on the cnidarian, Hydra attenuata*. Science of the Total Environment 389 (2-3): 306-314. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2007.08.038>.

- Raj, R., A. Tripathi, S. Das y M.M. Ghangrekar. 2021. *Removal of caffeine from wastewater using electrochemical advanced oxidation process: A mini review*. Case Studies in Chemical and Environmental Engineering 4: 100129. <https://doi.org/10.1016/j.cscee.2021.100129>.
- Ramírez-Montes, C.A. y J.H. Osorio. 2013. *Uso de la cafeína en el ejercicio físico: ventajas y riesgos*. Revista de la Facultad de Medicina de la Universidad de Caldas 61 (4): 459-468.
- Ribeiro, J.A. y A.M. Sebastiao. 2010. *Caffeine and Adenosine*. Journal of Alzheimer's Disease 20: S3-S15. <https://doi.org/10.3233/JAD-2010-1379>.
- Rizzi, C., D. Seveso, P. Galli y S. Villa. 2020. *First record of emerging contaminants in sponges of an inhabited island in the Maldives*. Marine Pollution Bulletin 156: 111273. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2020.111273>.
- Robertson, D., J.C. Frölich, R.K. Carr, J.T. Watson, J.W. Hollifield, D.G. Shand y J.A. Oates. 1978. *Effects of caffeine on plasma renin activity, catecholamines and blood pressure*. New England Journal of Medicine 298 (4): 181-186. <https://doi.org/10.1056/NEJM197801262980403>.
- Romero, I., T. Huérfano, I. Calderón y A. Méndez. 1995. *Aceptabilidad y digestibilidad de la pulpa de café ensilada en aves*. pp. 88-105. En Ramírez J. (Ed). Pulpa de Café Ensilada. Producción, Caracterización y Utilización en la Alimentación Animal. Consejo de Desarrollo Científico y Humanístico, Universidad Central de Venezuela. Caracas, Venezuela. 224 pp.
- Ruiz-Oliveira, J., P. Fernandes-Silva y A.C. Luchiari. 2019. *Coffee time: Low caffeine dose promotes attention and focus in zebrafish*. Learning & Behavior 47: 227-233. <https://doi.org/10.3758/s13420-018-0369-3>.
- Ruiz-Vega, G., L. Pérez-Ordaz, P. Proa-Flores y Y. Aguilar-Díaz. 2000. *An evaluation of Coffea cruda effect on rats*. British Homeopathic Journal 89 (3): 122-126. <https://doi.org/10.1054/homp.1999.0417>.
- Santos, L.C., J. Ruiz-Oliveira, J.J. Oliveira, P.F. Silva y A.C. Luchiari, 2016. *Irish coffee: effects of alcohol and caffeine on object discrimination in zebrafish*. Pharmacology Biochemistry & Behavior 143: 34-43. <https://doi.org/10.1016/j.pbb.2016.01.013>.



- Santos, L.C., J. Ruiz-Oliveira, P.F. Silva y A.C. Luchiari. 2017. *Caffeine dose-response relationship and behavioral screening in zebrafish*. pp. 87-105. En Latosinska, J.N. y M. Latosinska (Eds.). The question of caffeine. InTechOpen, Open Access book publisher. 172 pp. <https://doi.org/10.5772/intechopen.68341>.
- Santos, N., V. Picolo, I. Domingues, V. Perillo, R.A. Villacis, C.K. Grisolia y M. Oliveira. 2023. *Effects of environmental concentrations of caffeine on adult zebrafish behaviour: a short-term exposure scenario*. Environmental Science and Pollution Research 30 (23): 63776–63787. <https://doi.org/10.1007/s11356-023-26799-4>.
- Sawynok, J. y T.L. Yaksh. 1993. *Caffeine as an analgesic adjuvant: a review of pharmacology and mechanisms of action*. Pharmacological Reviews 45 (1): 43-85. [https://doi.org/10.1016/S0031-6997\(25\)00450-8](https://doi.org/10.1016/S0031-6997(25)00450-8).
- Secretaría de Salud. 2015. *Farmacopea homeopática de los Estados Unidos Mexicanos*. Secretaría de Salud, México D.F.
- Seifert, S.M., J.L. Schaechter, E.R. Hershorng y S.E. Lipshultz. 2011. *Health effects of energy drinks on children, adolescents, and young adults*. Pediatrics 127 (3): 511-528. <https://doi.org/10.1542/peds.2009-3592>.
- Schmidt, J.M. 2020. *Sustainability as a challenge to therapeutics—The Hahnemannian and Gandhian approach*. Explore 16: 237-241. <https://doi.org/10.1016/j.explore.2019.11.009>.
- Smith, A.P. 2009. *Effects of caffeine in chewing gum on mood and attention*. Human Psychopharmacology 24 (3): 239-247. <https://doi.org/10.1002/hup.1020>.
- Smith, A.P. 2021. *Effects of caffeine in chewing gum on mood and performance at different times of day*. World Journal of Pharmaceutical and Medical Research 8 (6): 114-118.
- Stuedemann, A., R.M. Schwend, K.A. Shaw, N. Saddler, M. Huston, M. Benvenuti, J. Leamon y A.K. Sherman. 2025. *Can oral caffeine decrease postoperative opioid consumption following posterior spinal fusion in adolescent idiopathic scoliosis? A randomized placebo-controlled trial*. North American Spine Society Journal 21: 100582. <https://doi.org/10.1016/j.xnsj.2025.100582>.

- Thanawala, S., R. Shah, R. Abiraamasundari, R. Senthurselvi y P. Desomayanandam. 2024. Comparative bioavailability and benefits on mental functions of novel extended-release caffeine capsules against immediate-release caffeine capsules: an open-label, randomized, cross-over, single-dose two-way crossover study. *Journal of Dietary Supplements* 21 (1): 13-27. <https://doi.org/10.1080/19390211.2022.2160529>.
- Toledo, M, J. Stangarlin y C. Bonato. 2011. *Homeopathy for the control of plant pathogens*. pp. 1063-1067. En: Mendez-Vilas, A. (Ed.). *Science against microbial pathogens: communicating current research and technological advances*, Fomatex Research Center, Spain. 448 pp.
- Torres-Castillo, N.E., J.S. Ochoa-Sierra, M.A. Oyervides-Muñoz, J.E. Sosa-Hernández, H.M.N. Iqbal, R. Parra-Saldívar y E.M. Melchor-Martínez. 2021. *Exploring the potential of coffee husk as caffeine bio-adsorbent – A mini-review*. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering* 3: 100070. <https://doi.org/10.1016/j.cscee.2020.100070>.
- Trombini, C., M. Hampel y J. Blasco. 2019. *Assessing the effect of human pharmaceuticals (carbamazepine, diclofenac and ibuprofen) on the marine clam Ruditapes philippinarum: An integrative and multibiomarker approach*. *Aquatic Toxicology* 208: 146-156. <https://doi.org/10.1016/j.aquatox.2019.01.004>.
- Vázquez-Tapia, I., S. Salazar-Martínez, M. Acosta-Castro, K.A. Meléndez-Castolo, J. Mahlkecht, P. Cervantes-Avilés, M.V. Capparelli y A. Mora. 2022. *Occurrence of emerging organic contaminants and endocrine disruptors in different water compartments in Mexico – A review*. *Chemosphere* 308: 136285. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.136285>.
- Veracruz-Dólera, C., P. Andreo-Martínez, N. García-Martínez, S. Martínez-López y L. Almela. 2022. *Contenido en metilxantinas y estabilidad oxidativa de diferentes muestras comerciales de bebida de café*. *Afinidad: Revista de química teórica y aplicada* 79 (595): 265-272.
- Vester, J.C. y J. Koenig. 2018. *Caffeine intake and its sources: A review of national representative studies*. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition* 58 (8): 1250-1259. <https://doi.org/10.1080/10408398.2016.1247252>.



- Vieira, L.R., A.M.V.M. Soares. y R. Freitas. 2022. *Caffeine as a contaminant of concern: A review on concentrations and impacts in marine coastal systems*. Chemosphere 286: 131675. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.131675>.
- Wang, Z., J. Xu y W. Du. 2024. *Antagonistic interaction between caffeine and ketamine in zebra fish: Implications for aquatic toxicity*. Environmental Science and Ecotechnology 21: 100437. <https://doi.org/10.1016/j.esse.2024.100437>.
- Wee, C. 2022. *The potential health benefit of coffee: does a spoonful of sugar make it all go away?* Annals of Internal Medicine 175 (7): 1035-1036. <https://doi.org/10.7326/M22-1465>.
- Weinberg, B.A. y B.K. Bealer. 2012. *El mundo de la cafeína, la ciencia y la cultura en torno a la droga más popular del mundo*. Fondo de Cultura Económica, Distrito Federal, México. 534 pp.
- Wright, G.A., D.D. Baker, M.J. Palmer, D. Stabler, J.A. Mustard, E.F. Power, A.M. Borland y P.C. Stevenson. 2013. *Caffeine in floral nectar enhances a pollinator's memory of reward*. Science 339: 1202-1204. <https://doi.org/10.1126/science.1228806>.
- Yun-Soo, K., H. Uefuji, S. Ogita y H. Sano. 2006. *Transgenic tobacco plants producing caffeine: a potential new strategy for insect pest control*. Transgenic Research 15: 667-672. <https://doi.org/10.1007/s11248-006-9006-6>.
- Zheng, J., H. Chen, Q. Yang, Z. Zhou, C. Yang, J. Huang, Q. Tu, H. Wu, P. Qiu, W. Huang, W. Shi, M. Chen, H. Liu, J. Shen y S. Tang. 2024. *Association of coffee consumption and caffeine metabolism with arrhythmias and cardiac morphology: an observational, genetic and mendelian randomization study*. Heart Rhythm 27: S1547-5271(24)03631-2. <https://doi.org/10.1016/j.hrthm.2024.11.047>.

Semblanza de los autores

- **Dr. Alexander Lopeztegui-Castillo.** Licenciado en Biología, Maestro en Ciencias en Ecología Marina y Acuicultura; Doctor en Ciencias Marinas (CICIMAR-IPN). En estancia posdoctoral SECIHTI en CIBNOR. <https://orcid.org/0000-0002-2235-4788>.
- **Dra. Guadalupe Fabiola Arcos Ortega.** Licenciatura en Biología con Mención Honorífica, UNAM, México, Maestría en Genética, Université de Montpellier, Francia, Doctorado en el CIBNOR con premio a la Mejor Tesis Doctoral en WAS-San Salvador, Brasil (2003). Postdoctorado en Bioquímica y Biología Molecular, CICY, Yucatán, México. Investigadora Titular C, SNII-2, miembro del Núcleo Académico del Posgrado CIBNOR-SECIHTI y Programa de Acuicultura. <https://orcid.org/0000-0002-6098-3569>.
- **Elizabeth Margarita Zavala García.** Lic. en Psicología; doble especialidad en psicología clínica infantil y organizacional. Entrenamiento sobre autismo y TDAH, duelo infantil y vigilancia e intervención temprana del neurodesarrollo. Diplomado en psicoterapia infantil. Participaciones en el XXIV Simposium Mundial de Liderazgo, 5to Congreso Nacional de Estimulación Temprana, y 1er Congreso Nacional de Terapia de Juego y Educación Especial. <https://orcid.org/0009-0005-4981-2071>.
- **Dr. José Manuel Mazón Suástegui.** Mención Honorífica Cum-Laude (2005) y Premio Antoni Caparrós (2006) a la Mejor Tesis Doctoral de la Universitat de Barcelona, España. Premio Karl-Heinz Holtschmit a la Trayectoria Académica (WAS-SOMEXACUA, 2022). Investigador Titular C, SNII-3. Miembro del Núcleo Académico del Posgrado CIBNOR-SECIHTI. Responsable Académico del Laboratorio de Homeopatía Acuícola y Semillas Marinas PAC-CIBNOR. <https://orcid.org/0000-0003-4074-1180>.

**Cita**

Lopeztegui-Castillo, A., G.F. Arcos-Ortega, E.M. Zavala-García y J.M. Mazón-Suástegi. Efectos de dosis masivas y homeopáticas de cafeína en organismos vivos, y su nivel de conocimiento social en La Paz, México. Recursos Naturales y Sociedad, 2025. Vol. 11 (3): 309-348. <https://doi.org/10.18846/renaysoc.2025.11.11.03.0018>.

Sometido: 1 de septiembre de 2025

Aceptado: 14 de noviembre de 2025

Editor asociado: Dr. Arturo Sánchez Paz

Editor ejecutivo: Dr. Arturo Sánchez Paz

Diseño gráfico editorial: Ing. Francisca Elizabeth Villegas Carrasco

Fruits, allies of people with diabetes in combating oxidative stress

Las frutas, aliadas de personas con diabetes en el combate del estrés oxidativo

Cynthia Esmeralda Lizárraga Velázquez^{1*}, Irma Lorena Sánchez Humarán¹,
Amada Yerén Escobedo-Lozano¹, Sara Gabriela Reyna Andrade¹

Resumen

La diabetes mellitus es una de las principales causas de muerte en México y su incidencia continúa en aumento. Esta enfermedad se caracteriza por niveles elevados de glucosa en sangre, lo que conduce a un exceso de sustancias oxidantes en el organismo y a un desequilibrio con las defensas antioxidantes naturales. Dicho proceso, conocido como estrés oxidativo, está estrechamente relacionado con la progresión de complicaciones crónicas como la insuficiencia renal, ceguera y enfermedades cardiovasculares. Diversos estudios han demostrado que las frutas son una fuente importante de antioxidantes naturales, como polifenoles y carotenoides, capaces de reducir el daño oxidativo. Por ello, el consumo moderado y regular de frutas frescas y sus jugos sin azúcares añadidos puede contribuir al control del estrés oxidativo y a la mejora de la salud en personas con diabetes.

Palabras clave: Estrés oxidativo, antioxidantes, hiperglucemia.

¹ Tecnológico Nacional de México. Instituto Tecnológico de Mazatlán. Corsario 1, 203 Urías, CP 82070, Ciudad de Mazatlán Sinaloa, México

* Autor de correspondencia: cynthia.lv@mazatlan.tecnm.mx



Abstract

Diabetes mellitus is one of the leading causes of death in Mexico, and its incidence continues to rise. This disease is characterized by elevated blood glucose levels, leading to an excess of oxidizing substances in the body and an imbalance in natural antioxidant defenses. This process, known as oxidative stress, is closely linked to the progression of chronic complications such as kidney failure, blindness, and cardiovascular disease. Several studies have shown that fruits are an important source of natural antioxidants, such as polyphenols and carotenoids, which can reduce oxidative damage. Therefore, moderate and regular consumption of fresh fruits and natural juices without added sugar can help control oxidative stress and improve the health of people with diabetes.

Keywords: Oxidative stress, antioxidants, hyperglycemia.

Diabetes mellitus

La diabetes mellitus es un trastorno metabólico caracterizado por altos niveles de glucosa (azúcar) en la sangre (hiperglucemia). Existen dos tipos de diabetes mellitus. La diabetes mellitus tipo 1 es una enfermedad autoinmune que destruye las células β -pancreáticas (encargadas de producir insulina, la hormona que disminuye el nivel de glucosa en la sangre) y la diabetes mellitus tipo 2 que se caracteriza por una disminución de la secreción de la insulina por las células β -pancreáticas y/o el incremento de la resistencia a la insulina (elevación de la glucosa en sangre) (Tegegne *et al.* 2024).

La diabetes mellitus es la cuarta causa de muerte en el mundo, con alrededor de 2 millones de defunciones cada año. En 2024, se estimó que 589 millones de adultos entre 20 y 79 años vivían con esta enfermedad, y las proyecciones indican que para 2050 la cifra podría aumentar a 852.5 millones (International Diabetes Federation, 2025).

En México, aproximadamente 13.6 millones de personas viven con diabetes, lo que coloca al país en el octavo lugar mundial en número de casos (International Diabetes Federation, 2025). Además, esta enfermedad representa un problema prioritario de salud pública, ya que en el mismo año se posicionó como la tercera causa de muerte en México, con 112 641 defunciones registradas (INEGI, 2024). Del total de pacientes diabéticos en el mundo, se estima que alrededor del 90 % padecen la diabetes mellitus tipo 2. Algunos de los factores de riesgo asociados con la aparición de esta enfermedad son la edad, la obesidad, malos hábitos alimenticios (consumo excesivo de pan dulce,

bebidas azucaradas, frituras, comida rápida, harinas refinadas, y bajo consumo de frutas y verduras), la inactividad física y tener antecedentes familiares de diabetes.

Tener antecedentes familiares de diabetes aumenta el riesgo de desarrollar esta enfermedad, especialmente cuando se combina con otros factores como el incremento de la edad y la inactividad física, los cuales provocan un metabolismo más lento, lo que favorece la acumulación de grasa corporal. Esto, a su vez, incrementa la producción de sustancias inflamatorias que contribuyen al desarrollo de resistencia a la insulina. Además, las personas con obesidad y malos hábitos alimenticios tienden a presentar un exceso de glucosa en sangre, ya que el organismo solo utiliza la cantidad necesaria para obtener energía inmediata (para funciones vitales, actividad física y cerebral). El resto de la glucosa se almacena en el hígado y los músculos en forma de glucógeno; cuando estas reservas se saturan, el exceso de glucosa se transforma en grasa y se deposita en el tejido adiposo como fuente de energía de reserva, lo que también favorece la resistencia a la insulina. En términos generales, todos estos factores de riesgo conducen a un estado de hiperglucemia, que, si no se controla adecuadamente, puede generar estrés oxidativo y favorecer el desarrollo de complicaciones metabólicas.

Diabetes mellitus y estrés oxidativo

Actualmente se sabe que mantener niveles altos de glucosa en la sangre durante mucho tiempo provoca estrés oxidativo, un proceso que está directamente relacionado con la progresión de la diabetes y con muchas de sus complicaciones, como el pie diabético, los infartos, los derrames cerebrales, la insuficiencia renal, la ceguera y la hipertensión, entre otros (Caturano *et al.* 2023).

El estrés oxidativo se presenta cuando el organismo genera una cantidad excesiva de sustancias reactivas (capaces de dañar o alterar las células) y, al mismo tiempo, disminuyen las defensas antioxidantes que normalmente las neutralizan (Caturano *et al.* 2023). De forma natural, estas sustancias reactivas se generan principalmente en las mitocondrias, que son las “fábricas de energía” de las células. Normalmente existe un equilibrio entre la cantidad de sustancias reactivas (oxidantes) y antioxidantes, pero en la diabetes este equilibrio se rompe debido al exceso de glucosa, lo que daña las mitocondrias y, en consecuencia, a las células (Burgos-Morón *et al.* 2019). El sistema circulatorio, en especial las células endoteliales vasculares (células de la pared interna de los vasos sanguíneos) son las más afectadas por el estrés oxidativo en personas con diabetes, lo que provoca inflamación y el desarrollo de complicaciones, como el daño renal, problemas de visión, la afectación de los nervios, las enfermedades del corazón e incluso muerte prematura (Fig. 1). Por



ello, hoy en día existe un creciente interés en el consumo de antioxidantes naturales, ya que pueden ayudar a reducir los efectos del estrés oxidativo en las personas con diabetes. Los antioxidantes naturales se encuentran de manera abundante en frutas, verduras, cereales integrales, legumbres, té e infusiones de plantas, los cuales aportan compuestos como vitaminas (C y E), polifenoles, flavonoides y carotenoides, conocidos por su capacidad para proteger a las células frente al daño oxidativo.

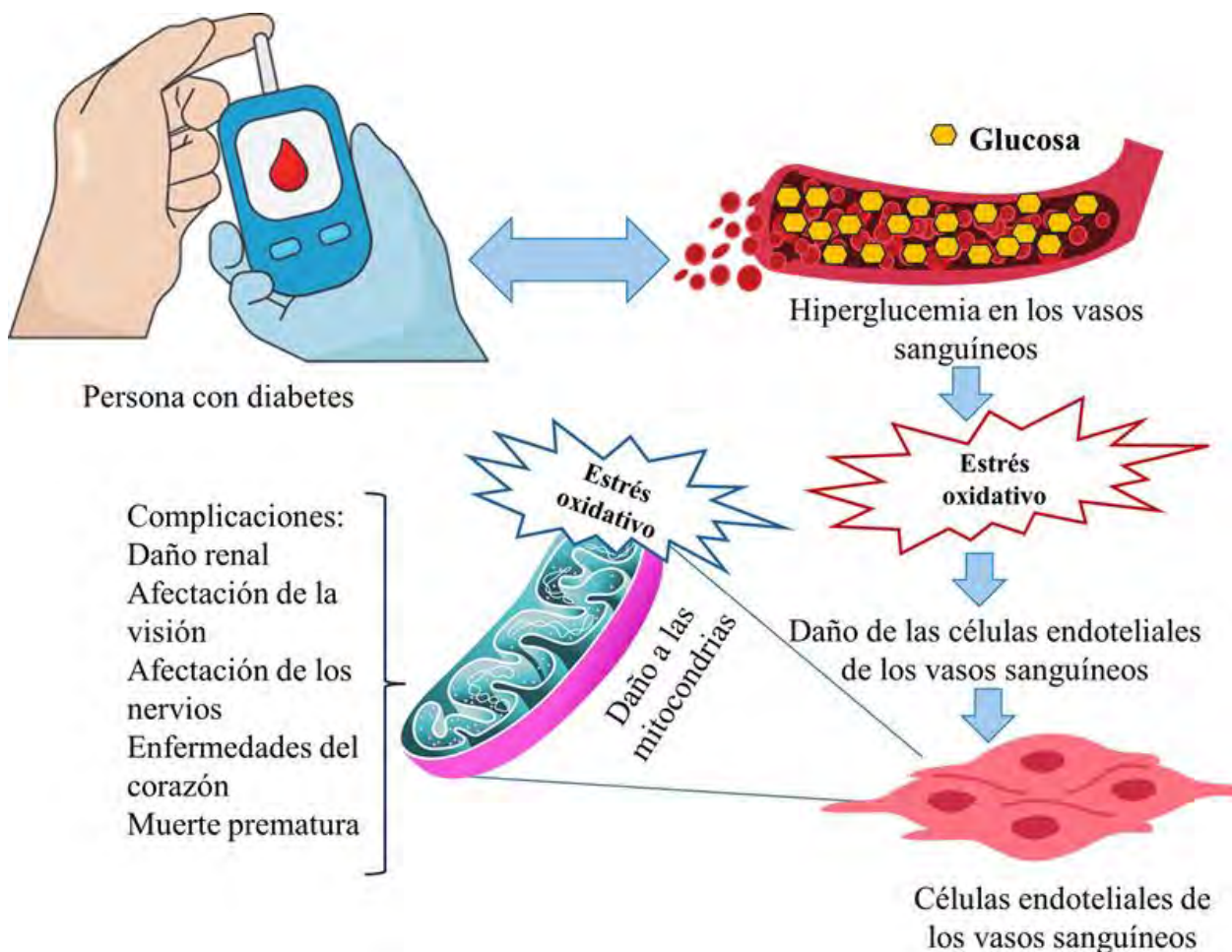


Figura 1. Consecuencias de la hiperglucemia en personas con diabetes.

Las frutas y sus propiedades biológicas

Entre las principales fuentes de antioxidantes naturales se encuentran las frutas, las cuales no solo aportan vitaminas y minerales, sino también una gran variedad de compuestos bioactivos con propiedades antioxidantes, antiinflamatorias, anticancerígenas, antimicrobianas y antihipertensivas, entre otras, que se asocian con importantes beneficios para la salud (Lizárraga-Velázquez *et al.* 2020). Dentro de estos compuestos destacan los polifenoles (como el resveratrol) y los carotenoides (como el β -caroteno), que son los más abundantes y responsables de muchas de

las propiedades mencionadas. En general, las frutas de colores intensos como la guayaba, el tomate, el melón, la naranja, las uvas, las moras, las fresas, las cerezas, la piña, las frambuesas, la papaya, el mango, el kiwi, el durazno, la manzana y el plátano contienen mayores concentraciones de polifenoles y carotenoides.

Por el contrario, las frutas con pulpa de colores más claros presentan cantidades menores de estos compuestos. Incluso, las partes que comúnmente se desechan, como las cáscaras, pueden tener más polifenoles y carotenoides que la pulpa (Tabla 1). Por eso se recomienda consumir las frutas con cáscara siempre que sea posible, como en el caso de la manzana. Los polifenoles y los carotenoides son ampliamente reconocidos por su capacidad para prevenir o reducir el estrés oxidativo, gracias a su estructura química, que les permite neutralizar sustancias oxidantes. Por ejemplo, los polifenoles poseen grupos hidroxilo ($-OH$) que les otorgan esta propiedad, mientras que los carotenoides, por su cadena de dobles enlaces, también actúan como potentes antioxidantes (Fig. 2).

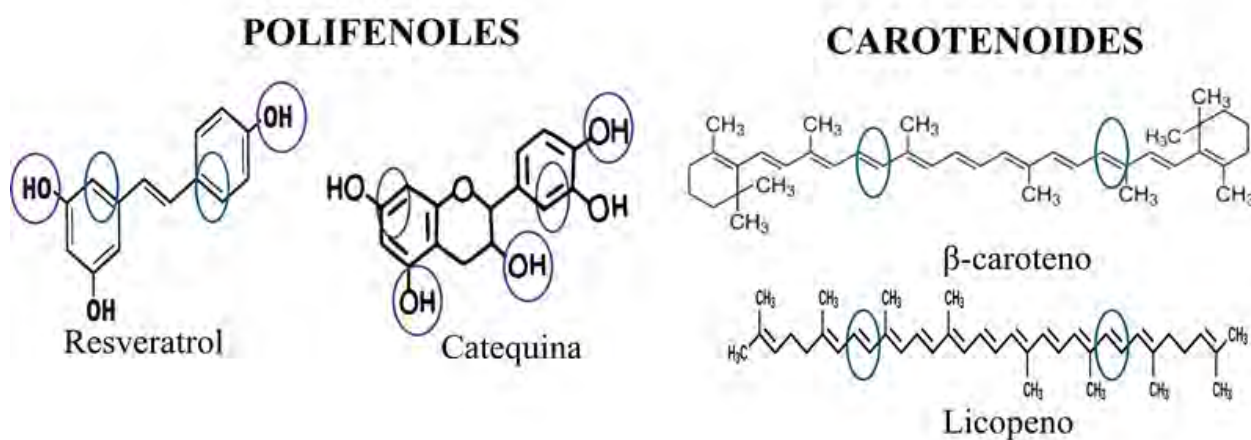


Figura 2. Estructuras químicas de polifenoles y carotenoides.

**Tabla 1.** Contenido de polifenoles y carotenoides (peso fresco) en pulpa y cáscara de diferentes frutas.

Frutas	Polifenoles mg/100 g	Carotenoides µg/100 g	Referencia
<hr/>			
Uva			
Pulpa	9.26 - 62.29	75	Yilmaz et al. 2015
Piel	162.29 - 326.18	99.97	
Naranja			
Pulpa	0.48 - 0.79	4.8–8.9	Park et al. (2014)
Cáscara	1.39 - 1.85	45.57	
Papaya			
Pulpa	37.9 – 217	331.0 – 2147.5	Lara-Abia et al. (2021)
Piel	358.67	1310 -6700	
Plátano			
Pulpa	380	3682	Englberger et al. (2003)
Piel	760	1.62	
Mango			
Pulpa	22.27 - 1550.22	43.09	Anim-Jnr et al. (2025)
Piel	3857 - 7578	510-760	
Manzana			
Pulpa	54-174	<250	Zielińska et al. (2020)
Piel	182-328	~893	

Consumo de frutas y sus beneficios en la población diabética

A menudo, muchas personas con diabetes o prediabetes, e incluso algunos nutricionistas, evitan el consumo de frutas por considerar que aumentan el nivel de azúcar en la sangre. Si bien es cierto que las frutas contienen azúcares naturales, también son una fuente esencial de vitaminas, minerales y compuestos antioxidantes que benefician directamente la salud, especialmente en personas con diabetes tipo 2. Recientemente *Monteiro et al. (2021)* demostraron que el consumo moderado de frutas frescas y sus jugos naturales como uva, manzana, mango, plátano, naranja, pera, ciruela, fresa, moras o durazno no produce efectos negativos en los pacientes diabéticos. Por el contrario, ayuda a reducir los niveles de glucosa en sangre, así como el estrés oxidativo y la inflamación, procesos estrechamente ligados al desarrollo de complicaciones metabólicas.

Un ejemplo interesante es el mango, fruta que suele eliminarse de la dieta por su alto índice glucémico. Sin embargo, se ha comprobado que su consumo puede disminuir el estrés oxidativo a nivel neurológico, gracias a su riqueza en polifenoles y carotenoides (Cázares-Camacho *et al.* 2020). De manera similar, el melón, a pesar de su alto índice glucémico, ha mostrado efectos benéficos al reducir la glucosa en ayunas, el estrés oxidativo y la inflamación en modelos con diabetes inducida. Incluso, en países como Nigeria, el jugo de melón se utiliza tradicionalmente para ayudar al control de la diabetes (Ajiboye *et al.* 2020).

Es importante aclarar que los jugos naturales elaborados con frutas frescas enteras no deben compararse con los jugos comerciales, ya que estos últimos suelen contener azúcares añadidos, los cuales agravan las complicaciones diabéticas. Lo mismo ocurre con las aguas de frutas endulzadas, cuyo consumo no se recomienda en ninguna circunstancia en personas con diabetes.

En conclusión, el consumo moderado y regular de frutas frescas puede contribuir al control del estrés oxidativo y a la disminución de complicaciones asociadas con la diabetes tipo 2, gracias a su contenido de compuestos bioactivos con propiedades antioxidantes (Fig. 3). De esta forma, una alimentación equilibrada, acompañada de actividad física regular, puede convertirse en una herramienta clave para mejorar la calidad de vida de las personas que viven con esta enfermedad. No obstante, antes de realizar cambios significativos en la dieta, es fundamental que cada persona consulte a su médico o nutriólogo, ya que las necesidades nutricionales pueden variar según su estado de salud y tratamiento.

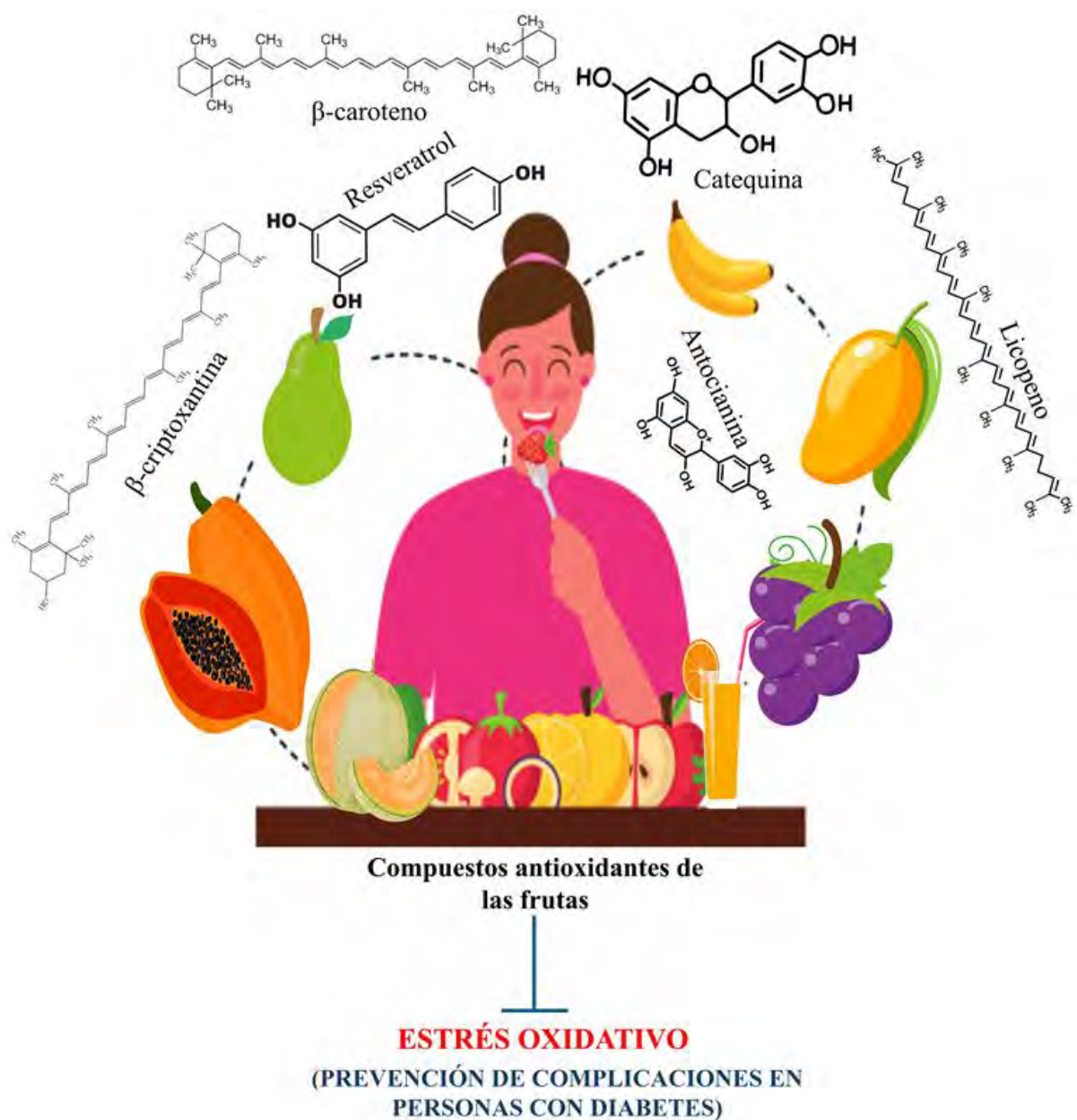


Figura 3. Mecanismo de prevención de complicaciones de la diabetes por consumo de frutas.

Consideraciones finales y perspectivas

Aunque el consumo de frutas ha demostrado ofrecer beneficios relevantes para las personas con diabetes, en especial por su capacidad para reducir el estrés oxidativo y aportar compuestos bioactivos, aún persisten ideas erróneas que llevan a evitar su inclusión en la dieta. La evidencia científica señala que las frutas frescas, consumidas en porciones adecuadas y dentro de un plan alimenticio equilibrado, no solo son seguras, sino que pueden actuar como aliadas en el control glucémico y en la prevención de complicaciones de la diabetes. En cuanto a los jugos de frutas, es

importante distinguir entre los jugos naturales preparados con fruta fresca entera que conservan antioxidantes beneficiosos y los jugos comerciales o las aguas de frutas endulzadas, cuyo consumo no se recomienda por su alto contenido de azúcares añadidos. Sin embargo, todavía existen vacíos de conocimiento sobre el impacto específico de distintos jugos naturales (sin azúcares añadidos) en el estrés oxidativo, la regulación de la glucosa y el manejo de la obesidad en personas con diabetes tipo 2.

Por ello, se requieren investigaciones que evalúen no solo el efecto de cada fruta y de sus jugos naturales en diferentes etapas de la enfermedad, sino también su interacción con otros hábitos saludables, especialmente la actividad física y los patrones dietéticos de cada región. Estas líneas de investigación permitirán diseñar estrategias integrales de prevención y manejo de la diabetes. En conjunto, estas perspectivas contribuirán a mejorar las recomendaciones nutricionales y a promover un aprovechamiento más efectivo de los antioxidantes presentes en las frutas, con el fin de favorecer la salud y la calidad de vida de las personas con diabetes.

Literatura citada

- Ajiboye, B.O., M.T. Shonibare y B.E. Oyinloye. 2020. *Antidiabetic activity of watermelon (Citrullus lanatus) juice in alloxan-induced diabetic rats*. Journal of Diabetes & Metabolic Disorders 19: 343-352.
- Anim-Jnr, A.S., S.B.Y. Ishaq, P. Sasu, S. Gyimah, H.M.R. Greathead, C. Boesch y M.N. Emmambux. 2025. *Valorising mango, cashew apple, and papaya by-products for sustainable small ruminant production in low-income food deficit countries—a review*. Frontiers in Sustainable Food Systems 9: 1529837.
- Burgos-Morón, E., Z. Abad-Jiménez, A. Martínez de Marañón, F. Lannantuoni, I. Escribano-López, S. López-Doménech, C. Salom, A. Jover, V. Mora, I. Roldan, E. Solá, M. Rocha, y V.M. Víctor. 2019. *Relationship between oxidative stress, ER stress, and inflammation in type 2 diabetes: the battle continues*. Journal of clinical medicine 8 (9): 1385.
- Caturano, A., M. D'Angelo, A. Mormone, V. Russo, M. P. Mollica, T. Salvatore y F.C. Sasso. 2023. *Oxidative stress in type 2 diabetes: impacts from pathogenesis to lifestyle modifications*. Current Issues in Molecular Biology 45(8): 6651-6666.



- Cázares-Camacho, R., J.A. Domínguez-Avila, H. Astiazarán-García, M. Montiel-Herrera y G.A. González-Aguilar. 2021. *Neuroprotective effects of mango cv. 'Ataulfo' peel and pulp against oxidative stress in streptozotocin-induced diabetic rats*. Journal of the Science of Food and Agriculture 101 (2): 497-504.
- Englberger, L., I. Darnton-Hill, T. Coyne, M.H. Fitzgerald y G.C. Marks. 2003. *Carotenoid-rich bananas: a potential food source for alleviating vitamin A deficiency*. Food and Nutrition Bulletin 24 (4): 303–318.
- International Diabetes Federation. 2025. *IDF Diabetes Atlas* (11th ed.). Brussels, Belgium: International Diabetes Federation. Disponible en <https://diabetesatlas.org>. (consultado el 18-julio-2025).
- Lara-Abia, S., G. Lobo-Rodrigo, J. Welte-Chanes y M.P. Cano. 2021. *Carotenoid and carotenoid ester profile and their deposition in plastids in fruits of new papaya (Carica papaya L.) varieties from the Canary Islands*. Foods 10 (2): 434.
- Lizárraga-Velázquez, C.E., N. Leyva-López, C. Hernández, E.P. Gutiérrez-Grijalva, J.A. Salazar-Leyva, I. Osuna-Ruiz, E. Martínez-Montaña, J. Arrizon, A. Guerrero, A. Benítez-Hernández y A. Ávalos-Soriano. 2020. *Antioxidant molecules from plant waste: Extraction techniques and biological properties*. Processes 8 (12): 1566.
- Monteiro-Alfredo, T., B. Caramelo, D. Arbeláez, A. Amaro, C. Barra, D. Silva, S. Oliveira, R. Seica y P. Matafome. 2021. *Distinct impact of natural sugars from fruit juices and added sugars on caloric intake, body weight, glycaemia, oxidative stress and glycation in diabetic rats*. Nutrients 13 (9): 2956.
- Park, J.H., M. Lee y E. Park. 2014. *Antioxidant activity of orange flesh and peel extracted with various solvents*. Preventive nutrition and food science 19 (4): 291.
- Tegegne, B.A., A. Adugna, A. Yenets, W. Yihunie-Belay, Y. Yibeltal, A. Dagne y T.K. Zeleke. 2024. *A critical review on diabetes mellitus type 1 and type 2 management approaches: from lifestyle modification to current and novel targets and therapeutic agents*. Frontiers in Endocrinology 15, 1440456. En: https://www.inegi.org.mx/app/tabulados/interactivos/?px=Mortalidad_04&bd=Mortalidad (consultado el 22/07/2025).
- Yilmaz, Y., Z. Göksel, S.S. Erdoğan, A. Öztürk, A. Atak y C. Özer. 2015. *Antioxidant activity and phenolic content of seed, skin and pulp parts of 22 grape (Vitis vinifera L.) cultivars (4 common and 18 registered or candidate for registration)*. Journal of Food Processing and Preservation 39 (6): 1682-1691.

Zielińska, D. y M. Turemko. 2020. *Electroactive phenolic contributors and antioxidant capacity of flesh and peel of 11 apple cultivars measured by cyclic voltammetry and HPLC–DAD–MS/MS*. Antioxidants 9 (11): 1054.

Semblanza de los autores

- 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 sinaloense. 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 peces y desarrollo de alimentos funcionales.
- La **Dra. Irma Lorena Sánchez Humarán** es Profesora Titular “C” Tiempo completo adscrita al Departamento de Ingeniería Química y Bioquímica en el Tecnológico Nacional de México Campus Mazatlán (TNM Campus Mazatlán) desde 1988. Tiene un Doctorado en Educación, una Maestría en Ciencias e imparte cursos en la Carrera de Ingeniería Bioquímica (Microbiología, Bioquímica, Microbiología de Alimentos y Bioquímica del Nitrógeno). Ha dirigido 43 tesis de licenciatura. Ha desempeñado funciones como jefa de la carrera de Ing. Bioquímica, secretaria de Academia, y actualmente es Jefa del Laboratorio de Especialidades y Coordinadora de la carrera de Ing. Bioquímica en TecNM Campus Mazatlán. Ha presentado proyectos a nivel Nacional en el ámbito de la microbiología, sistemas de calidad y verificación y Diagnóstico de Normas Oficiales Mexicanas, entre otros.



- La **M. C. Sara Gabriela Reyna Andrade** obtuvo su grado de Maestría en Ciencias en 2016 en el Centro de Investigación en Alimentación y Desarrollo unidad Mazatlán, con especialidad en Acuicultura. Actualmente es docente de la carrera de Ingeniería Bioquímica en asignaturas enfocadas a proyectos y jefa del departamento de Ingeniería Química y Bioquímica en el Instituto Tecnológico de Mazatlán. Con experiencia en innovación y desarrollo de productos en la industria alimentaria.

Cita

Velázquez, C.E., I.L. Sánchez Humarán, A.Y. Escobedo-Lozano y S.G. Reyna Andrade. Las frutas, aliadas de personas con diabetes en el combate del estrés oxidativo. Recursos Naturales y Sociedad, 2025. Vol. 11 (3): 350-361. <https://doi.org/10.18846/renaysoc.2025.11.11.03.0019>.

Sometido: 8 de septiembre de 2025

Aceptado: 20 de noviembre de 2025

Editor asociado: Dr. Arturo Sánchez Paz

Editor ejecutivo: Dr. Arturo Sánchez Paz

Diseño gráfico editorial: Ing. Francisca Elizabeth Villegas Carrasco

Mollusks as Living Habitats:
The Importance of Epibiosis for Diversity in Marine Environments

Los moluscos como hábitats vivos: la importancia de la epibiosis sobre la diversidad en los ambientes marinos

Luis Gabriel Aguilar-Estrada¹, Nataly Quiroz-González², Elisa Serviere-Zaragoza^{3*}

Resumen

La epibiosis es una interacción ecológica en la que un organismo se adhiere (epibionte) a otro organismo (basibionte) sin tener una dependencia trófica, dicha interacción ha sido estudiada sobre todo en vertebrados como tortugas, peces y mamíferos, pero se ha estudiado poco con basibiontes invertebrados o vegetación marina. En México existen pocos estudios enfocados a investigar esta interacción ecológica. El objetivo del trabajo es describir diversas relaciones ecológicas en el ambiente marino, las cuales son importantes para la diversidad biológica que depende de la 'arquitectura' de los moluscos, en particular la epibiosis. Los moluscos son buenos sustratos para diferentes especies, dado que este tipo de superficies probablemente les sirva para aumentar sus modos de dispersión o lugares de alimentación, dada la movilidad de los basibiontes. Así mismo los basibiontes son lugares que resguardan una gran biodiversidad, ya que representan un hábitat alternativo para que diferentes organismos marinos puedan desarrollarse, evidenciando la importancia de esta interacción para los litorales marinos.

Palabras clave: Comensalismo, Epibiontes, Interacciones ecológicas, Mollusca, Sustrato.

¹ Estancia Posdoctoral SECIHTI, Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste, S.C. (CIBNOR), Calle IPN #195, Playa Palo de Santa Rita Sur, La Paz, B.C.S. 23096, México.

² Facultad de Ciencias, Universidad Nacional Autónoma de México, Circuito Exterior s/n, 04510, Ciudad de México, México.

³ Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste (CIBNOR), Calle IPN #195, Playa Palo de Santa Rita Sur, La Paz, B.C.S. 23096, México.

* Autor de correspondencia: serviere04@cibnor.mx



Abstract

Epibiosis is an ecological interaction in which one organism (epibiont) attaches to another organism (basibiont) without trophic dependence. This interaction has been studied primarily in vertebrates such as turtles, fish, and mammals, but has received little attention in invertebrate basibionts or marine vegetation. Few studies in Mexico have focused on investigating this type of ecological interaction. The objective of this work is to describe various ecological relationships in the marine environment that are important for the biological diversity that depends on the 'architecture' of mollusks, particularly epibiosis. Mollusks are good substrates for different species, as these surfaces likely serve to increase their dispersal routes or feeding sites, given the mobility of basibionts. Likewise, basibionts harbor a high level of biodiversity, as they represent an alternative habitat for different marine organisms to develop, highlighting the importance of this interaction for marine coastlines.

Keywords: Commensalism, Epibionts, Ecological interactions, Mollusca, Substrate.

Los moluscos en el litoral

En las vacaciones de verano, la llamada del mar suele ser irresistible, impulsándonos a sumergirnos sin más en el agua. Sin embargo, la playa es mucho más que sol, arena y olas. Al detenerse por un instante, se revela un espacio dinámico, donde la marea y el oleaje esculpen el paisaje rocoso, desde gigantescos acantilados hasta la roca más pequeña acumulada en la orilla. Es en este sitio, a menudo ignorado, donde existe una vida fascinante: allí se dan diversas relaciones ecológicas importantes.

Relaciones bióticas

Dentro de las comunidades marinas, las relaciones entre los organismos se categorizan según sus efectos mutuos. Consideramos un efecto positivo (+) cuando una especie obtiene un beneficio de su interacción con otra, nulo (0) si la interacción no implica ni beneficio ni perjuicio para una especie, y negativo (-) cuando una o ambas especies sufren un perjuicio al relacionarse (Fig. 1). En el ambiente marino, el comensalismo surge como una relación para evitar la competencia por espacio donde

una especie, el epibionte o comensal, obtiene beneficios significativos de la otra, el basibionte o anfitrión, sin causarle ni daño ni beneficio apreciable. El término proviene del latín *cum mensa*, que significa “compartiendo la mesa”. Un ejemplo clásico es el de las rémoras y tiburones: Las rémoras se adhieren al cuerpo del tiburón para ser transportadas (beneficio de transporte) y se alimentan de los restos de la comida del tiburón, en este caso el tiburón no se beneficia ni se perjudica. Es como encontrar un aventón gratuito en el vasto océano: el epibionte aprovecha la movilidad del basibionte, y puede viajar de forma gratuita a diferentes sitios y el viaje continúa sin que el basibionte se inmute por la presencia del acompañante. Los ejemplos más notables del comensalismo son muy importantes en los ambientes marinos: metabiosis, tanatocresia, forosis y epibiosis (Mathis y Bronstein, 2020).



Figura 1. Ejemplar de *Gracilaria* creciendo sobre concha de bivalvo (Foto Nataly Quiroz).

Más allá de la vida y la muerte: la metabiosis y la tanatocresia

La naturaleza es un lugar dinámico donde los seres vivos no están aislados y se relacionan con el sitio donde viven y con otras especies, las relaciones ecológicas pueden extenderse incluso más allá del ciclo de vida de una especie. Dos fenómenos fascinantes que llaman mucho la atención son la metabiosis y la tanatocresia, las cuales revelan cómo la existencia y la ausencia de un organismo pueden moldear el destino de otras especies.

Metabiosis: Un Legado de hogar

La metabiosis, cuyo nombre quiere decir "vida posterior" o "vida a través de otra", describe una relación indirecta donde un organismo utiliza las estructuras o los productos de otros organismos, una vez que estos últimos hayan muerto, para su propio beneficio. Imagina un cangrejo ermitaño diminuto que está buscando un nuevo hogar (Fig. 2). En lugar de construir su propio refugio, lo que hace este crustáceo astuto es encontrar un sitio en la concha vacía de un caracol marino que ha fallecido. La existencia del caracol, aunque terminada, provee un recurso muy importante para la supervivencia del cangrejo ermitaño, protegiéndolo de depredadores, la desecación y otras condiciones ambientales. Esto es de manera similar a cuando una persona hereda una casa a un familiar.



Figura 2. Cangrejos ermitaños utilizando diferentes objetos como refugio (Composición Gabriel Aguilar) [Fotos: Ictioter.es, iNaturalist.com, peces.com.mx, iieh.com, El País.com].

Los cangrejos ermitaños carecen de caparazón y tienen un abdomen blando, débilmente calcificado y enrollado en espiral, lo mantienen oculto dentro de las conchas vacías de caracoles con las que pueden protegerse, aunque a veces pueden utilizar esponjas y diversos grupos de corales o anémonas (Ingle, 1993).

Un pequeño porcentaje de cangrejos ermitaños usan conchas de almejas y conchas colmillo de elefante (moluscos escafópodos), huecos de madera o fragmentos huecos de roca, mientras que otros viven en lugares inmóviles proporcionados por tubos de gusanos poliquetos o caracoles verméticos (Williams y McDermott, 2004).

En el momento en el que los cangrejos ermitaños sufren la metamorfosis, deben localizar rápidamente un sitio que les sirva de refugio, que por lo general es una concha vacía de un caracol de tamaño apropiado (Harvey y Colasurdo, 1993). Luego de que han encontrado este lugar y a medida que crecen, tienen que buscar conchas más grandes, ya que si no las encuentran, se vuelven más vulnerables a la depredación (Angel, 2000).

En situaciones donde las conchas son de varios tamaños y de diferentes formas, los cangrejos que las van a utilizar pueden detectar las variaciones en estas características y modificar su comportamiento (Hazlett, 1996). Para los cangrejos ermitaños, los estudios sobre la biología del comportamiento muestran que el tamaño de las conchas ocupadas está relacionado con el tamaño del cangrejo, indicando la presencia de un proceso de evaluación durante la selección de la concha (Hazlett, 1981). De esta forma, cuando un cangrejo ermitaño inspecciona una concha de caracol vacía, utiliza información visual y la información proveniente de receptores táctiles e incluso información resultante de experiencias pasadas con las conchas, mientras decide si entra en ella o no (Elwood y Stewart, 1985; Hazlett, 1992, 1996).

La obtención de la concha de molusco se da generalmente por dos vías, por intercambio con otros cangrejos o al encontrar un molusco herido o muerto (Pezzuti, 2002); sin embargo la selección de la concha involucra preferencias individuales relacionadas con la forma, talla y color, que le van a brindar al cangrejo ermitaño protección y capacidad para sobrevivir (Mantelatto *et al.*, 2007). Por otro lado, la preferencia en el uso de la concha estará determinada también por factores ambientales y la disponibilidad de ésta en los ambientes marinos (Turra y Leite, 2003).

La disponibilidad de la concha es un factor limitante para algunas especies de cangrejos ermitaños, ya que al disminuir ésta se verá afectada su abundancia. Dentro de los factores limitantes de la distribución y abundancia de los cangrejos ermitaños están la depredación de los moluscos, la cantidad de conchas desocupadas por parte de otros cangrejos ermitaños, así como la calidad y la cantidad de las conchas disponibles (Wilber, 1990). El anterior es un ejemplo clásico de metabiosis, pero el fenómeno se extiende a muchas otras situaciones en el ambiente marino. Algunos ejemplos similares incluyen el uso de fragmentos de basura dejada en el mar, como latas de refresco, vasos



de plástico, trozos de coco o fragmentos de conchas, que son utilizados de forma ingeniosa por los pulpos para construir escondites (Alcaraz *et al.*, 2015).

Las esponjas del género *Cliona* son comensales de ciertos moluscos (Kovac, 1975). No se ha descrito que estas esponjas perforadoras sean muy específicas del hospedador y pueden encontrarse habitando cavidades que excavan en corales, conchas de moluscos vivos, conchas vacías y rocas de carbonato de calcio (Cobb, 1969).

Otros ejemplos los encontramos en los moluscos que pueden vivir en los huecos dejados por ramas rotas o árboles muertos en las zonas de manglares como los ostiones o mejillones. También, los moluscos pueden depositar sus huevos en los restos de animales fallecidos como los corales, consiguiendo un lugar seguro para sus huevos y posteriores larvas.

En la metabiosis se destaca la manera en cómo la muerte de un organismo no necesariamente marca el final de su existencia y nos muestra el inicio de su influencia en el ecosistema y la vida de otras especies. Sus restos pueden convertirse en un recurso valioso, facilitando la vida de otros animales marinos y contribuyendo al reciclaje de nutrientes en el medio ambiente.

Tanatocresia: el uso de la muerte

La tanatocresia, que literalmente significa "uso de la muerte", es un concepto estrechamente relacionado a la metabiosis pero con un matiz distintivo. En la tanatocresia, un organismo vivo utiliza el cuerpo o los restos de un organismo muerto para obtener algún tipo de beneficio, que puede ser refugio, protección, soporte o incluso una herramienta.

Volviendo al ejemplo del cangrejo ermitaño, el uso de la concha vacía de caracol no solo le proporciona un hogar (metabiosis) sino también una protección móvil contra depredadores. Esta función defensiva es un aspecto clave de la tanatocresia.

Otro ejemplo fascinante es el de algunos moluscos que constituyen sitios de vivienda sobre los esqueletos de las ballenas. Estos restos no solo proporcionan una estructura de soporte y lugar donde vivir, sino que también pueden atraer a otros organismos carroñeros, que a su vez pueden convertirse en presas para los moluscos.

Incluso algunas especies de bivalvos pueden utilizar los troncos muertos de árboles caídos en zonas de playa como las almejas del género *Teredo*, que utilizan como lugar para vivir, aprovechando la

estructura física del organismo fallecido para su propio crecimiento. Esto mismo ocurre con algunas almejas del género *Lithophaga* que pueden perforar diferentes estructuras dejadas por organismos ya fallecidos como los corales o conchas de moluscos (Fig. 3).



Figura 3. Moluscos bivalvos del género *Teredo* viviendo dentro de madera (Composición Gabriel Aguilar) [Fotos: colombia.inaturalist.org, idscaro.net].



Un legado continuo

Tanto la metabiosis como la tanatocresia nos recuerdan que las relaciones que se pueden dar en la naturaleza son complejas y a menudo sorprendentes. La muerte, lejos de ser un punto final aislado, puede ser un punto de partida para nuevas relaciones entre los seres vivos. Estos fenómenos resaltan la eficiencia y el reciclaje de nutrientes en los ecosistemas, donde incluso los restos de la vida pasada contribuyen al sustento y la supervivencia de la vida presente. Al comprender estas relaciones sutiles, obtenemos una apreciación más profunda de la intrincada red que une a todos los seres vivos, en vida y más allá.

Compartiendo la mesa... ¿o era el viaje?

La foresis es un tipo de comensalismo, donde el basibionte ofrece un medio de transporte (Fig. 4) para otra especie como beneficio principal (Burton 1969), ya sea de forma permanente o como un elemento característico y esencial en su ciclo vital (Henry, 1966).



Figura 4. Ejemplares de *Chiton articulatus* con macroalgas sobre su concha (Composición Gabriel Aguilar) [Fotos: Isabel Bieler].

Cuando el tamaño de los organismos lo permite, la foresis puede transportar a organismos fotosintéticos o heterótrofos. Un solo basibionte puede llevar consigo a varios "pasajeros" o "viajeros" (Kane et al., 2008). En los poliplacóforos, se ha observado que a medida que crecen, pueden albergar diversas y variadas especies de macroalgas en su superficie, transportándolas a lo largo del litoral mientras se desplazan sobre las rocas en busca de refugio o alimento (Quiroz-González et al., 2020).

En las zonas de playa donde existen rocas, la superficie es más estable. Es aquí donde un grupo muy especial de caracoles muy parecidos a un gorrito chino (las lapas), muestran un comportamiento llamado “homing”, en el que regresan repetidamente a la misma área después de alimentarse (Blackford, 1971). Al igual que los quitones, las lapas pueden transportar de forma temporal o permanente a diferentes grupos de algas e invertebrados, ya que el “homing” puede verse como la rutina de ir a comer a un mismo restaurante solo que no siempre se va con los mismos amigos o familiares. En estas rocas, las lapas dejan una marca o cicatriz que se forma por la presión ejercida por estos moluscos al entrar en contacto con la roca, creando un pequeño hundimiento que coincide con la forma de su concha. Este fenómeno se denomina “home scars” (Cook *et al.*, 1969). Volviendo a la idea de compartir la mesa en un restaurante, sería como regresar a este lugar para pedir y comer siempre en la misma mesa junto a la ventana. Este comportamiento proporciona una protección adicional contra depredadores y condiciones ambientales (Little y Kitching, 1996).

Todos los organismos que van sobre un quitón o una lapa se benefician del transporte, lo que les permite desplazarse pequeñas o grandes distancias con poco esfuerzo y acceder a restos de comida del anfitrión. De igual modo, existen algunos crustáceos diminutos como los anfípodos o isópodos que pueden vivir sobre las conchas de moluscos vivos e incluso en las hendiduras donde se encuentra el cuerpo del caracol. En estos espacios, pueden encontrar protección contra depredadores y un ambiente estable sin afectar la alimentación o el bienestar del molusco. El comensalismo ilustra así la intrincada red de dependencias en los ecosistemas marinos, donde las oportunidades y los recursos son a menudo aprovechados de maneras sutiles y aparentemente neutrales, lo que contribuye a la complejidad y la biodiversidad de estos importantes entornos.

Un rascacielos submarino

Imagina un edificio submarino, una estructura viva y compleja donde cada superficie disponible se convierte en el hogar para otra. Este es, en esencia, el mundo en el que se desarrolla la epibiosis, un fenómeno ecológico muy importante, en el cual organismos vivos se asientan y crecen sobre la superficie de otros seres vivos. La palabra, de origen griego (“epi” que significa “sobre” y “bios” que significa “vida”), describe una relación ecológica muy común, que se encuentra en todos los océanos del planeta (Fig. 5). Esta se puede observar desde las gélidas aguas polares hasta los vibrantes arrecifes tropicales o las costas rocosas (Wahl, 1989).



Figura 5. Comunidades de macroalgas e invertebrados en Santa Elena, Oaxaca (Foto Nataly Quiroz).

Pero, ¿quiénes son los protagonistas de esta historia de "inquilinos" y "anfitriones"? En el papel de anfitriones, encontramos una asombrosa diversidad de seres marinos: desde organismos lentos o aquellos que se encuentran firmemente anclados como rocas vivientes, tales como los corales, esponjas, mejillones y hasta las imponentes conchas de las ostras espinosas (Fig. 6). También están las criaturas que se pueden mover con mayor facilidad como crustáceos, ballenas o tortugas marinas, las cuales pueden convertirse en sustrato para otros organismos.



Figura 6. Moluscos bivalvos con crecimientos de macroalgas (Foto Gabriel Aguilar).

Y dentro de los inquilinos, los epibiontes, organismos que son colonizadores de muchos y variados sitios, son igualmente distintos. Podemos encontrar diminutas algas unicelulares formando películas resbaladizas, balanos y percebes aferrándose con tenacidad a un sustrato, coloridos hidroides y briozoos que parecen pequeños helechos marinos, gusanos poliquetos tubícolas construyendo intrincadas moradas de carbonato de calcio y moluscos que pueden conformar grandes cúmulos en rocas, algas o pastos marinos.

Un universo de interacciones

La epibiosis no se trata simplemente de ver quien está encima de quien. La forma en cómo se relaciona el epibionte (inquilino) y el basibionte (anfitrión) pueden ser complejas y tener diversas consecuencias.

La epibiosis, la colonización de una superficie viva por animales o plantas sésiles (Wahl *et al.*, 1997), es un fenómeno muy común en ambientes marinos, observándose en diversos lugares, como estructuras de cultivo de moluscos, cascos de barcos y diferentes entornos sólidos como los muelles o las rocas en los litorales, incluso en conchas de diferentes moluscos que permiten la fijación de organismos (Acosta *et al.*, 2021). Las conchas pueden estar cubiertas por numerosas especies de epibiontes que compiten por el sustrato o ser colonizadas por varias especies que cubren casi por completo la superficie de la concha del molusco (Martins *et al.*, 2014).

Los moluscos marinos son protagonistas de esta interacción en ambos sentidos, es decir, podemos observar animales, algas, bacterias o foraminíferos viviendo sobre conchas de moluscos, o de forma inversa, moluscos adheriéndose a la superficie de algas, pastos marinos, las intrincadas raíces de los mangles o sobre otros animales, tanto vertebrados como invertebrados.

Un mundo en miniatura con grandes implicaciones

La epibiosis desempeña un papel muy importante en los ecosistemas marinos, tiene implicaciones respecto a la biodiversidad, ya que las superficies colonizadas por los epibiontes aumentan la complejidad estructural del ambiente, creando nuevos microhábitats que pueden albergar a una mayor diversidad y cantidad de especies. Un simple mejillón cubierto de algas o percebes se convierte en un pequeño universo para otros organismos. Respecto al flujo de energía y nutrientes en los ecosistemas, los epibiontes pueden alterar la cantidad y disponibilidad de estos, ya que las algas epizoicas que se encuentran adheridas a las conchas de los moluscos contribuyen a la producción primaria.



La epibiosis puede servir como un indicador ambiental, ya que la composición y abundancia de las comunidades epibiontes pueden ser sensibles a cambios ambientales como la contaminación, la temperatura o la acidificación del océano, convirtiéndolos en valiosos indicadores de la salud de los ecosistemas marinos. Por último, la epibiosis puede tener implicaciones económicas significativas, ya que la acumulación de organismos en estructuras artificiales sumergidas como barcos, plataformas petrolíferas y tuberías de gas o combustible, muelles o puertos puede causar enormes pérdidas económicas debido al aumento de la fricción, la corrosión y los costos de limpieza.

Una gota de conocimiento y un océano por descubrir: a lo que hemos llegado

Se sabe que la epibiosis marina es un fenómeno común y diverso en las costas de México, abarcando una amplia gama de organismos que se adhieren a diferentes sustratos vivos y no vivos. Sin embargo, el estudio de la epibiosis en México, aunque creciente, aún tiene áreas que requieren mayor investigación.

Se han realizado estudios en los vertebrados, al evaluar a los epibiontes de tortugas marinas (golfina, Carey y laúd), manatíes y cocodrilos en diversas regiones del litoral mexicano, tanto en el Pacífico como en el Golfo de México y el Caribe. Estos estudios han identificado principalmente crustáceos (especialmente balanos) como los epibiontes dominantes.

Se han investigado las comunidades de epibiontes en diversos grupos de invertebrados como caracoles y almejas y en raíces de mangle rojo. Estos estudios han revelado una rica diversidad de algas epizoicas, así como de invertebrados sésiles como ascidias, esponjas, briozoos y moluscos.

Se han realizado estudios para identificar y catalogar las especies de macroalgas epizoicas presentes en diferentes regiones del Pacífico y el Atlántico mexicano, incluyendo su distribución y los sustratos donde se encuentran. Estos estudios resaltan la importancia de los moluscos como sustratos vivos, ya que los quitones y los caracoles funcionan como hábitats para una considerable diversidad de algas.

Lo que aún necesita más atención

Se necesita una comprensión más profunda de las interacciones ecológicas de manera más específica entre los epibiontes y sus basibiontes en México. Esto incluye investigar los posibles beneficios o perjuicios sutiles para el basibionte, la competencia entre epibiontes y el papel de la epibiosis en la dinámica de las comunidades marinas.

Debe de estudiarse también la variabilidad regional y temporal, donde la epibiosis puede cambiar significativamente entre diferentes regiones geográficas de México y a lo largo del tiempo debido a factores ambientales. Se necesitan más estudios que exploren esta variabilidad espacial y temporal para comprender mejor los patrones de distribución y abundancia de los epibiontes en los litorales de México.

El impacto del cambio climático y la contaminación son factores importantes a considerar, por lo que es crucial investigar cómo estos factores afectan a las comunidades de epibiontes y sus interacciones con sus basibiontes en las costas mexicanas. Esto se relaciona con las especies basibiontes menos estudiadas: La mayoría de los estudios se han centrado en ciertos grupos de organismos como quitones y caracoles. Por ello, se necesita ampliar la investigación a otras especies hospedadoras menos estudiadas como los bivalvos y otros invertebrados para obtener una visión más completa de la epibiosis en los ecosistemas marinos de México.

El estudio de la epibiosis marina en México ha avanzado, proporcionando información valiosa sobre las especies involucradas y algunos aspectos de sus interacciones. Sin embargo, aún existen importantes áreas de oportunidad para poder ampliar nuestro conocimiento sobre estas relaciones ecológicas, lo que puede requerir un esfuerzo continuo para comprender de forma más amplia la ecología de este fenómeno en los litorales de México.

Perspectivas de la vida sobre la vida, que va más allá de la muerte

A medida que nuestros océanos enfrentan cambios sin precedentes, comprender la dinámica de la epibiosis se vuelve aún más crucial. Investigar cómo los cambios en la temperatura, la acidificación y la contaminación afectan las interacciones entre epibiontes y sus basibiontes ayudará a predecir y mitigar los impactos en la biodiversidad y la funcionalidad de los ecosistemas marinos.

La próxima vez que observes una roca cubierta de moluscos o un alga con pequeños invertebrados adheridos, recuerda que estás presenciando un fascinante mundo de interrelaciones, una historia de vida sobre vida que continúa desarrollándose, yendo más allá de la muerte en los vastos y misteriosos océanos de nuestro planeta. La epibiosis marina es un recordatorio constante de la intrincada red de la vida y la asombrosa capacidad de los organismos para encontrar un hogar, incluso en los lugares más inesperados.



Literatura citada

- Acosta, V., E. Jiménez-Ramos, A. y Vallera-Véliz. 2021. *Epibionts in artificial collectors*. Brazilian Journal of Animal and Environmental Research. 4 (4): 5457-5476.
- Alcaraz, G., C. E. Chávez-Solís, K. Kruesi. 2015. *Mismatch between body growth and shell preference in hermit crabs is explained by protection from predators*. Hydrobiologia. 743:151-156.
- Angel, J. E. 2000. *Effects of shell fit on the biology of the hermit crab Pagurus longicarpus (Say)*. Journal of Experimental Marine Biology and Ecology. 243 (2):169-184.
- Blackford, S. 1971. *A Study of Homing Behavior in the Limpet Siphonaria alternata*. Biological Bulletin. 141(3): 449-457.
- Burton, M. 1969. *Animal partnerships*. Frederic Warne and Co. New York, E. U. A. 107 pp.
- Cobb, W.R. 1969. *Penetration of calcium carbonate substrates by the boring sponge, Cliona*. American Zoologist. 9 (3): 783-790.
- Cook, A., O.S. Bamford, J.D.B. Freeman, y D.J. Teideman. 1969. *A study of the homing habit of the limpet*. Animal Behaviour. 17(2): 330-339.
- Elwood, R. y A. Stewart. 1985. *The timing of decisions during shell investigation by the hermit crab Pagurus bernhardus*. Animal Behavior. 33 (2): 620-627.
- Harvey, A. W. y E. A. Colasurdo. 1993. *Effects of shell and food availability on metamorphosis in the hermit crabs Pagurus hirsutiusculus (Dana) and Pagurus granosimanus (Stimpson)*. Journal of Experimental Marine Biology and Ecology. 165 (2):237-249.
- Hazlett, B.A. 1981. *The behavioral ecology of hermit crabs*. Annual Review of Ecology and Systematics. 12: 1-22.
- Hazlett, B. A. 1992. *The effect of past experience on the size of shells selected by hermit crabs*. Animal Behaviour. 44 (2): 203-205.
- Hazlett, B. A. 1996. *Assessments during shell exchanges by the hermit crab Clibanarius vittatus: the complete negotiator*. Animal Behaviour. 51 (3):567-573.
- Henry, S. 1966. *Symbiosis. Volume 1*. Academic Press. New York, E. U. A. 478 pp.
- Ingle, R. 1993. *Hermit crabs of the northeastern Atlantic Ocean and Mediterranean Sea: An illustrated key*. Chapman and Hall. New York, E. U. A 495 pp.
- Kane, E. A., P. A. Olson, T. Gerrodette, y P. C. Fiedler. 2008. *Prevalence of the commensal barnacle Xenobalanus globicipitis on cetacean species in the eastern tropical Pacific Ocean, and a review of global occurrence*. Fishery Bulletin. 106 (4): 395-404.

- Kovac, J. D. 1975. *A review of commensalism*. Ms. Thesis, University of Houston. E. U. A. 70 pp.
- Little, C., y Kitching, J. A. (1996). *The biology of rocky shores*. Oxford University Press. Oxford, 256 pp.
- Martins, G. M., J. Faria, M. Furtado y A. I. Neto. 2014. *Shells of Patella aspera as 'islands' for epibionts*. Journal of the Marine Biology Association of the United Kingdom. 94 (5): 1027-1032.
- Mantelatto, F. L., R. Biagi, A.L. Meireles y M. A. Scelzo. 2007. *Shell preference of the Hermit Crab Pagurus exilis (Anomura:Paguridae) from Brazil and Argentina: a comparative study*. Revista de Biología Tropical. 55 (1): 153-161.
- Mathis, K. A. y J. L. Bronstein. 2020. *Our current understanding of commensalism*. Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics. 51 (1): 167-189.
- Pezzuti, J. C., A. Turra, F. P., y P. Leite. 2002. *Hermit crab (Decapoda, Anomura) attraction to dead gasteropod baits in an infralitoral algae bank*. Brazilian Archives of Biology and Technology. 45 (2): 245-250.
- Quiroz-González, N., L. G. Aguilar-Estrada, I. Ruiz-Boijseauneau y D. Rodríguez. 2020. *Biodiversidad de algas epizoicas en el Pacífico tropical mexicano*. Acta Botánica Mexicana. 127: e1645.
- Turra, A. y F. P. P. Leite. 2003. *The molding hypothesis: linking shell use with hermit crab growth, morphology and shell-species selection*. Marine Ecology Progressive Series. 265: 155-163.
- Wahl, M. 1989. *Marine epibiosis. I. Fouling and antifouling: some basic aspects*. Marine Ecology Progress Series. 58 (1/2): 175-189.
- Wahl, M., M. E., Hay y P. Enderlein. 1997. *Effects of epibiosis on consumer-prey interactions*. Hydrobiologia. 355: 49-59.
- Wilber, T. P. Jr. 1990. *Influence of size and damage on shell selection by the hermit crab Pagurus longicarpus*. Marine Biology. 104: 31-39.
- Williams, J. D., y J. J. McDermott. 2004. *Hermit crab biocoenoses: a worldwide review of the diversity and natural history of hermit crab associates*. Journal of Experimental Marine Biology and Ecology. 305 (1): 1-128.

**Cita**

Aguilar-Estrada Luis Gabriel , Nataly Quiroz-González y Elisa Serviere-Zaragoza. Los moluscos como hábitats vivos: la importancia de la epibiosis sobre la diversidad en los ambientes marinos. Recursos Naturales y Sociedad, 2025. Vol. 11 (3): 363-378. <https://doi.org/10.18846/renaysoc.2025.11.11.03.0020>.

Sometido: 20 de junio de 2025

Aceptado: 28 de noviembre de 2025

Editor asociado: Dra. Crisalejandra Rivera Pérez

Editor ejecutivo: Dra. Crisalejandra Rivera Pérez

Diseño gráfico editorial: Ing. Francisca Elizabeth Villegas Carrasco

