



RECURSOS NATURALES Y SOCIEDAD



REVISTA DIGITAL DE DIVULGACIÓN CIENTÍFICA


CONAHCVT
CONSEJO NACIONAL DE INVESTIGACIONES CIENTÍFICAS Y TECNOLÓGICAS


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-CONAHCYT)**, Centro Público de Investigación de **CONAHCYT**, 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 Lic. Gerardo R. Hernández García 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. Crédito Fotografía Portada: Colección CIBNOR

Editorial

Recursos Naturales y Sociedad
2024, Vol. 10 (2): V-VIII,
<https://doi.org/10.18846/renaysoc.2024.10.10.02.0000>

En esta edición de *RECURSOS NATURALES Y SOCIEDAD*, presentamos un mosaico de conocimiento que explora la riqueza y complejidad de los sistemas naturales y su relación con nuestras sociedades. Desde los suelos terrestres hasta las profundidades del océano, estos diez artículos nos invitan a reflexionar sobre los retos y oportunidades que enfrentamos para garantizar un futuro más equilibrado y sostenible.

Abrimos este número con el selenio, un elemento esencial cuya naturaleza dual como “espada de doble filo” resalta la necesidad de monitorear nuestros recursos naturales para proteger la salud humana y animal. En otro extremo, se nos recuerda que los pequeños actores, como la chinche de piedra, pueden tener un impacto enorme en la salud pública al ser vectores de enfermedades como el mal de Chagas.

La biotecnología y la genómica se posicionan como aliados clave en la gestión sustentable de recursos, tal como lo demuestran los avances en la camaricultura y el cultivo de perlas de abulón. Ambos artículos subrayan el poder de la ciencia aplicada para equilibrar la productividad económica con la conservación de especies en peligro.

En la narrativa de las especies marinas, encontramos el desafío y la esperanza en la almeja mano de león, cuya historia de recuperación nos invita a pensar en soluciones colaborativas para superar barreras ambientales y sociales. Del mismo modo, el análisis de los efectos de la acidificación de los océanos sobre los corales subraya la urgencia de proteger estos ecosistemas marinos vitales.

La atención se dirige posteriormente al suelo, un recurso a menudo subestimado, donde hongos y oomicetos actúan como agentes de equilibrio o disrupción en las interacciones planta-microorganismo. Este equilibrio es clave para la salud agrícola y la biodiversidad.



En tierra firme, las propuestas de conservación ecológica en las Sierras de Parras y La Paila destacan cómo los enfoques locales pueden ofrecer soluciones frente a desafíos ambientales globales. A medida que exploramos el impacto de actividades humanas como la extracción de agua, se hace evidente la necesidad de armonizar la conservación con el desarrollo.

La transición energética también encuentra su espacio en esta edición, con un análisis prometedor sobre la bioturbosina como alternativa para reducir el impacto ambiental del transporte aéreo, una industria crucial pero intensiva en carbono.

Finalmente, los descubrimientos sobre los residuos del agua de jamaica nos recuerdan el potencial de los recursos tradicionales, desafiándonos a reconsiderar cómo percibimos y utilizamos nuestros desechos cotidianos.

Esta edición no solo presenta hallazgos científicos relevantes, sino que también ilumina el camino hacia un futuro donde la colaboración interdisciplinaria y la integración de saberes tradicionales y modernos sean fundamentales para enfrentar los desafíos ambientales, sociales y económicos. ¡Bienvenidos a un recorrido de inspiración y acción!

Sinceramente,

Dr. Crisalejandra Rivera Pérez

Editor Ejecutiva

Dr. José Arturo Sánchez Paz

Editor Ejecutivo

Dr. Alfredo Ortega-Rubio

Editor en Jefe

Invierno 2024

Editorial

Recursos Naturales y Sociedad
2024. Vol. 10 (2): V-VIII,
[https://doi.org/10.18846/
renaysoc.2024.10.10.02.0000](https://doi.org/10.18846/renaysoc.2024.10.10.02.0000)

In this issue of *RECURSOS NATURALES Y SOCIEDAD*, we present a mosaic of knowledge that explores the richness and complexity of natural systems and their relationship with our societies. From the earth's soils to the depths of the ocean, these ten articles invite us to reflect on the challenges and opportunities we face to ensure a more balanced and sustainable future.

We open this issue with selenium, an essential element whose dual nature as a “double-edged sword” highlights the need to monitor our natural resources to protect human and animal health. At the other extreme, we are reminded that small actors, such as the rock bug, can have an enormous impact on public health by being vectors of diseases such as Chagas disease.

Biotechnology and genomics are positioned as key allies in sustainable resource management, as demonstrated by advances in shrimp farming and abalone pearl farming. Both articles underline the power of applied science to balance economic productivity with the conservation of endangered species.

In the narrative of marine species, we find challenge and hope in the lion's hand clam, whose story of recovery invites us to think of collaborative solutions to overcome environmental and social barriers. Similarly, the analysis of the effects of ocean acidification on corals underlines the urgency of protecting these vital marine ecosystems.

Attention then turns to soil, an often underestimated resource, where fungi and oomycetes act as agents of balance or disruption in plant-microorganism interactions. This balance is key to agricultural health and biodiversity.

On land, ecological conservation proposals in the Sierras de Parras and La Paila highlight how local approaches can offer



solutions to global environmental challenges. As we explore the impact of human activities such as water extraction, the need to harmonize conservation with development becomes evident.

The energy transition also finds its space in this edition, with a promising analysis on bioturbosine as an alternative to reduce the environmental impact of air transport, a crucial but carbon-intensive industry.

Finally, discoveries about hibiscus water waste remind us of the potential of traditional resources, challenging us to reconsider how we perceive and use our everyday waste.

This issue not only presents relevant scientific findings, but also illuminates the path towards a future where interdisciplinary collaboration and the integration of traditional and modern knowledge are fundamental to addressing environmental, social and economic challenges. Welcome to a journey of inspiration and action!

Yours sincerely,

Dr. Crisalejandra Rivera Pérez

Executive Editor

Dr. José Arturo Sánchez Paz

Executive Editor

Dr. Alfredo Ortega-Rubio

Editor-in-Chief

Winter 2024

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

Coordinaciones Programas Académicos

Dra. Danitzia Adriana Guerrero Tortolero
Acuicultura

Dr. Alejandro López Cortés
Planeación Ambiental y Conservación

Dra. Crisalejandra Rivera Pérez
Ecología Pesquera

Dr. Luis Guillermo Hernández Montiel
Agricultura Zonas Áridas

Coordinaciones

M. en C. Jesús Alfredo De La Peña Morales
Vinculación, Innovación y Transferencia de
Conocimiento a la Sociedad (COVISTECS)

Dra. Martha Candelaria Reyes Becerril
Programa de Acercamiento de la Ciencia a la
Educación (PACE)

M. en C. Baudilio Acosta Vargas
Coordinación de Atención Interna
Especializada (CATIE)

Ing. Edgar Yuen Sánchez
Unidad de Tecnología de la
Información y Comunicaciones (CUTIC)

Lic. Karla Yahira Mercado Savín
Coordinación de Control y Seguimiento

Titulares Unidades Foráneas

Dr. Raúl López Aguilar
Unidad Guerrero Negro

Dr. Alfonso Nivardo Maeda Martínez
Unidad Nayarit

Dr. Alfredo Arreola Lizarraga
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 Almazán
Subdirectora de Contabilidad

MC. Eliot Iván García Salmerón
Subdirector de Planeación

Lic. Carlos Alberto Félix Ortiz
Subdirector Jurídico

Lic. Cinthya Castro Iglesias
Jefa del Departamento de Extensión y
Divulgación Científica

Lic. Sílvia Yolanda Alzaga Mayagoitia
Jefa del Departamento Eventos

Lic. Ana María Talamantes Cota
Jefa del Centro de Información Biblioteca

Año 10

Número 2

Agosto-Diciembre de 2024

Editorial V

Artículos:

Selenio en la Salud: La espada de doble filo. *Taryn Elizabeth Symon, Daniela A. Murillo Cisneros, Orlando Lugo Lugo, Tania Zenteno Savín* 1

La chinche de piedra y la enfermedad de Chagas. *Jesus Eduardo Arellano Alba, Carlos Angulo, Orlando Lugo Lugo, Taryn Elizabeth Symon, Andrea Carolina Murillo Cisneros, Carlos Palacios Cardiel, Abel Antonio Ramos Vega, Tania Zenteno Savín, Ramón Gaxiola Robles* 17

El nuevo genoma del camarón blanco *Penaeus vannamei* como clave para el mejoramiento de la camaricultura. *Ricardo Pérez-Enríquez, Pavel Galindo-Torres, Oscar E. Juárez* 27

La ciencia detrás de la tecnología para cultivar perlas de abulón: una realidad en América Latina. *Alejandro Rojas-Figueroa, Carlos Angulo, Pedro E. Saucedo* 39

La almeja mano de león: una historia de desencanto y esperanza. *Lluch-Cota, S.E., D.P. Carreño León, P. Cruz Hernández, C. Escobedo Fregoso, C.E. Galindo Sánchez, et al.* 51

Del suelo mexicano a las nubes: panorama de la bioturbosina en México. *Elizabeth Ibarra Lizárraga, David U. Santos Ballardo, Dulce L. Ambriz Pérez*..... 65

Propuesta de conservación ecológica de las Sierras de Parras y la Paila en el Municipio de Parras, México. *Edgar Eduardo Tolentino Armendáriz* 77


Los hongos y oomicetos, habitantes naturales del suelo: ¿Amigos o enemigos de las plantas?. *María Goretty Caamal-Chan, Abraham Loera-Muro, Aarón Barraza, Luis Guillermo Hernández Montiel*..... 89

Más allá de una bebida, revelando el valioso residuo del agua de Jamaica. *Evelyn Regalado-Rentería, Iza F. Pérez Ramírez* 107

La calcificación en los corales y los efectos de la acidificación de los océanos. *Gema R. Cristóbal Mondragón, Angélica Méndez Reséndiz, Gisela E. Rangel Yescas, León D. Islas*..... 119



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



Selenio en la Salud

La espada de doble filo

Selenium in Health: The double-edged sword

Recursos Naturales y Sociedad, 2024. Vol. 10 (2): 01-15. <https://doi.org/10.18846/renaysoc.2024.10.10.02.0001>

Taryn Elizabeth Symon; Daniela A. Murillo Cisneros;
Orlando Lugo Lugo; Tania Zenteno Savín*

Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste. Planeación Ambiental y Conservación. Instituto Politécnico Nacional 195, Playa Palo Santa Rita Sur, La Paz, Baja California Sur, 23096 – México

*Autor de correspondencia: tzenteno04@cibnor.mx; (612) 12-8502



Resumen:

Desde su descubrimiento en 1817, los científicos han luchado por comprender la complejidad del selenio y su aparente naturaleza como espada de doble filo. En uno de sus filos, el selenio es un elemento esencial, necesario para numerosos procesos fisiológicos en humanos y otros animales, por ejemplo, como cofactor en enzimas antioxidantes, la defensa contra metales tóxicos, así como en el metabolismo de la glucosa y las hormonas tiroideas. Por lo tanto, la deficiencia de selenio, puede provocar efectos adversos para la salud del individuo, al grado de afectar la reproducción y la supervivencia en, presumiblemente, todo el reino animal. En el otro filo de la espada, la exposición a concentraciones de selenio por arriba del umbral superior requerido por el individuo y/o la especie, puede rápidamente provocar selenosis, lo que también puede impactar negativamente en la salud y la sobrevivencia del individuo. Debido a la distribución desigual de este elemento en los suelos alrededor del mundo, es necesario establecer principios precautorios y monitoreo continuo de suelos y alimentos. De esta manera, se podrá garantizar que las concentraciones de selenio presentes se encuentran dentro del rango óptimo para su consumo y, así, evitar el lado peligroso de la espada.

Palabras clave: *Antioxidante, deficiencia, selenosis, toxicología, Una Salud*

Abstract:

Since its discovery in 1817, scientists have struggled to understand the complexity of selenium and its apparent nature as a double-sided sword. On one side of the sword, this essential element is required for numerous physiological processes in humans and other animals, including as a cofactor in enzymatic antioxidants, defense against toxic metals, as well as in the

metabolism of glucose and thyroid hormones. Therefore, selenium deficiencies may provoke adverse health of the individual, to the extent of affecting reproduction and survival throughout, presumably, all of the animal kingdom. On the other side of that sword, exposure to selenium concentrations above the upper threshold required by the individual and/or the species, can quickly lead to selenosis, which can also negatively impact the health and survival of the individual. Due to the unequal distribution of this element in soils around the world, it is necessary to establish precautionary principles and continuous monitoring of soils and foods. In this way, it will be possible to ensure that the selenium concentrations present are within the optimal range for its consumption and, thus, avoid the dangerous side of the sword.

Keywords: *Antioxidant, deficiency, One Health, selenosis, toxicology*

¿Qué es el selenio?

Desde el descubrimiento del selenio en 1817 por Jons Jacob Berzelius, un químico sueco (Fig. 1b; Gupta y Gupta, 2017; McNeal y Balistreri, 1989; Tinggi, 2003), se han producido muchos avances en el conocimiento de este metaloide traza (Fig. 1c-i). La palabra 'selenio' deriva del griego "selene", que significa "luna" (Gupta y Gupta, 2017), nombrado así tras la denominación del elemento telurio (del latín "tellus", que significa "tierra") dos décadas antes (Boyd, 2011).

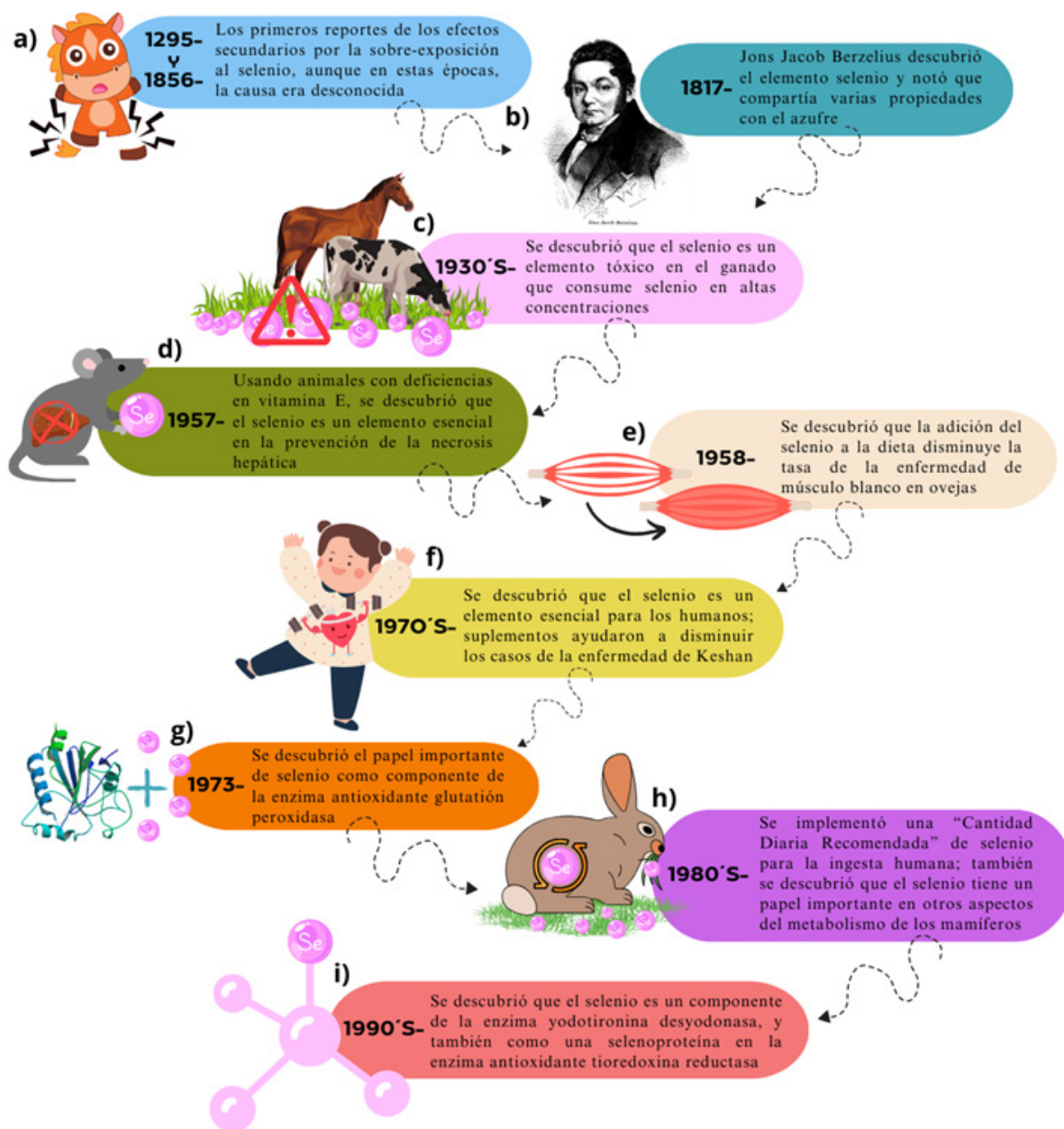


Figura 1. Línea de tiempo de eventos relevantes en el conocimiento de la función del selenio (Ammerman y Miller, 1975; Boyd, 2011; Burk, 2002; Chen *et al.*, 1980; James y Shupe, 1984; Muth *et al.*, 1958; Tinggi *et al.*, 2003).



El selenio es un elemento esencial (requerido por un organismo; **Fig. 1d,f**), de origen natural, que se encuentra dentro de la corteza terrestre en concentraciones variables, dependiendo del tipo de roca; por ejemplo, desde 0.1-0.5 $\mu\text{g g}^{-1}$ en rocas ígneas, hasta 1000 $\mu\text{g g}^{-1}$ en rocas de lutita de la formación *Phosphoria* en América del Norte (Ponton *et al.*, 2020). Entonces, aunque el selenio se encuentra en suelos alrededor del mundo, su distribución es desigual (McNeal y Balistrieri, 1989; Ratti *et al.*, 2006), resultando en regiones con deficiencias (i.e., áreas en Egipto, Francia, India, China) y regiones con sobreabundancia (i.e., áreas en Perú, Chile, EE. UU., Canadá, Australia, China); la concentración promedio de selenio en los suelos a nivel mundial varía entre 0.4-0.5 $\mu\text{g g}^{-1}$ (Gupta y Gupta, 2017; Minich, 2022). El selenio es liberado al ambiente por eventos naturales, incluyendo tormentas, erupciones volcánicas, incendios forestales, erosión de los suelos, así como por influencia antropogénica, incluyendo la quema de combustibles fósiles y productos plásticos (i.e., neumáticos), escorrentía agrícola y urbana, y la minería de metales como la de fosfatos (Boyd, 2011; Gupta y Gupta, 2017; Hamilton, 2004; Mast *et al.*, 2014; Minich, 2022; Ratti *et al.*, 2006). En la industria, el selenio ha sido usado en componentes eléctricos, pinturas, en la fabricación de vidrio (para producir colores rosados y rojos), aceites lubricantes, productos agrícolas, suplementos alimenticios; en aleaciones con bismuto para reemplazar el plomo en la aleación de latón usado en plomería, en productos de belleza, incluyendo champús anticaspa (Boyd, 2011; Gupta y Gupta, 2017; Massiot *et al.*, 2022), e incluso ha sido referenciado en la cultura *pop* para matar organismos extraterrestres en películas de ficción (Wikipedia, 2024).

El selenio existe en el ambiente en cuatro estados naturales inorgánicos de oxidación, selenio(0) (elemental), selenio(-II) (seleniuro), selenio(IV) (selenita), y selenio(VI) (selenato; Bae *et al.*, 2022; Mast *et al.*, 2014; McNeal y Balistrieri, 1989; Ponton

et al., 2020). Pueden ocurrir otros estados dependiendo de cambios en el estado “redox”, los cuales son mediados principalmente por reacciones biogeoquímicas (Ponton *et al.*, 2020). La existencia de alrededor de 50 formas de selenio orgánico (que son formas biodisponibles, y, por ende, propensas a entrar en la cadena trófica) ha llevado a considerarlo como uno de los oligoelementos más complicados en términos de su especiación (Ponton *et al.*, 2020). Para hacer el cuento más complicado todavía, este elemento es regulado bajo control homeostático (Hamilton, 2004; Pieczyńska y Grajeta, 2015), puede bioacumularse y biomagnificarse dentro de la cadena trófica (**Fig. 2**; Luoma y Presser, 2009; Ponton *et al.*, 2020). En muchas especies animales, como los mamíferos marinos y terrestres (incluyendo humanos), la fuente principal de exposición al selenio es a través de la dieta (Gailer, 2007; Rea *et al.*,

2020). Fuentes dietéticas de selenio varían entre especies; por ejemplo, en humanos, la exposición a selenio puede ocurrir a través del consumo de algunos productos agropecuarios (carne, cereales, huevo, verduras y frutas, nueces, productos lácteos, entre otros) y alimentos obtenidos por captura, como pescados y mariscos (Boyd, 2011; Gupta y Gupta, 2017; Pieczyńska y Grajeta, 2015). Después de la ingesta de alimentos, alrededor del 90-95% del selenio orgánico es absorbido por el sistema digestivo (Pieczyńska y Grajeta, 2015), transportado a través del torrente sanguíneo e incorporado a distintos tejidos (Minich, 2022). Entonces, al incorporarse dentro de los sistemas vivos, ¿qué efectos tiene el selenio?

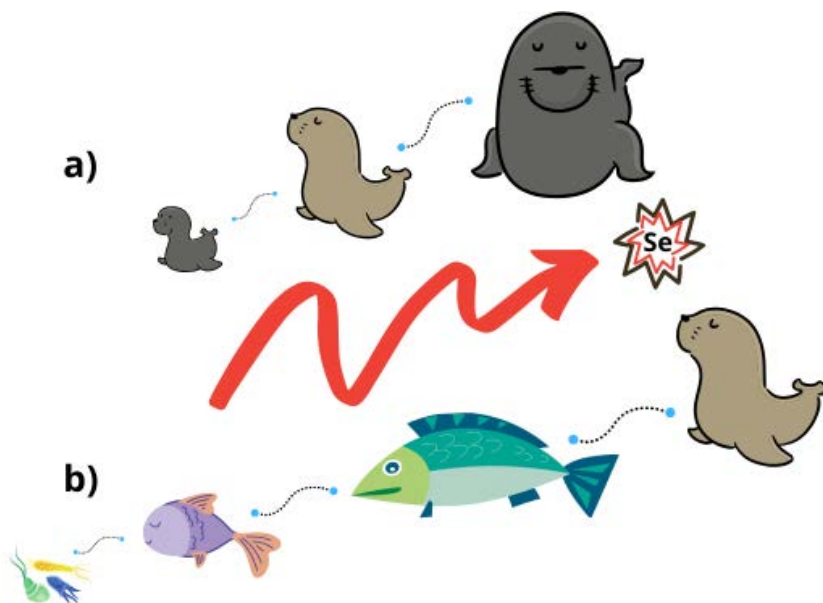


Figura 2. En primera instancia el Selenio (Se) puede ser **a)** bioacumulado (su concentración aumenta con el tiempo (edad) en el mismo individuo), y **b)** biomagnificado (aumenta su concentración con cada nivel trófico) dentro de una cadena trófica (relación entre los consumidores y depredadores en un ecosistema).

Selenio y sus deficiencias

En la década de 1950 se describió por primera vez que, en animales, el selenio es un elemento esencial (**Fig. 1d**) y para finales de los 1970's se describe su importancia para un sano desarrollo en humanos (**Fig. 1f**; Burk, 2002; Tinggi *et al.*, 2003).

Después de consumirlo y tras ser metabolizado, el selenio puede ser utilizado en diversos procesos fisiológicos, como, por ejemplo, cofactor en enzimas antioxidantes, incorporado a proteínas (de las cuales ¡hay más de 100 selenoproteínas en mamíferos!), como defensa contra metales tóxicos, y también tiene un papel importante en el metabolismo de la glucosa y de las hormonas tiroideas, así como en los sistemas endócrino, reproductivo, y nervioso (**Fig. 1c-i**; Boyd, 2011; Dehn *et al.*, 2005; Gailer, 2007; Ikemoto *et al.*, 2004; Pieczyńska y Grajeta, 2015; Rea *et al.*, 2020; Roane *et al.*, 2015; Sinicropi *et al.*, 2010; Taylor *et al.*, 2022). En 1980, investigadores del Instituto de Medicina, parte de la Academia Nacional de Ciencias de los EE. UU, determinaron una “cantidad diaria recomendada” de consumo de selenio en humanos adultos de entre 50 y 200 µg diarios (**Fig. 1h**; Boyd, 2011; Burk, 2002; Gupta y Gupta, 2017; Institute



of Medicine (US), 2000; MacFarquhar *et al.*, 2010). Además, la Organización Mundial de la Salud (WHO por sus siglas en inglés) ha recomendado un consumo variable de selenio en humanos de géneros y etapas de edad diferentes, incluyendo entre 24 y 34 μg de selenio por día en adultos (WHO, 2009). Sin embargo, como mencionamos anteriormente, hay regiones en las que se encuentran bajas concentraciones de este elemento en los suelos, y, por ende, productos agrícolas y forrajes, lo que puede resultar en deficiencias nutricionales de los individuos y las poblaciones que radican en dichas áreas (Gupta y Gupta, 2017). Se pueden producir deficiencias nutricionales de selenio por la ingesta de alimentos con concentraciones inadecuadas, aunque también pueden producirse por trastornos metabólicos, como el transporte y síntesis de selenoproteínas, por interacción con metales, como el mercurio, y como efecto secundario de algunas enfermedades (Lian *et al.*, 2020; Pieczyńska y Grajeta, 2015; Rea *et al.*, 2020).

Adicionalmente, las deficiencias en elementos esenciales pueden resultar en efectos adversos. En el caso del selenio, su deficiencia puede causar trastornos médicos como la enfermedad de Keshan (miocardiopatía infantil), alteraciones reproductivas, aborto espontáneo, reducciones en la respuesta inmune, cambios en las funciones tiroideas, retraso del crecimiento, estrés oxidativo, necrosis del hígado, así como distrofia muscular en algunas especies de ganado, entre otras (Ammerman y Miller, 1975; Boyd, 2011; Burk, 2002; Gupta y Gupta, 2017; Pieczyńska y Grajeta, 2015; Rea *et al.*, 2020; Tinggi *et al.*, 2003). Deficiencias de selenio en humanos pueden ocurrir cuando la ingesta alimenticia es menor de 40 μg por día (Gupta y Gupta, 2017).

Estudio de Caso Sobre las Deficiencias de Selenio

En 1935, una nueva enfermedad apareció en niños de dos a siete años y en mujeres en edad fértil en Keshan provincia de Heilongjiang, China. Bautizada como la enfermedad de

Keshan (**Fig. 1f**), se presentó con síntomas variables, incluyendo dolor corporal, náuseas, pérdida de apetito y vómito, insuficiencia cardíaca congestiva, arritmias cardíacas, fatiga, y en muchos casos, la muerte (Chen *et al.*, 1980; Loscalzo, 2014; Yang *et al.*, 1984).

Aunque la causa era desconocida, surgieron diferentes hipótesis; entre ellas, se atribuyó a una enfermedad infecciosa y a posibles deficiencias alimenticias de molibdeno, magnesio y tiamina (Yang *et al.*, 1984). Sin embargo, no existía un tratamiento, y la mayoría de las personas afligidas por la enfermedad fallecieron (Chen *et al.*, 1980; Yang *et al.*, 1984). Un año más tarde (1936), al completar las autopsias, se observaron signos de enfermedad en el músculo del corazón (miocardio) incluyendo palidez, fibrosis, necrosis, y un agrandamiento cardíaco (Chen *et al.*, 1980; Loscalzo, 2014; Yang *et al.*, 1984). Sin embargo, aún no existía

un tratamiento y, durante los 1940s, el 80% de las personas afectadas por la enfermedad, fallecieron (Yang *et al.*, 1984). Años más tarde, durante la década de 1960, la enfermedad se registró en las provincias de Sichuan y Yunnan (Loscalzo, 2014), forzando a médicos y científicos chinos a buscar una explicación para esta enfermedad. Hacia 1962, concluyeron que existían similitudes morfológicas entre la enfermedad de Keshan (i.e., apariencia física del miocardio) y la enfermedad del músculo blanco reportado en ganado (caballos, vacas, ovejas, cerdos, entre otros) en etapa juvenil (Loscalzo, 2014; Yang *et al.*, 1984), la cual es una enfermedad derivada de la deficiencia de selenio, presentando distrofia y fibrosis (y como consecuencia, una apariencia blanca) del músculo esquelético (Ammerman y Miller, 1975; Delesalle *et al.*, 2017; Löfstedt, 1997; Loscalzo, 2014; Tinggi, 2003). Junto con el descubrimiento en 1957 de que el selenio es un elemento esencial para los animales (**Fig. 1d**; Tinggi, 2003), y tras descubrir en 1958 que su adición a la dieta de ovejas prevenía la enfermedad del músculo blanco (**Fig. 1e**; Muth *et al.*, 1958; Loscalzo, 2014), se realizaron diversos estudios para analizar el estado del selenio en las personas y en algunos alimentos de importancia de origen agrícola (camote, soya, y cereales, incluyendo maíz y arroz) en áreas con personas afectadas y no afectadas por la enfermedad (Chen *et al.*, 1980; Yang *et al.*, 1984). En general, se descubrió que todas las personas que habitaban en las regiones afectadas por la enfermedad de Keshan, así como los alimentos agrícolas producidos en estas regiones, presentaron bajas concentraciones de selenio (Chen *et al.*, 1980; Yang *et al.*, 1984). En promedio, la concentración de selenio en la sangre y cabello fueron significativamente menores en regiones con personas afectadas (0.021 ± 0.001 ppm en sangre y menor de 0.12 ppm en cabello), que en regiones no afectadas (0.095 ± 0.088 ppm en sangre y más de 0.16 ppm en cabello; Yang *et al.*, 1984). De manera similar, las concentraciones

de selenio en maíz y arroz de las zonas afectadas fueron significativamente menores (0.005 ± 0.002 ppm en maíz y 0.007 ± 0.003 ppm en arroz) que en las zonas no afectadas (0.036 ± 0.056 ppm en maíz y 0.024 ± 0.038 ppm en arroz; Yang *et al.*, 1984). En 1965, investigadores del Instituto de Medicina Veterinaria de China sugirieron que, al igual que en otros animales, esta enfermedad en humanos puede responder positivamente a los tratamientos con selenio (Yang *et al.*, 1984), y para 1966 se comenzaron ensayos científicos con selenito de sodio para ver su efecto sobre la enfermedad (Chen *et al.*, 1980). Debido a los resultados positivos, durante 1974 y 1975, se realizaron ensayos médicos usando tratamientos con selenito de sodio y tratamientos placebo en niños entre 1 a 9 años. En el grupo que recibió el placebo (o grupo control), la tasa de prevalencia de la enfermedad de Keshan fue significativamente mayor (9.5/1000) en comparación



con el grupo que recibieron selenito de sodio (1.0/1000; Chen *et al.*, 1980). En 1976 y 1977, todos los niños fueron tratados con selenito de sodio, bajando la tasa de incidencia a 0.32/1000 en 1976, mientras que para 1977 no se presentó ningún caso (Chen *et al.*, 1980). Debido a los buenos resultados, se instauró el uso de suplementos de selenito de sodio como una política de nutrición gubernamental (Loscalzo, 2014). De manera interesante, este estudio de caso representa un ejemplo de “Una Salud”, pues evidencía la interconexión entre la salud del ambiente, la salud de los animales y la salud de los seres humanos (i.e., deficiencias en el selenio ambiental resultaron en deficiencias del mismo elemento en animales y humanos).

Selenio y su sobreabundancia

Aunque el selenio es un elemento esencial que juega un papel fisiológico importante en humanos y otros animales (**Fig. 1**; Burk, 2002; Tinggi, 2003), es una espada de doble filo. El otro filo de la espada refiere a la sobreexposición, que puede resultar en toxicidad, conocida como selenosis (Bechshoft *et al.*, 2020; Roane *et al.*, 2015; Sinicropi *et al.*, 2010). La selenosis fue reconocida inicialmente en la década de los 1930s tras el desarrollo de enfermedades (i.e., ‘enfermedad alcalina’ y ‘tambaleos ciegos’) en ganado de libre pastoreo en áreas con suelos ricos en selenio (**Fig. 1c**; Tinggi, 2003). Afortunadamente, para reducir la probabilidad de experimentar toxicosis por metales, en los organismos (animales y plantas) existe un proceso fisiológico llamado “homeostasis de metales”, que ayuda a regular la concentración de los elementos esenciales, incluyendo el selenio (Roane *et al.*, 2015). Sin embargo, la toxicidad de un elemento depende de diversos factores, incluyendo su ruta de exposición, su persistencia, estado de oxidación, y sus habilidades para bioacumularse y biomagnificarse, además de la especie animal y sus estadios fisiológicos y de madurez (Gerba, 2019; Hall *et*

al., 2023; McNeal y Balistrieri, 1989; Ponton *et al.*, 2020; Roane *et al.*, 2015; Tinggi, 2003). Los efectos tóxicos pueden ocurrir al cambiar la estructura y función de enzimas, ácidos nucleicos y otras moléculas biológicas, así como por la inducción de estrés oxidativo (Gupta y Gupta, 2017; Lian *et al.*, 2020; Presser y Luoma, 2010; Roane *et al.*, 2015). Una vez que se produce la toxicosis por selenio, se observan numerosos efectos adversos que incluyen deformidades durante el desarrollo animal (teratogénesis; p. e., escoliosis y cambios en las estructuras de la cabeza, boca, aletas y branquias), aliento con olor a ajo en humanos, y disminución en las tasas de reproducción, del crecimiento y respuestas inmunes, caída del cabello, decoloración y caída de las uñas, síntomas neurológicos (e. g., dolor de cabeza y pérdida de memoria), dolor muscular y articular, malestar digestivo, fatiga, cirrosis hepática, e incluso la muerte en humanos

y animales (Burk, 2002; Gupta y Gupta, 2017; Hamilton, 2004; Luoma y Presser, 2009; MacFarquhar et al., 2010; Mast et al., 2014).

Se han realizado intentos para determinar a qué concentración el selenio se vuelve tóxico en organismos vivos; sin embargo, estos umbrales aún son controvertidos porque pueden variar según las condiciones tanto ambientales (i.e., distribución no uniforme del elemento; variaciones entre ambientes cálidos vs. fríos, y altitudes elevadas vs. altitudes bajas, etc.), como fisiológicas (i.e., la edad, especie, estado relativo de salud, dieta, etc.; Hamilton, 2004; Pieczyńska y Grajeta, 2015; Ratti et al., 2006; Tinggi, 2003). Sin embargo, para humanos adultos, el umbral de toxicidad establecido por el Instituto de Medicina del EE. UU., establece una concentración superior a 400 µg por día (Boyd, 2011; Gupta y Gupta, 2017; Institute of Medicine (US), 2000; MacFarquhar et al., 2010).

Estudios de Caso Sobre la Toxicidad Por Selenio

Aunque en ese momento se desconocía la causa del padecimiento, los primeros registros históricos de selenosis en ganado, como vacas, caballos, cerdos y pollos, datan del año 1295 cuando Marco Polo informó que las pezuñas de los caballos se caían tras el consumo de “una planta venenosa” en el oeste de China, en una enfermedad que llamó “putrefacción de las pezuñas” (Fig. 1a; James y Shupe, 1984; Tinggi, 2003). Tardarían más de 5 siglos para obtener nuevos registros del padecimiento.

Durante el año 1856 en el puesto militar en South Dakota, conocido como Fort Randall, una cirujana del ejército reportó que los caballos de la caballería militar experimentaban efectos adversos en su salud, incluida la pérdida de la cola, crin y pezuñas, entre otros síntomas, y hasta la muerte del animal (Ammerman y Miller; 1975; Moxon, 1937). Los primeros colonos de las Grandes Llanuras de los Estados Unidos llamaron a esta condición “enfermedad alcalina” pues creían que las aguas o suelos de las

regiones semiáridas con alto contenido de sal (álcali), eran la causa de la enfermedad (Moxon, 1937). No fue sino hasta los 1930s que se determinó que la causa de la enfermedad alcalina era la selenosis (Fig. 1c; Ammerman y Miller, 1975; Moxon, 1937), en vez de la ingestión de aguas y productos de suelos alcalinos.

El diagnóstico de la causa surgió tras la observación de síntomas similares, incluyendo la pérdida de pelo y pezuñas, malformaciones de las pezuñas, cojera, inflamación corporal, emaciación y disminución en las tasas de reproducción, en ganado de pastoreo alimentado con plantas cultivadas en suelos ricos en selenio (James y Shupe, 1984; Tinggi, 2003; Moxon, 1937). Se ha observado que la enfermedad alcalina (i.e., la selenosis) se produce debido a la exposición crónica a plantas y cereales ricos en selenio (5 a 50 mg por kg; James y Shupe, 1984; Tinggi, 2003).

La selenosis no sólo afecta al ganado, peces y aves, sino que también puede provocar



efectos adversos para la salud de los seres humanos.

En 2008, un quiropráctico de Florida, EE. UU., comenzó a notar que varios de sus pacientes presentaban diversos efectos adversos, incluyendo pérdida de cabello (parcial o total) y uñas, decoloración y/o fragilidad de las uñas, dolor muscular, articular y cefalea, malestar gastrointestinal, fatiga, erupciones cutáneas y síntomas neurológicos (p. e., pérdida de memoria; MacFarquhar *et al.*, 2010).

Aunque inicialmente se desconocía la causa, pronto se descubrió que era el resultado del consumo de un suplemento dietético que declaraba contener 200 µg de selenito de sodio por onza líquida (aproximadamente 30 mL) (MacFarquhar *et al.*, 2010). Tras diversas pruebas realizadas por la Administración de Alimentos y Medicamentos de los EE. UU. (FDA por sus siglas en inglés), se encontró que el suplemento realmente contenía un aproximado de 40,800 µg de selenito de sodio por onza líquida (MacFarquhar *et al.*, 2010). Numerosos

pacientes, con la intención de controlar sus síntomas, duplicaron la dosis consumida por día, llegando a consumir desde 3,400 hasta 244,800 µg por día de selenito de sodio (MacFarquhar *et al.*, 2010). Cabe recordar que el umbral toxicológico superior en adultos es de 400 µg por día (Boyd, 2011; Gupta y Gupta, 2017; Institute of Medicine (US), 2000; MacFarquhar *et al.*, 2010); por lo tanto, calculamos que algunos de los pacientes consumieron más de 600 veces la dosis máxima diaria sugerida. Después de realizar una investigación, se determinó que la causa del aumento en la concentración de selenito de sodio en este suplemento era un error por parte de algunos empleados; ello provocó selenosis en más de 200 personas (MacFarquhar *et al.*, 2010).

Perspectivas y Consideraciones:

El selenio es un elemento esencial extremadamente complicado que desempeña muchas funciones en los procesos fisiológicos en los seres vivos. Sin embargo, este elemento también tiene otra cara, ya que tiene la capacidad de volverse tóxico y provocar numerosos efectos adversos para la salud en, presumiblemente, todo el reino animal. Debido a la distribución desigual de este elemento en los suelos del mundo, es necesario establecer principios precautorios y monitoreos continuos de suelos y alimentos para garantizar que las concentraciones de selenio presentes se encuentran dentro del rango óptimo para el subsecuente consumo e incorporación del selenio y así evitar el lado peligroso de la espada. Sin embargo, es evidente que se necesita más investigación para comprender mejor el papel fisiológico (e. g., su incorporación a células, etc.) de este elemento, sus interacciones con otros elementos y en los seres vivos con la finalidad de crear e implementar normatividades para el establecimiento de rangos óptimos de ingesta en personas y animales que habitan regiones con abundancia y deficiencia de selenio.

Agradecimientos:

Al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías (CONAHCYT; Fronteras 2013-01-2305), la Universidad de Texas A&M, y el Society for Marine Mammology (SGIAR; DAMC y TES) por el apoyo financiero. Gracias al biólogo marino Hever Latisnere Barragán por sus sugerencias a la edición del documento. TES es beneficiario de una beca de posgrado de CONAHCYT (número: 802788; CVU: 922584).

Literatura Citada:

- Ammerman, C. B y S. M. Miller. 1975. *Selenium in ruminant nutrition: A review*. Journal of Dairy Science. 58(10): 1561-1577. Doi: [https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(75\)84752-7](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(75)84752-7)
- Bae, Y., N. M. Crompton., N. Sharma., Y. Yuan., J. G. Catalano y D. E. Giammar. 2022. *Impact of dissolved oxygen and pH on the removal of selenium from water by iron electrocoagulation*. Water Research 213: 118159. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.watres.2022.118159>
- Bechshoft, T., Y. Luo., A. M. Bohart., A. E. Derocher., E. S. Richardson., N. J. Lunn y D. G. Pearson. 2020. *Monitoring spatially resolved trace elements in polar bear hair using single spot ablation ICP-MS*. Ecological Indicators 119: 106822. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.106822>
- Boyd, R. 2011. *Selenium stories*. Nature Chemistry 3: 570.
- Burk, R. F. 2002. *Selenium, an antioxidant nutrient*. Nutrition in Clinical Care 5(2): 75-79. Doi: [10.1046/j.1523-5408.2002.00006.x](https://doi.org/10.1046/j.1523-5408.2002.00006.x)
- Chen, X., G. Yang., J. Chen., X. Chen., Z. Wen y K. Ge. 1980. *Studies on the relations of selenium and Keshan Disease*. Biological Trace Element Research 2: 91-107. Doi: [10.1007/BF02798589](https://doi.org/10.1007/BF02798589)
- Dehn, L., G. G. Sheffield., E. H. Follmann., L. K. Duffy., D. L. Thomas., G. R. Bratton., R. J. Taylor y T. M. O'Hara. 2005. *Trace elements in tissues of phocid seals harvested in the Alaskan and Canadian Arctic: Influence of age and feeding ecology*. Canadian Journal of Zoology 83: 726-746. Doi: [10.1139/Z05-053](https://doi.org/10.1139/Z05-053)
- Delesalle, C., M. de Bruijn., S. Wilmink., H. Vandendriessche., G. Mol., B. Boshuizen., L. Plancke y G. Grinwis. 2017. *White muscle disease in foals: Focus on selenium soil content. A case series*. BMC Veterinary Research 13(1): 121. Doi: [10.1186/s12917-017-1040-5](https://doi.org/10.1186/s12917-017-1040-5)



- Gailer, J. 2007. *Arsenic-selenium and mercury-selenium bonds in biology*. Coordination Chemistry Reviews 251: 234-254. Doi:10.1016/j.ccr.2006.07.018
- Gerba, C. P. 2019. *Environmental Toxicology*. pp. 511-540. En: Brusseau. M. L., I. L. Pepper y C. P. Gerba (Eds.). *Environmental and Pollution Science (Third Edition)*. Academic Press. London, Reino Unido. 662pp. Doi: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-814719-1.00028-8>
- Gupta, M y S. Gupta. 2017. *An overview of selenium uptake, metabolism, and toxicity in plants*. *Frontiers in Plant Science* 7: 1-14. Doi: 10.3389/fpls.2016.02074
- Hall, J., S. B. Nash., A. Gautam., H. Bender., B. J. Pitcher., H. McCallum y C. Doyle. 2023. *Persistent organic pollutants and trace elements detected in New Zealand fur seals (long-nosed fur seal; *Arctocephalus forsteri*) from New South Wales, Australia, between 1998 and 2019*. *Science of the Total Environment* 902: 166087. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.166087>
- Hamilton, S. J. 2004. *Review of selenium toxicity in the aquatic food chain*. *Science of the Total Environment* 326: 1-31. Doi: 10.1016/j.scitotenv.2004.01.019
- Ikemoto, T., T. Kunito., H. Tanaka., N. Baba., N. Miyazaki y S. Tanabe. 2004. *Detoxification mechanism of heavy metals in marine mammals and seabirds: Interaction of selenium and mercury, silver, copper, zinc, and cadmium in liver*. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology* 47: 402-413. Doi: 10.1007/s00244-004-3188-9
- Institute of Medicine (US). 2000. *Dietary reference intakes for vitamin C, vitamin E, selenium, and carotenoids*. National Academies Press (US). Washington, Estados Unidos de América. 530 pp. Doi: 10.17226/9810
- James, L. F y J. L. Shupe. 1984. *Selenium poisoning in livestock*. *Rangelands* 6(2): 64-67.
- Lian, M., J. M. Castellini., T. Kuhn., L. Rea., L. Bishop., M. Keogh., S. N. Kennedy., B. Fadely., E. van Wijngaarden., J. M. Maniscalco y T. O'Hara. 2020. *Assessing oxidative stress in Steller sea lions (*Eumetopias jubatus*): Associations with mercury and selenium concentrations*. *Comparative Biochemistry and Physiology, Part C* 235: 108786. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.cbpc.2020.108786>
- Löfstedt, J. 1997. *White Muscle Disease of foals*. *Veterinary Clinics of North America: Equine Practice* 13(1): 169-185. Doi: 10.1016/s0749-0739(17)30262-6
- Loscalzo, J. 2014. *Keshan Disease, selenium deficiency, and the selenoproteome*. *The New England Journal of Medicine*. 370(18): 1756-1760. Doi: 10.1056/NEJMcibr1402199

- Luoma, S y T. S. Presser. 2009. *Emerging opportunities in management of selenium contamination*. Environmental Science and Technology 43: 8483-8487. Doi: <https://doi.org/10.1021/es900828h>
- MacFarquhar, J. K., D. L. Broussard., P. Melstrom., R. Hutchinson., A. Wolkin., C. Martin., R. F. Burk., J. R. Dunn., A. L. Green., R. Hammond., W. Schaffner y T. F. Jones. 2010. *Acute selenium toxicity associated with a dietary supplement*. Archives of Internal Medicine 170(3): 256-261. Doi: [10.1001/archinternmed.2009.495](https://doi.org/10.1001/archinternmed.2009.495)
- Massiot, P., C. Clavaud., M. Thomas., A. Ott., A. Guéniche., S. Panhard., B. Muller., C. Michelin., D. Kerob., A. Bouloc y P. Reygagne. 2022. *Continuous clinical improvement of mild-to-moderate seborrheic dermatitis and rebalancing of the scalp microbiome using a selenium disulfide-based shampoo after an initial treatment with ketoconazole*. Journal of Cosmetic Dermatology 21(5): 2215-2225. Doi: [10.1111/jocd.14362](https://doi.org/10.1111/jocd.14362)
- Mast, M. A., T. J. Mills., S. S. Paschke., G. Keith., J y J. I. Linard. 2014. *Mobilization of selenium from the Mancos Shale and associated soils in the lower Uncompahgre River Basin, Colorado*. Applied Geochemistry 48: 16-27. Doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.apgeochem.2014.06.024>
- McNeal, J. M y L. S. Balistreri. 1989. *Geochemistry and occurrence of selenium: An overview*. pp. 1-13. En: Jacobs, L. W. (Eds). Selenium in agriculture and the environment. ACSESS. Madison, Estados Unidos de América. 233 pp. Doi: <https://doi.org/10.2136/sssaspecpub23.c1>
- Minich, W. B. 2022. *Selenium metabolism and biosynthesis of selenoproteins in the human body*. Biochemistry (Mosc). 87(Suppl 1): S168-S177. Doi: [10.1134/S0006297922140139](https://doi.org/10.1134/S0006297922140139)
- Moxon, A. L. 1937. *Alkali Disease or selenium poisoning*. JAMA 110(24): 2030. Doi: [10.1001/jama.1938.02790240054030](https://doi.org/10.1001/jama.1938.02790240054030)
- Muth, O. H., J. E. Oldfield., L. F. Remmert y J. R. Schubert. 1958. *Effects of selenium and vitamin e on White Muscle Disease*. Science 128: 1090. Doi: [10.1126/science.128.3331.1090](https://doi.org/10.1126/science.128.3331.1090)
- Pieczynska, J y H. Grajeta. 2015. *The role of selenium in human conception and pregnancy*. Journal of Trace Elements in Medicine and Biology 29: 31-38. Doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jtemb.2014.07.003>
- Ponton, D. E., S. D. Graves., C. Fortin., Janz, D., Amyot, M y Schiavon, M. 2020. *Selenium interactions with algae: Chemical processes at biological uptake sites, bioaccumulation, and intracellular metabolism*. Plants 9(4): 1-26. Doi: <https://doi.org/10.3390/plants9040528>



- Presser, T. S y S. N. Luoma. 2010. *A methodology for ecosystem-scale modeling of selenium*. *Integrated Environmental Assessment and Management* 6(4): 685-710. Doi: 10.1002/ieam.101
- Ratti, J. T., A. M. Moser., E. O. Garton y R. Miller. 2006. *Selenium levels in bird eggs and effects on avian reproduction*. *The Journal of Wildlife Management* 70(2): 575-578. Doi: [https://doi.org/10.2193/0022-541X\(2006\)70\[572:SLIBEA\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.2193/0022-541X(2006)70[572:SLIBEA]2.0.CO;2)
- Rea, L. D., J. M. Castellini., J. P. Avery., B. S. Fadely., V. N. Burkanov., M. J. Rehberg y T.M. O'Hara. 2020. *Regional variations and drivers of mercury and selenium concentrations in Steller sea lions*. *Science of the Total Environment* 744: 140787. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.140787>
- Roane, T. M., I. L. Pepper y T.J. Gentry. 2015. *Microorganisms and metal pollutants*. pp. 415-439. En: Pepper, I. L., C. P. Gerba, y T.J. Gentry (Eds.). *Environmental Microbiology* (Third edition). Oxford, Reino Unido. 728 pp. Academic Press. Doi: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-394626-3.00018-1>
- Sinicropi, M. S., D. Amantea., A. Caruso y C. Saturnino. 2010. *Chemical and biological properties of toxic metals and use of chelating agents for the pharmacological treatment of metal poisoning*. *Archives of Toxicology* 84(7): 501-520. Doi: 10.1007/s00204-010-0544-6
- Taylor, S., M. Terkildsen., R. McQuilty., D. Lee., A. Wing-Simpson y R. Gray. *Non-essential heavy metals and protective effects of selenium against mercury toxicity in endangered Australian sea lion (Neophoca cinerea) pups with hookworm disease*. *Environment International* 169: 107521. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.envint.2022.107521>
- Tinggi, U. 2003. *Essentiality and toxicity of selenium and its status in Australia: A review*. *Toxicology Letters* 137(1-2): 103-110. Doi: 10.1016/s0378-4274(02)00384-3
- Wikipedia. 2024. *Evolution (película)*. En: [https://es.wikipedia.org/wiki/Evolution_\(pel%C3%ADcula\)](https://es.wikipedia.org/wiki/Evolution_(pel%C3%ADcula)). (Consultado el 01/02/2024).
- World Health Organization. 2004. *Vitamin and mineral requirements in human nutrition: report of a joint FAO/WHO expert consultation*. World Health Organization, Food and Agricultural Organization of the United Nations. Hong Kong, China. 341 pp.
- Yang, G., J. Chen., Z. Wen., K. Ge., L. Zhu., X. Chen y X. Chen. 1984. *The Role of selenium in Keshan Disease*. pp. 203-231. En: Draper, H. H. (Eds.). *Advances in Nutritional Research*. Springer. Nueva York, Estados Unidos de América. 335 pp. Doi: <https://doi.org/10.1007/978-1-4613-2801-8>

Cita

Symon T.E., D.A. Murillo Cisneros, O. Lugo-Lugo y T. Zenteno-Savín. Selenio en la Salud: La espada de doble filo. Recursos Naturales y Sociedad, 2024. Vol. 10 (2): 01-15. <https://doi.org/10.18846/renaysoc.2024.10.10.02.0001>

Sometido: 09 de abril de 2024

Aceptado: 6 de junio de 2024

Editor asociado: Dra. Angélica Herrera Sepúlveda

Editora ejecutiva: Dra. Crisalejandra Rivera Pérez

Diseño gráfico editorial: Lic. Gerardo Hernández

Portada: pexels-mikebirdy-383559.jpg., De The original uploader was Danieljamescott de Wikipedia en inglés. - Trabajo propio, basado en: Lattice face centered cubic.svg de Baszoetekouw de Wikipedia en inglés Transferido desde en.wikipedia a Commons por Liftarn., BSD, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=1785695>

La chinche de piedra y la enfermedad de Chagas



The Kissing Bug and Chagas Disease

Recursos Naturales y Sociedad, 2024. Vol. 10 (2): 17-26. <https://doi.org/10.18846/renaysoc.2024.10.10.02.0002>

Jesus Eduardo Arellano Alba¹, Carlos Angulo², Orlando Lugo Lugo², Taryn Elizabeth Symon², Andrea Carolina Murillo Cisneros², Carlos Palacios Cardiel², Abel Antonio Ramos Vega², Tania Zenteno Savin², Ramón Gaxiola Robles^{1,2*}.

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

²Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste, S.C. (CIBNOR). Planeación Ambiental y Conservación. La Paz, Baja California Sur, México.

Autor de correspondencia: E-mail: rgaxiolar@cibnor.mx, Tel.: +52 (612) 123-84-00

Resumen

La chinche de piedra es el triatomino de mayor tamaño que habita la república mexicana y es endémico de la región sur de Baja California Sur, México. Es potencial vector de *Trypanosoma cruzi* (*T. cruzi*), parásito causante de la enfermedad de Chagas. La intención de este trabajo es dar a conocer un panorama general de la presencia de la chinche de piedra en la ciudad de La Paz, Baja California Sur, México. La enfermedad de Chagas al cursar de manera crónica, con un amplio periodo silencioso en la fase indeterminada con desarrollo de complicaciones, puede comprometer la vida del paciente.

Palabras clave: *Dipetalogaster maximus*, triatominos, tripanosomiasis americana.

Abstract

The stone kissing bug is the largest triatomine bug inhabiting the Mexican Republic and is endemic to the southern region of Baja California Sur, Mexico. It is a potential vector of *Trypanosoma cruzi* (*T. cruzi*), the parasite that causes Chagas disease.

The intention of this work is to present a general overview of the presence of the stone kissing bug in the city of La Paz, Baja California Sur, Mexico. Chagas disease has a chronic course, with a long silent period in the indeterminate phase with the development of complications, which can compromise the patient's life.

Keywords: *Dipetalogaster maximus*, triatomines, American trypanosomiasis.

Introducción

La enfermedad de Chagas, también conocida como tripanosomiasis americana, es una patología causada por el protozooario *Trypanosoma cruzi* (*T. cruzi*) que puede conducir a la muerte de quien la padece (Murillo-Godínez, 2018). Los mecanismos de transmisión de este parásito hacia el ser humano son variados, pero el mecanismo de transmisión principal es por medio de los triatominos, que son su vector, entre los cuales se encuentra la especie endémica de Baja California Sur, México, *Dipetalogaster maximus* (*D. maximus*) o chinche de piedra, nombre que recibe dado a su característica de refugiarse en las grietas de las rocas (Ryckman y Ryckman, 1967).

Quizá se han formulado la pregunta: ¿qué es un triatomino?

Los triatominos son insectos que se alimentan de sangre (hematófagos) gracias a su probóscide, una estructura anatómica alargada similar a

una trompa, la cual les permite perforar la piel y alimentarse del individuo atacado (Lent y Wygodzinsky, 1979).

Estos insectos son parte del orden Hemiptera, suborden Heteroptera, familia Reduviidae y subfamilia Triatominae.

Existen 156 especies en esta subfamilia, distribuidas en cinco tribus y 18 géneros. La tribu Triatomini está integrada por nueve géneros: *Eratyrus*, *Hermanlenticia*, *Linshcosteus*, *Mepraia*, *Nesotriatoma*, *Panstrongylus*, *Paratriatoma*, *Triatoma* y *Dipetalogaster*. Este último género es monotípico, lo que quiere decir que es constituido por una sola especie, y tal especie (*D. maximus*), endémica de Baja California Sur, es la de interés en este trabajo (Cesaretto *et al.* 2021).

El ciclo biológico de los triatominos está conformado por huevos, etapa ninfal y etapa adulta (Figura 1). Los triatominos (salvo algunas excepciones) comparten una serie de características comunes relativas al desarrollo

en las fases del ciclo biológico que nos permiten abordar su estudio a manera de generalidad.

Los huevos son de color blanco aperlado o grisáceo, según a la especie que correspondan. Conforme maduran, y antes de la eclosión, pueden tornarse rosados o rojizos tenuemente (Lent y Wygodzinsky, 1979).



Figura 1. Ejemplares de *Dipetalogaster maximus*. En el lado izquierdo un ejemplar en estadio adulto y del lado derecho ejemplares en estadios ninfales y huevos.

La etapa ninfal está constituida por cinco estadios. Las diferenciaciones adjudicadas a cada estadio de desarrollo se fundamentan en cambios morfológicos, por ejemplo, el tamaño del insecto o la aparición de primordios alares (Lent y Wygodzinsky, 1979).

Los triatominos en etapa adulta son distinguidos por el desarrollo completo de los órganos genitales, crecimiento de alas y la presencia de órganos fotorreceptores llamados ocelos (Lent y Wygodzinsky, 1979).

Todos los triatominos en etapa ninfal y adulta son hematófagos, y es necesario que el insecto se alimente como mínimo en una ocasión para mudar al estadio o etapa sucesiva.

Por lo tanto, en cualquier etapa son susceptibles a adquirir la infección de *T. cruzi* y transmitir el parásito a los animales de los que se alimentan. La probabilidad de que un triatomino sea infectado con *T. cruzi* incrementará acorde al número de ingestas que realice (Rassi y Marin-Neto, 2010).

***Dipetalogaster maximus* o chinche de piedra**

La chinche de piedra se localiza exclusivamente en la región del Cabo, que abarca desde La Paz hasta Los Cabos, en Baja California Sur (Figura 2) (Lent y Wygodzinsky, 1979). Inicialmente se documentó que su nicho ecológico correspondía a zonas silvestres semidesérticas, refugiándose entre las grietas de las piedras (Jiménez y Palacios, 1999), alimentándose de reptiles y roedores (Ryckman y Ryckman, 1967). Sin embargo, posteriormente se encontraron especímenes en estadio ninfal y adulto en asentamientos humanos de la misma región.

Las viviendas en las que se encontró a *D. maximus* están ubicadas en zonas pedregosas, cercanas a las laderas de los cerros, correspondiendo a las características silvestres de su hábitat, siendo vistas en las paredes interiores de las habitaciones y ocultándose en espacios huecos, favoreciendo así la alimentación a expensas de seres humanos y animales domésticos como los de corral (Jiménez y Palacios, 1999). La presencia de ninfas en los asentamientos humanos puede sugerir un proceso de adaptación en el área en consecuencia, la colonización de la vivienda humana y su permanencia (Vidal-Acosta et al. 2000).

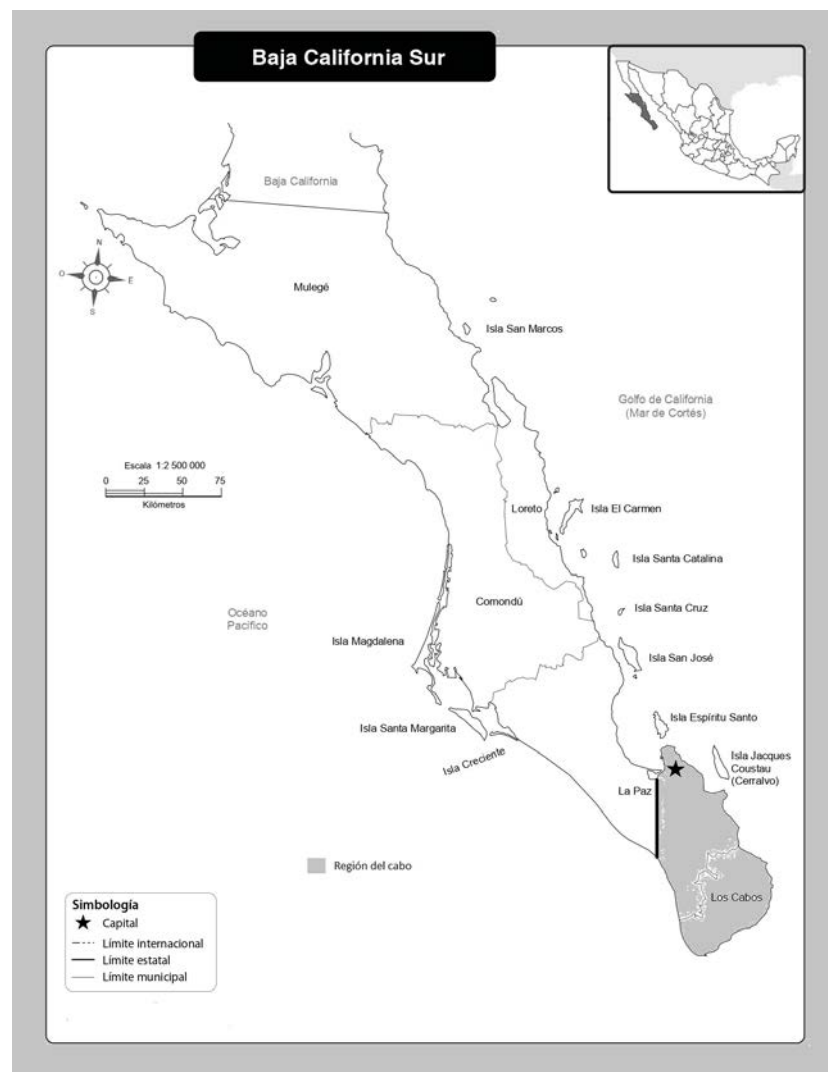


Figura 2. Distribución geográfica de *Dipetalogaster maximus*. Región del Cabo (área sombreada en color gris), Baja California Sur, México.

Dipetalogaster maximus (Figura 3) es considerada como la especie de mayor tamaño entre los triatominos debido a que se han encontrado ejemplares cuyo tamaño en el estadio adulto alcanza hasta los 4.1 a 4.2 centímetros en hembras y 3.3 a 3.5 centímetros en machos (Lent y Wygodzinsky, 1979).

Además, esta especie posee un abdomen plano que aumenta de volumen considerablemente una vez que se alimenta (Nijhout, 1984). Uno de los mecanismos de infección de *T. cruzi* en triatominos, incluido *D. maximus*, es cuando un ejemplar termina de succionar sangre, se ha alimentado y, en consecuencia, ha aumentado el tamaño de su abdomen; ejemplares en estadio ninfal intentan introducir su probóscide en el abdomen de la chinche recién alimentada para obtener la sangre directamente del abdomen. Este comportamiento es conocido como canibalismo (Schaub, 1988). Otro mecanismo de infección observado es cuando un triatomino ingiere las deyecciones (heces) frescas contaminadas con *T. cruzi* de otro triatomino (Silva *et al.* 1992).



Figura 3. *Dipetalogaster maximus* o chinche de piedra comparada con una moneda cuyo diámetro es de 2.1 centímetros.

El periodo de actividad de *D. maximus* corresponde al lapso comprendido de marzo a octubre, siendo más abundantes durante

los meses cálidos de verano y reduciéndose su presencia en tiempo de precipitación. Esta especie ha sido hallada infectada con *T. cruzi* naturalmente (Vidal-Acosta *et al.* 2000) con una tasa general de infección del 7% (Jiménez y Palacios, 1999).

Enfermedad de Chagas

La enfermedad de Chagas recibe su nombre gracias al médico Carlos Chagas, quien describió esta patología en 1909 (Rassi y Marin-Neto, 2010). Según la Organización Mundial de la Salud, entre 6 y 7 millones de personas en América Latina están infectadas por *T. cruzi* siendo endémico en 21 países (Ramos, 2019). Sin embargo, con la migración de habitantes provenientes de áreas endémicas de la enfermedad hacia áreas no endémicas, este panorama epidemiológico está cambiando (Velasco y Morillo, 2020). Se han detectado casos de tripanosomiasis americana en algunos países de Europa, África, el Mediterráneo Oriental

y el Pacífico Occidental (Albajar-Vinas y Jannin, 2011; Bocchi, 2023

¿Cómo se transmite el parásito al ser humano?

Para que la infección de *T. cruzi* en el ser humano sea consumada, es necesario que se dé cumplimiento al ciclo de transmisión.

Distintos mamíferos silvestres conocidos por ser, en ocasiones, reservorios naturales de *T. cruzi*, así como otros animales domésticos si contrajeron la infección (perros, gatos, cobayas), para los triatomino naturalmente no infectados, suponen un riesgo constante para contraer la infección de *T. cruzi* cada vez que obtienen alimento de ellos.

Una vez que el parásito ingresa al triatomino, *T. cruzi* cursa por fases morfológicas diferentes, las cuales le confieren las propiedades requeridas para alcanzar el desarrollo y establecimiento de la infección en el triatomino (Murillo-Godínez, 2018).

El mecanismo de transmisión del parásito hacia el ser humano más frecuente es por medio de la picadura de un triatomino infectado. Para que este mecanismo pueda suscitarse, se requiere que *T. cruzi* se encuentre en la fase de tripomastigote metacíclico, pues esta es su forma infecciosa.

Los triatomino tienden a defecar mientras están alimentándose, y es entonces que junto con las heces, el parásito en su forma infecciosa es expulsado sobre la piel. El parásito ingresa al huésped a través de la boca u ojos o en heridas sobre la piel, estas últimas provocadas por la picadura del triatomino, después es el propio individuo, quien al rascarse instintivamente, esparce las deyecciones parasitadas sobre la herida, permitiendo el ingreso del parásito a través del sitio de lesión (Echeverría y Morillo, 2019).

Existen otras maneras de contraer la infección de *T. cruzi*, entre ellas destacan las siguientes: por medio de la transfusión de sangre infectada con *T. cruzi* hacia un receptor sano, lactancia materna, vía materno fetal, trasplante de órganos infectados e ingesta de alimentos contaminados con heces de triatomino infectado con *T. cruzi* (Angheben et al. 2015).

¿Cómo se manifiesta la enfermedad de Chagas?

Esta enfermedad se divide en tres fases clínicas. La fase aguda inicia en promedio 10 días posteriores a la infección con el parásito. A nivel microscópico es posible observar una alta concentración del parásito en sangre. El cuadro se constituye por fiebre, dolores musculares y articulares, inflamación palpable del hígado y bazo esplénico (Koberle, 1961; Prata, 2001). Característicamente, si el sitio de entrada del parásito fue ocular, el signo clínico de Romaña puede estar presente. El signo de Romaña es descrito como edema de ambos párpados del ojo afectado que se acompaña de inflamación de ganglios linfáticos de la región cervical generalmente (Roveda, 1967).

Si la vía de acceso del parásito es en una herida sobre la piel, tiende a formarse un Chagoma de inoculación, la cual es una lesión subcutánea de característica nodular. Puede presentarse meningoencefalitis, miocarditis o pericarditis sobre todo en aquellos individuos cuyas edades son cercanas a los extremos de la vida. Estas últimas condiciones suelen ser fatales (Koberle, 1961). Esta fase de la enfermedad puede durar desde las 2 semanas hasta los 4 meses (Viotti, 2014). La fase crónica indeterminada continua a la aguda, y puede prolongarse hasta 30 años o toda la vida del individuo afectado (Prata, 2001). Esta fase no presenta manifestaciones clínicas evidentes aunado a una parasitemia baja, por lo que para su diagnóstico los estudios moleculares son los apropiados. No obstante, una vez que se presenta sintomatología en el periodo crónico, comienza la fase crónica sintomática, constituida clínicamente por lesiones en

corazón que condicionan a alteraciones musculares contráctiles del mismo, por lo que puede finalizar en datos de insuficiencia cardiaca según la gravedad de la afectación del órgano. Además, puede presentarse dificultad para respirar y trastornos del ritmo cardiaco que terminan en muerte súbita o en asistolia, causadas por el mismo origen.

El sistema digestivo puede verse dañado notoriamente y presentar megaesófago y megacolon principalmente (Murillo-Godínez, 2018), por lo que la dificultad para tragar alimentos, regurgitación del alimento, dificultad en la digestión, estreñimiento y sensación de distensión abdominal son frecuentes (Koberle, 1961; Prata, 2001).

Conclusión

Esta enfermedad, al cursar de manera crónica con un amplio periodo silencioso en la fase indeterminada, no exime el desarrollo de complicaciones reales que pueden comprometer la vida de quien la padece. La fase aguda, al ser inespecífica, salvo los signos de entrada del parásito, no siempre presentes, obliga a descartarla de otras patologías, sobre todo en aquellos pacientes que desarrollan sus vidas en entornos que son el hábitat de los triatomínicos o que han visitado regiones en donde estos insectos están presentes. En nuestras manos queda mantener una higiene general dentro y fuera de nuestras viviendas, procurando evitar establecer las condiciones ideales para la invasión de estos insectos.

Si en algún momento presentas sintomatología inespecífica, y más particularmente, estuviste o sospechas haber mantenido contacto con triatomínicos así como a la exposición de cualquier otra vía de transmisión, es importante recibir atención médica lo más pronto posible para establecer un protocolo de diagnóstico y terapéutico.

Agradecimientos

A el personal del Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste, S.C. (CIBNOR) involucrados en la consolidación de este trabajo. Jesús Eduardo Arellano Alba es beneficiario de una beca de servicio social en investigación en medicina del Instituto Mexicano del Seguro Social.

Referencias

- Albajar-Vinas, P. and J. Jannin 2011. "The hidden Chagas disease burden in Europe." *Eurosurveillance* **16**(38): 19975.
- Angheben, A., L. Boix., D. Buonfrate., F. Gobbi., Z. Bisoffi., S. Pupella., G. Gandini and G. Aprili. 2015. "Chagas disease and transfusion medicine: a perspective from non-endemic countries." *Blood transfusion* **13**(4): 540.
- Bocchi, E.A. 2023. "Chagas' disease: the hidden enemy around the world." *The Lancet Regional Health—Western Pacific* **31**.
- Cesaretto, N. R., J. de Oliveira., A. Ravazi., F. Fernandez., Yago Visinho., A.B. Bortolozzo., R. Dezan., D. Cesaretto., C. Galvão., M.T. Vilela., J.A. da Rosa y K.C. Chaboli. 2021. "Trends in taxonomy of *Triatomini* (Hemiptera, Reduviidae, Triatominae): reproductive compatibility reinforces the synonymization of *Meccus* Stål, 1859 with *Triatoma* Laporte, 1832." *Parasites & Vectors* **14**(1): 340.
- Echeverria, L.E. and C.A. Morillo. 2019. "American trypanosomiasis (Chagas disease)." *Infectious Disease Clinics* **33**(1): 119-134.
- Jiménez, M.L. y C. Palacios. 1999. "Incidencia de la chinche piedrera (*Dipetalogaster maximus*) (Hemiptera: Heteroptera: Reduviidae) vector de *Tripanosoma cruzi* en zonas urbanas de La Paz, Baja California Sur, México." *Anales del Instituto de Biología serie Zoología* **70**(002).
- Koberle, F. 1961. "Patología y anatomía patológica de la enfermedad de Chagas." *Boletín de la Oficina Sanitaria Panamericana (OSP)*; 51 (5), nov. 1961.
- Lent, H. and P. Wygodzinsky. 1979. "Revision of the *Triatominae* (Hemiptera, Reduviidae), and their significance as vectors of Chagas' disease." *Bulletin of the American museum of Natural History* **163**(3): 123-520.
- Murillo-Godínez, G. 2018. "Enfermedad de Chagas (*trypanosomiasis americana*)." *Medicina interna de México* **34**(6): 959-970.

- Nijhout, H. 1984. "Abdominal stretch reception in *Dipetalogaster maximus* (Hemiptera: Reduviidae)." *Journal of Insect Physiology* **30**(8): 629-633.
- Prata, A. 2001. "Clinical and epidemiological aspects of Chagas disease." *The Lancet infectious diseases* **1**(2): 92-100.
- Ramos, Á. 2019. "Enfermedad de Chagas: Una enfermedad desatendida pero una realidad en México." *Revista Médica de la Universidad Veracruzana* **19**(1): 39-42.
- Rassi, A. y J.A. Marin-Neto. 2010. "Chagas disease." *The Lancet* **375**(9723): 1388-1402.
- Roveda, J. 1967. "Signo de Romaña. Oftalmía tripanosomíásica unilateral de Cole." *Arch. oftalmol. B. Aires*: 1-4.
- Ryckman, R.E. y A.E. Ryckman. 1967. "Epizootiology of *Trypanosoma cruzi* in Southwestern North America Part X: The biosystematics of *Dipetalogaster maximus* in Mexico (Hemiptera: Reduviidae) (Kinetoplastida: Trypanosomidae)." *Journal of Medical Entomology* **4**(2): 180-188.
- Schaub, G. 1988. "Direct transmission of *Trypanosoma cruzi* between vectors of Chagas' disease." *Acta Trop* **45**(1): 11-9.
- Silva, I., I. Garibaldi and E. Isac. 1992. "Infecção de *Dipetalogaster maximus* (Uhler, 1894)(hemiptera, reduviidae) com o *Trypanosoma cruzi* por coprofagia." *Journal of Tropical Pathology* **21**(2): 251-254.
- Velasco, A. and C.A. Morillo. 2020. "Chagas heart disease: A contemporary review." *Journal of Nuclear Cardiology* **27**: 445-451.
- Vidal-Acosta, V., S. Ibáñez-Bernal y C. Martínez-Campos. 2000. "Infección natural de chinches *Triatominae* con *Trypanosoma cruzi* asociadas a la vivienda humana en México." *Salud Pública de México* **42**(6): 496-503.
- Viotti, R. (2014). *Enfermedad de Chagas: Un enfoque práctico basado en la investigación médica*. Medica Panamericana. Buenos Aires, Argentina. 388 pp.

CITA

Arellano Alba J.E., C. Angulo, O. Lugo-Lugo, T.E. Symon, A.C. Murillo Cisneros, C. Palacios Cardiel, A.A. Ramos Vega, T. Zenteno-Savín y R. Gaxiola Robles. La chinche de piedra y la enfermedad de Chagas. Recursos Naturales y Sociedad, 2024. Vol. 10 (2): 17-26. <https://doi.org/10.18846/renaysoc.2024.10.10.02.0002>

Sometido: 07 de mayo de 2024

Aceptado: 9 de julio de 2024

Editor asociado: Dr. Salvador Hernández Martínez

Editora ejecutiva: Dra. Crisalejandra Rivera Pérez

Diseño gráfico editorial: Lic. Gerardo Hernández

Portada: foto: https://unamglobal.unam.mx/global_revista/desarrollan-tecnologia-contra-la-enfermedad-de-chagas/



El nuevo genoma del camarón blanco *Penaeus vannamei* como clave para el mejoramiento de la camaronicultura

The new genome of the white shrimp *Penaeus vannamei* as a key to shrimp farming improvement

Recursos Naturales y Sociedad, 2024. Vol. 10 (2): 27-38. <https://doi.org/10.18846/renaysoc.2024.10.10.02.0003>

Ricardo Pérez-Enríquez¹, Pavel Galindo-Torres^{1,2}, Oscar E. Juárez^{1,2}

¹ Programa de Acuicultura, Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste, S.C.

² Programa de Estancias Posdoctorales por México del CONAHCYT



Resumen

El cultivo de camarón es una de las actividades acuícolas más importantes de México y el mundo. Ante los diversos retos para lograr que su producción tenga un crecimiento sustentable, una de las estrategias es utilizar los principios de la genética y la genómica. Por ejemplo, contar con un genoma completo para esta especie, nos permite conocer tanto la función como la ubicación de genes asociados con características de interés para la acuicultura tales como el crecimiento rápido, la resistencia a enfermedades, la eficiencia alimenticia, entre otros. En este trabajo, se presenta un nuevo genoma del camarón blanco del Pacífico *Penaeus vannamei*, el más completo públicamente disponible a la fecha, describiendo las bases generales a través de las cuales se realizó el trabajo computacional y los resultados más relevantes del proceso. Asimismo, se realiza una comparación con otros genomas disponibles y se detallan algunas líneas de acción hacia una camaronicultura más sustentable.

Palabras clave: camaronicultura, marcadores genéticos, ADN, sustentabilidad, mejoramiento genético.

Abstract

Shrimp farming is one of the most important aquaculture activities in Mexico and worldwide. Given the various challenges to ensure a sustainable growth of shrimp farming, one of the strategies is the use of the principles of genetics and genomics. For example, producing a complete genome for this species is the basis for understanding both the function and the location of genes associated with characteristics of interest for aquaculture such as rapid growth, resistance to diseases and feed efficiency, among others. In this work, a new genome

of the Pacific white shrimp *Penaeus vannamei* is presented, the most complete publicly available to date, describing the general bases through which the computational work was carried out and the most relevant results of the process. Likewise, a comparison is made with other available genomes and some lines of action towards more sustainable shrimp farming are detailed.

Keywords: shrimp aquaculture, genetic markers, DNA, sustainability, genetic improvement

Introducción

El cultivo de camarón en México y el mundo

Una de las industrias acuícolas más importantes de México es la del cultivo de camarón blanco, conocido científicamente como *Penaeus vannamei*. Durante el periodo de 2013 al 2023, esta industria creció notablemente con un incremento en la producción promedio anual del 13.8% (Fig. 1). En 2023, se alcanzó

una producción de 192 mil toneladas con valor de \$19.8 mil millones de pesos (https://conapesca.gob.mx/wb/cona/avisos_arribo_cosecha_produccion).

La acuicultura de camarón en México desempeña un papel importante en la generación de empleo. Se estima que alrededor de 42,000 personas¹, trabajan de manera directa e indirecta en los diversos componentes de la cadena de valor del camarón, incluyendo granjas, fábricas de alimentos balanceados, transporte, suministro de insumos, entre otros.

A nivel internacional, la producción acuícola del camarón alcanzó las 5.8 millones de toneladas (FAO, 2022). El reto para los próximos años no sólo radica en incrementar la producción para

¹ De acuerdo con el Censo Económico de Pesca y Acuicultura 2019 (INEGI, 2021) la camaricultura representó el 8.9% de la población total empleada en pesca y acuicultura. Si en el 2021 esta población fue de 292,584 personas (CONAPESCA, 2021), entonces 26,040 personas se emplearon directamente en el cultivo de camarón. Además, si se estima que por cada empleo acuícola directo hay 0.6 empleos indirectos (Phillips et al., 2016), se tendría un total de aproximadamente 26,040 directos + 15,624 indirectos = 41,664 totales

satisfacer la demanda mundial, sino hacerlo de manera más eficiente y sustentable (García, 2024).

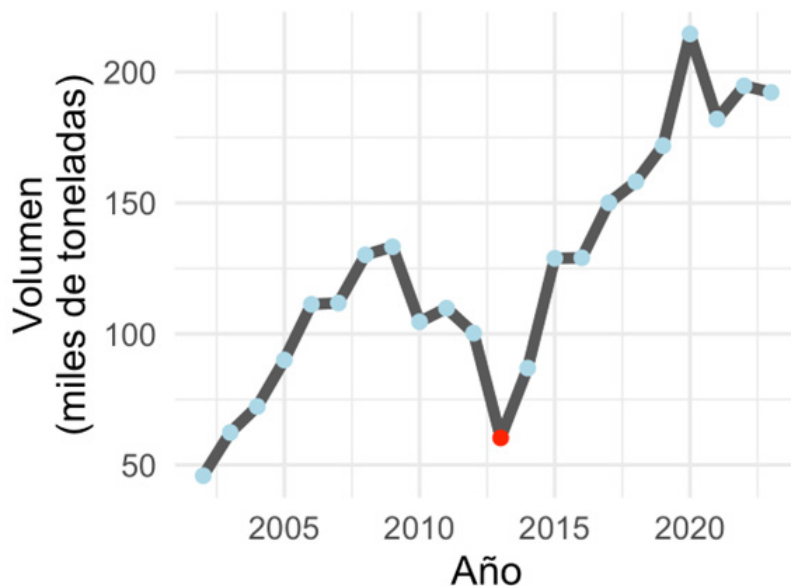


Figura 1. Producción de camarón de cultivo en México para el período 2002-2023. El punto rojo indica la caída de producción del 2013 asociada a problemas sanitarios de las granjas por el virus del síndrome de las manchas blancas (WSSV) y/o la bacteria causante de la Necrosis Aguda del Hepatopáncreas (AHPND).

El mejoramiento genético en la acuicultura

La mejora genética es una estrategia de manejo clave para aumentar la productividad de los cultivos. Esta consiste en seleccionar cuidadosamente a los organismos por características como el crecimiento rápido, la resistencia a enfermedades o la tolerancia a condiciones ambientales adversas (por ejemplo, alta salinidad, bajo oxígeno, entre otros) con el fin de reproducirlos y lograr que las sucesivas generaciones sean “mejores” (crezcan más, se enfermen menos, etc.) que sus progenitores. Con ello, el mejoramiento genético no sólo impacta en incrementar el desempeño y eficiencia de los cultivos sino también en mejorar su sustentabilidad (Yañez *et al.* 2022).

La genómica y los genomas de referencia

Los avances recientes en las tecnologías de secuenciación masiva y la genómica, han abierto las posibilidades para desarrollar



pruebas moleculares, basadas en el genoma, que pueden facilitar las prácticas de cría selectiva (Palaiokostas y Houston, 2017).

Para lograr este objetivo, es crucial contar con un genoma de referencia para la especie de interés.

Un genoma de referencia es la secuencia completa de ADN que compone a una especie determinada. Para la obtención de un genoma de referencia se requiere, en primera instancia, la obtención de miles o millones de secuencias de ADN de la especie de interés, las cuales se ensamblan unas con otras empleando programas informáticos especializados (Aguilar-Bultet y Falquet, 2015). Aunque las estrategias empleadas para el ensamblaje dependen del tipo de tecnología empleada en la secuenciación, este consiste, de manera general, en el empalme de fragmentos de una misma región que van generando fragmentos cada vez más grandes (llamados en inglés *contigs*) (Fig. 2). Posteriormente

se busca la unión de varios *contigs* para la formación de fragmentos aún más largos (llamados en inglés *scaffolds*) (Fig. 2).

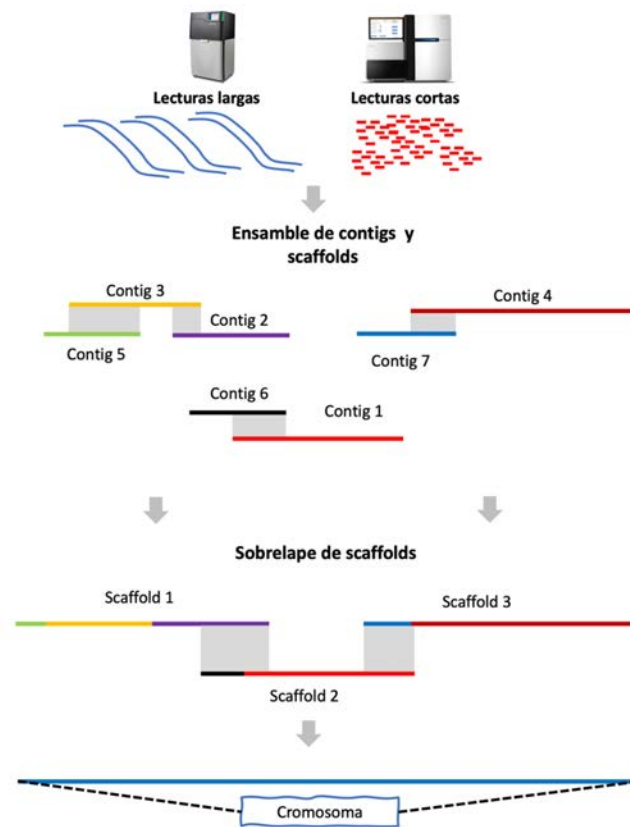


Figura 2. Representación esquemática del proceso de ensamblaje de secuencias de ADN. El proceso inicia con la obtención de fragmentos de secuenciación que, en función al equipo utilizado, son lecturas largas (entre 10,000 y 25,000 bases) o cortas (entre 150 y 300 bases). Las secuencias se ensamblan unas con otras en función de su similitud.

Idealmente, en el ensamble final cada *scaffold* debe representar, efectivamente, a un cromosoma (Fig. 2).

Generalmente, este proceso de ensamblaje es ayudado con información genómica previa de referencia de la misma especie o de especies cercanas.

Los mapas genéticos

Los primeros esfuerzos por entender el orden de los genes en los cromosomas llevaron al desarrollo de los mapas genéticos.

Éstos se definen como los diagramas lineales de genes o marcadores genéticos que muestran su disposición a través de un

cromosoma. Básicamente, si dos genes o secuencias marcadoras se encuentran cercanos entre sí dentro de un cromosoma, generalmente se heredarán juntos en el proceso reproductivo (Liu, 1998).

Los primeros mapas genéticos, también llamados mapas de ligamiento, presentaban baja densidad de marcadores genéticos (Alcivar-Warren *et al.* 2007; Andriantahina *et al.* 2013; Du *et al.* 2010; Pérez *et al.* 2004; Zhang *et al.* 2006). A manera de analogía, podemos entender estos marcadores genéticos como aquellos señalamientos y puntos de referencia que permiten ubicarnos a lo largo de una carretera. Estos mapas mostraron entre 45 y 49 grupos de ligamiento, lo cual es cercano a los 44 pares de cromosomas que presenta la especie (Campos-Ramos, 1997).

De manera complementaria, se desarrollaron mapas genéticos basados en secuencias del ARN mensajero total (genes), conocidas como transcriptoma (Ghaffari *et al.* 2014), así como la identificación de secuencias de marcas expresadas (ESTs; Santos *et al.* 2012). Sin embargo, por su tamaño, estos mapas tenían una aplicación práctica limitada. Recientemente, se desarrollaron mapas de ligamiento basados en marcadores de polimorfismos de nucleótido único (SNPs por sus siglas en inglés) de alta densidad conteniendo más de 6,000 marcadores cada uno (Jones *et al.* 2017; Yu *et al.* 2015).

El genoma del camarón

Con el desarrollo de nuevas tecnologías de secuenciación masiva se iniciaron los trabajos para la obtención de genomas de mayor tamaño. Previo a la realización del presente trabajo, existía un solo genoma de referencia del camarón blanco *P. vannamei* (Zhang *et al.*, 2019) de acceso público. El genoma se encuentra almacenado en la base de datos del *GenBank* del Centro Nacional para la Información Biotecnológica (NCBI) del Instituto Nacional de Salud de los EE.UU. Este genoma tiene un tamaño

de 1,600 millones de bases nucleotídicas (1.6 Gb), lo que representa aproximadamente un 65% de su longitud total estimada (Zhang *et al.* 2019). Sin embargo, estos 1.6 Gb están contenidos en 4,286 *scaffolds*, de los cuales, ninguno de ellos se acerca a la longitud, inclusive, del cromosoma más pequeño reportado en este estudio.

Esta falta de continuidad en los *contigs/scaffolds* significa que el genoma se encuentra bastante fragmentado. Es decir, hay muchas piezas del rompecabezas que aún no se han armado.

Por otro lado, se han observado inconsistencias entre el genoma de referencia de Zhang *et al.* (2019) y algunos grupos de ligamiento (Perez-Enriquez *et al.* 2020).

Por ejemplo, el *scaffold* 1907, identificado por poseer un marcador de sexo, no se alineó dentro del grupo de ligamiento asociado al sexo (Yu *et al.* 2015) y además, presentó alineamiento con varios grupos de ligamiento distintos (Fig. 3).



Por lo tanto, resulta necesario refinar la ubicación de los *scaffolds* del genoma completo, utilizando un mapa de ligamiento cuya precisión esté demostrada.

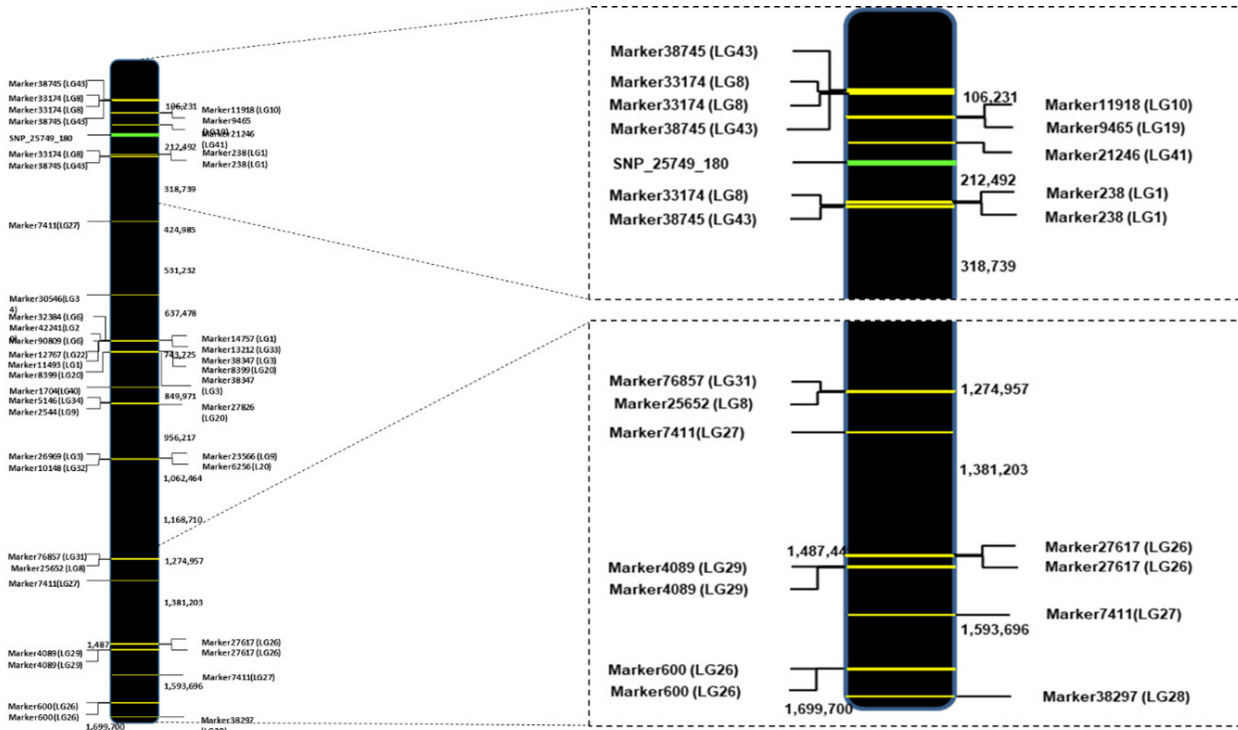


Figura 3. Representación esquemática del *scaffold* Lvan_scaffold_1907 (Zhang *et al.* 2019) con la ubicación de marcadores del mapa de ligamiento de Yu *et al.* (2015) (en amarillo) y del marcador de sexo de Perez-Enriquez *et al.* (2020) (en verde). Los números en paréntesis indican los grupos de ligamiento a los que pertenecen los marcadores.

En este contexto, dada la necesidad de contar información genómica más completa del camarón blanco *P. vannamei*, se desarrolló un estudio para reescribir el mapa genómico utilizando las secuencias disponibles en bases de datos públicas (Perez-Enriquez *et al.*, 2024).

El proceso de ensamblaje del genoma y resultados

El estudio de Perez-Enriquez *et al.* (2024) consistió en la obtención de secuencias de ADN de acceso público y su ensamblaje mediante diversos procesos bioinformáticos siguiendo el diagrama de flujo de la Fig. 4. Se consultó la base de datos *GenBank* para descargar un conjunto de secuencias largas (de molécula completa) provenientes de la plataforma *PacBio*. El procesamiento de las secuencias, su ensamblaje y su depuración requirió más de 10 mil horas de cómputo, el cual se llevó a cabo mediante programas especializados en el servidor informático del Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste, S.C.

El resultado fue un ensamblaje de 44 cromosomas y 15,682 *scaffolds* que en total presentan una longitud de poco más de 2.0 Gb y el cual se encuentra disponible en la base de datos del

GenBank (no. de acceso GCA_037577135.2), la cual es de acceso público tanto a nivel nacional como internacional (https://www.ncbi.nlm.nih.gov/datasets/genome/GCA_037577135.2/). Este ensamblaje representa aproximadamente el 84% de la longitud total del genoma del camarón [estimado en 2.45 Gb por Zhang *et al.* (2019)]. Comparado con otros ensamblajes reportados para esta especie, éste presenta una mejora de más del 26% con respecto del genoma de referencia de Zhang *et al.* (2019) y de Yuan *et al.* (2021), y de 9.9% con respecto al de Peng *et al.* (2023).

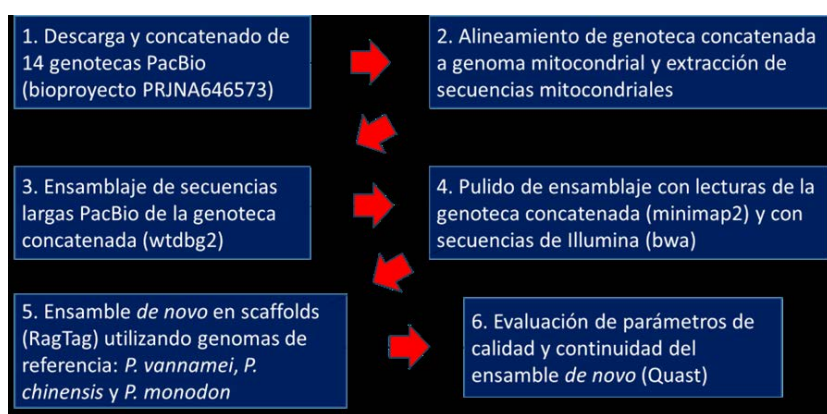


Figura 4. Diagrama de flujo utilizado por Perez-Enriquez *et al.* (2024) para el ensamblaje nuevo del genoma del camarón guiado con genomas de referencia de *P. vannamei*, *P. chinensis* y *P. monodon*. En paréntesis se indican los nombres de los programas utilizados.

Evaluación de la calidad del ensamblaje

Dos de los criterios normalmente empleados para determinar la calidad de un genoma ensamblado son la longitud de los *contigs/scaffolds* y el contenido de genes. Para el primero, se estima el valor N50, el cual indica el tamaño del cromosoma o *scaffold* a partir del cual se concentra el 50% de la información del genoma. Para calcularlo, los cromosomas se agrupan de mayor a menor y sus longitudes se van sumando hasta que el número de bases alcanza el 50% del genoma; la longitud del cromosoma en donde se alcanza este valor es el N50 y el número ordinal de éste es la L50 (Fig. 5). En este sentido, los valores N50 y L50 de Perez-Enriquez *et al.* (2024) son 40.14 Mb y 21

scaffolds respectivamente. En comparación con los ensamblajes más recientes, la N50 es 28% y 9% más grande que el de Yuan *et al.* (2021) y de Peng *et al.* (2023), respectivamente.

Para el análisis de presencia de genes, se realiza una búsqueda de genes comunes en bases de datos de especies filogenéticamente cercanas, en este caso de los artrópodos (grupo de animales que incluye a los crustáceos, insectos y arácnidos, entre otros). Particularmente en este estudio se registró el 92.6% de los genes esperados. Asimismo, se identificaron 21,816 genes potenciales y se logró alinear correctamente el 99.45% de las secuencias transcriptómicas analizadas. Además, se ubicaron 21,165 secuencias de marcadores genéticos de mapas de ligamiento y se ratificó que los marcadores ubicados en un grupo de ligamiento no necesariamente se encuentran en el mismo cromosoma.

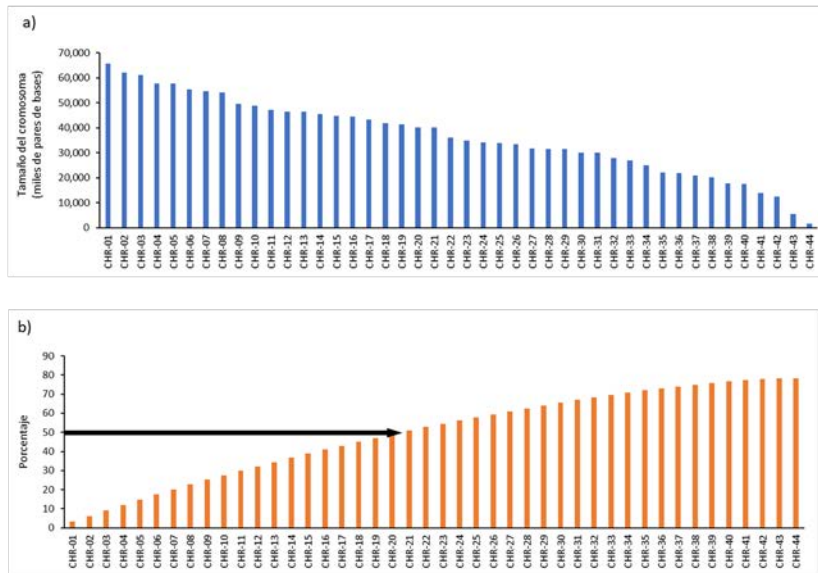


Figura. 5. a) Tamaño en miles de pares de bases de cada uno de los 44 cromosomas en los cuales está organizado el nuevo ensamblaje del camarón. b) Porcentaje acumulado del tamaño de los cromosomas de mayor a menor; la flecha señala al 50% acumulado con respecto al tamaño total del ensamblaje (2.055 Gb), que corresponde al cromosoma 21, el cual tiene un tamaño de 40.14 millones de bases. Por lo tanto, $N_{50} = 40.14$ Mb y $L_{50} = 21$.

Relevancia de la genómica en el cultivo de camarón

La relevancia de este nuevo genoma está muy relacionada con el mejoramiento de la producción acuícola del camarón. Si bien se ha demostrado que los planes de mejora mediante la aplicación de programas de selección familiar han resultado en ganancias superiores al 12% por generación en especies acuícolas (Gjrdrem y Robinson, 2014), la aplicación de estrategias novedosas de cría selectiva requiere, entre otros elementos, de la identificación de la arquitectura genética de los caracteres de interés (Yañez *et al.* 2022). Es decir, determinar si dichos caracteres están modulados por uno o pocos genes (llamados QTL), o si son de naturaleza poligénica, donde las características son el resultado del pequeño aporte de muchos genes (Falconer y Mackay, 1996). Para comprender mejor la arquitectura genética se han desarrollado metodologías que asocian características de interés con marcadores tipo SNP a lo amplio del genoma (GWAS por sus siglas en inglés) (Bush y Moore, 2012).

Con el nuevo genoma se estará en posibilidades de obtener un mejor mapeo de variantes genéticas asociadas a caracteres de interés para la acuicultura como la resistencia a enfermedades, tolerancia a ciertas condiciones adversas, crecimiento rápido, alta fecundidad, entre otros.

En este sentido, se tendrá información más precisa para entender la función de algunos genes en particular y, eventualmente, identificar las variantes que expliquen la capacidad de respuesta de los organismos, y permitan diseñar marcadores genéticos para su detección. Todo lo anterior enfocado a lograr cultivos que utilicen menos recursos y/o que lo hagan de manera más eficiente, incidiendo en una camaronicultura más sustentable.

Es importante reconocer que la aplicación práctica de la genómica para el mejoramiento del cultivo de camarón es aún costosa, tanto por los requerimientos de infraestructura en las unidades

de cultivo como por la tecnología de análisis en el laboratorio, por lo que uno de los retos futuros deberá centrarse en el desarrollo de estrategias asequibles para los productores acuícolas. En un ámbito más general de la biología de la especie, el nuevo genoma será útil para comprender la capacidad de adaptación de la especie a condiciones ambientales particulares, entender la determinación del sexo o analizar la historia evolutiva de la especie.

Conclusiones

En suma, el ensamble del genoma del camarón de Perez-Enriquez *et al.* (2024) representa una importante mejora con respecto a genomas previamente reportados, siendo el más completo hasta la fecha. Este genoma es una herramienta de acceso público para cualquier persona dedicada a la investigación o producción. Su aplicación práctica y económicamente viable para el desarrollo sustentable de la camaronicultura, será uno de los retos a vencer en los próximos años.

Reconocimientos

El proyecto fue financiado por el fondo CONACYT-Ciencia de Frontera 2021 (Clave: 319686).

Literatura citada

- Aguilar-Bultet, L. y L. Falquet. 2015. *Secuenciación y ensamblaje de novo de genomas bacterianos: una alternativa para el estudio de nuevos patógenos*. Revista de Salud Animal 37: 125–132
- Alcivar-Warren, A., D. Meehan-Meola, W.P. Se, Z. Xu, M. Delaney y G. Zuniga. 2007. *ShrimpMap: A low-density, microsatellite-based linkage map of the pacific whiteleg shrimp, Litopenaeus vannamei: Identification of sex-linked markers in linkage group 4*. Journal of Shellfish Research 26(4): 1259–1277. doi.org/10.2983/0730-8000
- Andriantahina, F., X. Liu y H. Huang. 2013. *Genetic map construction and Quantitative Trait Locus (QTL) detection of growth-related traits in Litopenaeus vannamei for selective breeding applications*. PLoS ONE 8(9): e75206. doi.org/10.1371/journal.pone.0075206
- Bush, W.S. y J.H. Moore. 2012. *Chapter 11: Genome-Wide Association Studies*. PLoS Computational Biology 8(12): e1002822. [doi:10.1371/journal.pcbi.1002822](https://doi.org/10.1371/journal.pcbi.1002822)
- Campos-Ramos, R. 1997. *Chromosome Studies on the marine shrimps Penaeus vannamei and P. californiensis (Decapoda)*. Journal of Crustacean Biology 17(4): 666–673.



- CONAPESCA, 2021. *Anuario Estadístico de Acuicultura y Pesca 2021*. Comisión Nacional de Acuicultura y Pesca. Mazatlán, México. 291 pp
- Du, Z.-Q., D.C. Ciobanu, S.K. Onteru, D. Gorbach, A.J. Mileham, G. Jaramillo y M.F. Rothschild. 2010. A *gene-based SNP linkage map for pacific white shrimp, Litopenaeus vannamei*. *Animal Genetics* 41(3): 286–294. doi.org/10.1111/j.1365-2052.2009.02002.x.
- Falconer, D.S. y T.F.C. Mackay. 1996. *Introduction to Quantitative Genetics. Fourth edition*. Pearson Prentice Hall. Harlow, Inglaterra. 464 pp.
- FAO. 2022. *The State of World Fisheries and Aquaculture 2022. Towards Blue Transformation*. FAO, Roma, Italia. 266 pp. <https://doi.org/10.4060/cc0461en>
- García, G. 2024. *La producción de camarón tiene potencial para fortalecer la economía: entrevista con Rosendo García, Gerente Acuicultura México en ADM*. Portal The Food Tech (<https://thefoodtech.com/seguridad-alimentaria/la-produccion-de-camaron-tiene-potencial-para-fortalecer-la-economia-entrevista-con-rosendo-garcia-gerente-acuicultura-mexico-en-adm/>). Consultado el 4 de abril de 2024.
- Ghaffari, N., A. Sánchez-Flores, R. Doan, K.D. Garcia-Orozco, P.L. Chen, A. Ochoa-Leyva, A.A. Lopez-Zavala, J.S. Carrasco, C. Hong, L.G. Briebe y 7 autores más. 2014. *Novel transcriptome assembly and improved annotation of the whiteleg shrimp (Litopenaeus vannamei), a dominant crustacean in global seafood mariculture*. *Scientific Reports* 4: 7081. doi: 10.1038/srep07081
- Gjedrem, T. y N. Robinson. 2014. *Advances by Selective Breeding for Aquatic Species: A Review*. *Agricultural Sciences* 5 (12): 1152-1158.
- INEGI, 2019. *Pesca y acuicultura. Censos Económicos 2019*. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. Aguascalientes, México. 58 pp.
- Jones, D.B., D.R. Jerry, M.S. Khatkar, H.W. Raadsma, H. Van Der Steen, J. Prochaska, S. Forêt y K.R. Zenger. 2017. *A comparative integrated gene-based linkage and locus ordering by linkage disequilibrium map for the Pacific white shrimp, Litopenaeus vannamei*. *Scientific Reports* 7: 10360. doi.org/10.1038/s41598-017-10515-7.
- Liu, B.H. 1998. *Statistical Genomics: Linkage Mapping, and QTL analysis*. CRC Press, Boca Raton, USA. 611 pp.
- Palaiokostas, C. y R.D. Houston. 2017. *Genome-wide approaches to understanding and improving complex traits in aquaculture species*. *CAB Reviews* 12(055): 1–10 doi.org/10.1079/PAVSNNR201712055.

- Peng, M., X. Chen, C. Yang, Q. Liu, Q. Li, B. Zhang, H. Wang, W. Zhu, P. Feng, D. Zeng y Y. Zhao. 2023. *A high-quality genome assembly of the Pacific white shrimp (Litopenaeus vannamei) provides insights into its evolution and adaptation*. *Aquaculture Reports* 33: 101859. doi.org/10.1016/j.aqrep.2023.101859
- Pérez, F., C. Erazo, M. Zhinaulta, F. Volckaert y J. Calderón. 2004. *A sex-specific linkage map of the white shrimp Penaeus (Litopenaeus) vannamei based on AFLP markers*. *Aquaculture* 242: 105–118. doi.org/10.1016/j.aquaculture.2004.09.002.
- Perez-Enriquez, R., R. Llera-Herrera, P. Galindo 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: 734784. doi.org/10.1016/j.aquaculture.2019.734784.
- Perez-Enriquez, R., O.E. Juárez, P. Galindo-Torres, A.L. Vargas-Aguilar y R. Llera-Herrera. 2024. *Improved genome assembly of the whiteleg shrimp Penaeus (Litopenaeus) vannamei using long- and short-read sequences from public databases*. *Journal of Heredity*: esae015. doi.org/10.1093/jhered/esae015
- Phillips, M., R.P. Subasinghe, N. Tran, L. Kassam y C.Y. Chan. 2016. *Aquaculture Big Numbers*. FAO Fisheries and Aquaculture Technical Paper 601. Roma, Italia. 60 pp.
- Santos, C.A., B.C. Rossini, C.G. Marques, P.M. Galetti y P.D. Freitas. 2012. *Characterization and genomic annotation of polymorphic EST-SSR loci in Litopenaeus vannamei shrimp*. *Aquaculture Research* 43(10): 1567–1570. doi.org/10.1111/j.1365-2109.2011.02956.x.
- Yañez, J.M., P. Xu, R. Carvalheiro y B. Hayes. 2022. *Genomics applied to livestock and aquaculture breeding*. *Evolutionary Applications* 15(4): 517-522.
- Yu, Y., X. Zhang, J. Yuan, F. Li, X. Chen, Y. Zhao, L. Huang, H. Zheng y J. Xiang. 2015. *Genome survey and high-density genetic map construction provide genomic and genetic resources for the Pacific White Shrimp Litopenaeus vannamei*. *Scientific Reports* 5: 15612. doi.org/10.1038/srep15612.
- Yuan, J., X. Zhang, F. Li y J. Xiang. 2021. *Genome sequencing and assembly strategies and a comparative analysis of the genomic characteristics in Penaeid shrimp species*. *Frontiers in Genetics* 12: 658619. doi.org/10.3389/fgene.2021.658619
- Zhang, L., C. Yang, Y. Zhang, L. Li, X. Zhang, Q. Zhang y J. Xiang. 2007. *A genetic linkage map of Pacific white shrimp (Litopenaeus vannamei): Sex-linked microsatellite markers and high recombination rates*. *Genetica* 131(1): 37–49. doi.org/10.1007/s10709-006-9111-8
- Zhang, X., J. Yuan, Y. Sun, S. Li, Y. Gao, Y. Yu, C. Liu, Q. Wang, X. Lv, X. Zhang, y 20 autores más. 2019. *Penaeid shrimp genome provides insights into benthic adaptation and frequent molting*. *Nature Communications* 10(1): 356. doi.org/10.1038/s41467-018-08197-4



Cita

Pérez-Enriquez R., P. Galindo-Torres y O.E. Juárez. El nuevo genoma del camarón blanco *Penaeus vannamei* como clave para el mejoramiento de la camaronicultura. **Recursos Naturales y Sociedad**, 2024. Vol. 10 (2): 27-38. <https://doi.org/10.18846/renaysoc.2024.10.10.02.0003>

Sometido: 18 de abril de 2024

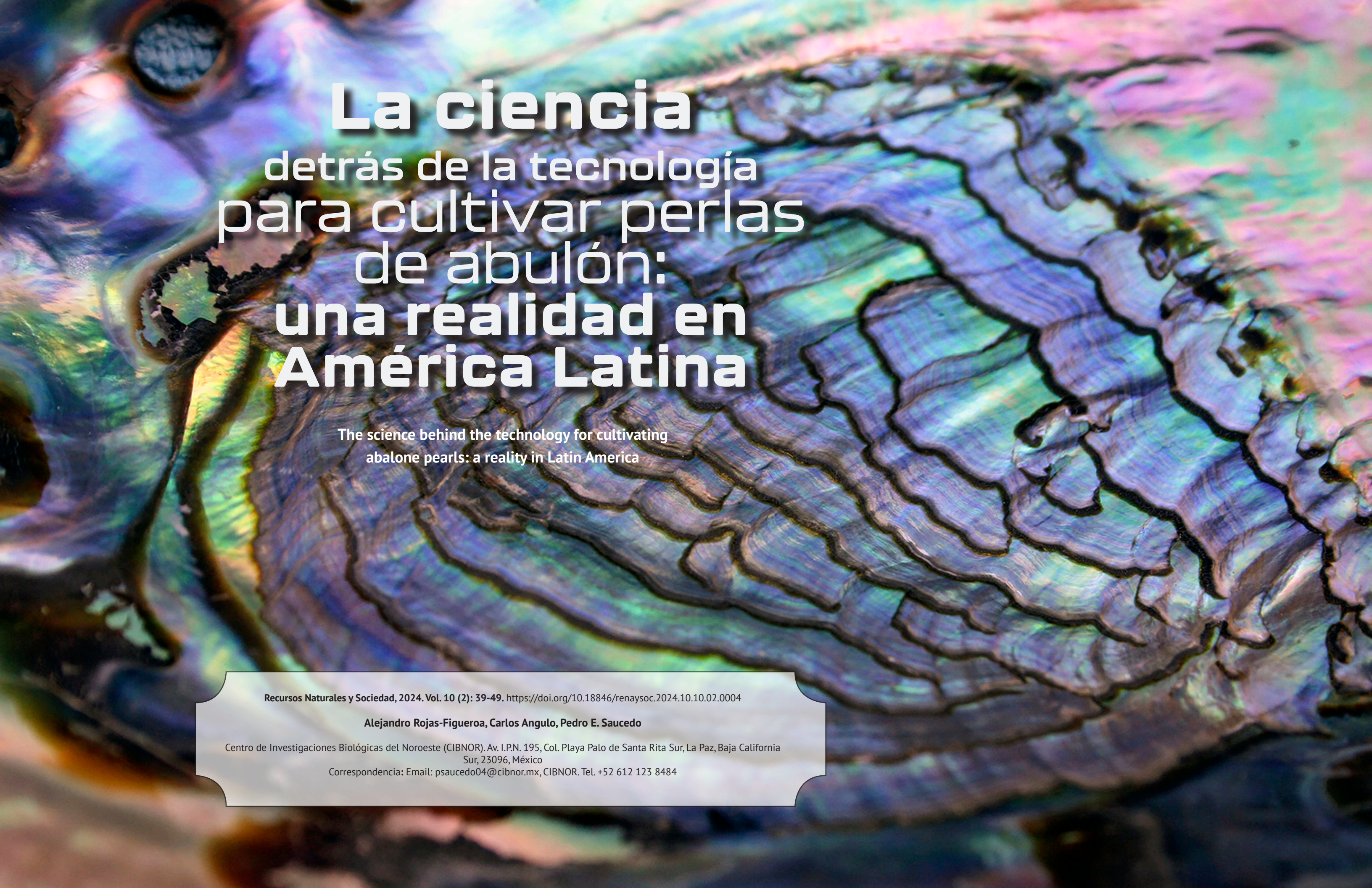
Aceptado: 11 de julio de 2024

Editor asociado: Dr. Fausto Valenzuela Quiñonez

Editora ejecutiva: Dra. Crisalejandra Rivera Pérez

Diseño gráfico editorial: Lic. Gerardo Hernández

Portada: Fotografías y gráficos CIBNOR



La ciencia detrás de la tecnología para cultivar perlas de abulón: una realidad en América Latina

The science behind the technology for cultivating
abalone pearls: a reality in Latin America

Recursos Naturales y Sociedad, 2024. Vol. 10 (2): 39-49. <https://doi.org/10.18846/renaysoc.2024.10.10.02.0004>

Alejandro Rojas-Figueroa, Carlos Angulo, Pedro E. Saucedo

Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste (CIBNOR). Av. I.P.N. 195, Col. Playa Palo de Santa Rita Sur, La Paz, Baja California Sur, 23096, México

Correspondencia: Email: psaucedo04@cibnor.mx, CIBNOR. Tel. +52 612 123 8484



Resumen

El abulón (*Haliotis* spp.) es un recurso acuícola valioso en algunos países de América Latina, ya que su carne se utiliza para consumo humano o se exporta como producto gourmet a precios elevados. Sin embargo, las poblaciones naturales de muchas especies de abulón se encuentran muy disminuidas debido al colapso de la pesquería, la sobrepesca, aparición de nuevas cepas de patógenos y al cambio climático. En la última década, el potencial de aprovechamiento del abulón para el cultivo de productos de alto valor agregado, como las perlas, se ha evaluado con éxito en países como México y Chile. Este artículo describe las diferencias entre una perla natural y una perla cultivada y detalla la ciencia que ha hecho posible desarrollar la tecnología para el cultivo comercial de medias perlas (mabés) y perlas libres barrocas en el abulón rojo en México y Chile. Finalmente, se analiza el potencial de crecimiento del cultivo mixto de abulón (carne y perlas) en ambos países, así como las perspectivas de crecimiento futuro de esta actividad en América Latina.

Palabras clave: Acuicultura; abulón; cultivo de perlas; manto; Latinoamérica

Abstract

Abalone (*Haliotis* spp.) is a valuable aquaculture resource in many Latin American countries, as its meat is used for human consumption or it is exported as a gourmet product at high prices. However, the natural populations of many abalone species are severely diminished due to the collapse of the fishery, overfishing practices, appearance of new strains of pathogens and climate change. In the last decade, the potential of using abalone for the cultivation of high value-added products, such as pearls, has

been successfully evaluated in countries such as Mexico and Chile. The differences between a natural pearl and a cultivated pearl are described, detailing the science that has made it possible to develop a technology for culturing half pearls (mabés) and free, baroque pearls in red abalone in Mexico and Chile. Finally, the growth potential of mixed abalone farming (meat and pearls) in both countries is analyzed, as well as the prospects for future growth of this activity in Latin America.

Keywords: Aquaculture; abalone; pearl culture; mantle; half pearls; Latin America

Características y aprovechamiento del abulón

El abulón es un molusco gastrópodo del género *Haliotis* que vive en substratos rocosos-arenosos de poca profundidad entre 1 y 30 m de profundidad asociados a praderas de pastos marinos y bosques de macroalgas, las cuales recorre con su pie

muscular de gran tamaño en búsqueda de alimento (Ponce-Díaz *et al.*, 2013). Actualmente, existen más de 70 especies de abulón en todo el mundo (Cook, 2014), aunque solo unas 15 se cultivan de forma comercial mediante la acuicultura. Esto se debe a que las poblaciones naturales de este recurso disminuyeron drásticamente en las últimas tres décadas por la sobrepesca y colapso de su pesquería, así como por la aparición de nuevas cepas de patógenos y al cambio climático (Morales-Bojórquez *et al.*, 2008). A pesar de ello, la demanda por este recurso ha continuado hasta la fecha, junto con los precios altos por el producto (FAO, 2017; Nguyen *et al.*, 2022).

En algunos países de América Latina, como México y Chile, el abulón es un recurso acuícola muy valioso, ya que su pie (carne) se aprovecha para consumo humano y también se exporta a otros países del mundo como producto gourmet a precios elevados. De las cinco especies que se distribuyen a lo largo de la península de Baja California (México), el abulón azul (*Haliotis fulgens*), abulón rojo (*Haliotis rufescens*) y abulón amarillo (*Haliotis corrugata*) son las más importantes comercialmente (Monteforte y Bervera, 2010). Por desgracia, los niveles de producción de abulón en México no superaron las 411 toneladas en 2020, de las cuales 359 toneladas provinieron de captura y 52 toneladas de acuicultura (CONAPESCA, 2020). Por su parte, Chile cuenta con dos especies de abulón que fueron introducidas en los años 1980s: el abulón rojo (desde California, Estados Unidos) y el abulón verde *Haliotis discus hannai* (desde Japón), siendo el primero el de mayor valor comercial (Flores-Aguilar *et al.*, 2007). En este país, la producción alcanzó las 917 toneladas en 2020, las cuales se produjeron mayormente en las regiones de Atacama, Coquimbo, Valparaíso y Los Lagos (SERNAPESCA, 2020).

En ambos países, el abulón se cultiva por sociedades cooperativas y/o empresas privadas, lo que representa un motor de desarrollo socioeconómico regional importante (Ponce-Díaz *et al.*, 2013).

En las últimas dos décadas, el potencial de aprovechamiento del abulón para la obtención de otros productos de alto valor agregado, como las perlas, se ha evaluado con gran interés en México y Chile (Saez-Saavedra *et al.*, 2024). Gracias a la colaboración entre centros de investigaciones, sociedades cooperativas y empresas privadas, el cultivo integral y sostenible de la carne y perlas de abulón se ha convertido poco a poco en una realidad en ambos países. Aunado a esto, el cultivo de ambos productos se maneja bajo esquemas de sincronización productiva en los que ninguna de las dos actividades interfiere con la otra.

Perlas naturales y perlas cultivadas

En un molusco, una perla natural se forma por un mecanismo de defensa, cuando un agente extraño (generalmente un parásito) perfora su concha, penetra su cuerpo blando e irrita sus



tejidos. En respuesta, el animal comienza la producción de una sustancia dura y lustrosa que va depositando gradualmente sobre el agente extraño hasta cubrirlo, de manera similar a como se forma una ampolla (Saucedo *et al.*, 2023). En la naturaleza, esta ampolla es una *perla natural* y la sustancia dura que la cubre se llama *nácar*, el cual es producido por un tejido delgado que cubre y protege los órganos internos: el *manto*. El nácar se produce por acción de una serie de proteínas liberadas por el manto, y que, en conjunto con el carbonato de calcio obtenido del medio, se deposita en forma de cristales microscópicos de un mineral que brilla al reflejar la luz: la *aragonita* (Fougerouse *et al.*, 2008). En los moluscos con concha, el proceso biológico por el que se forma la aragonita y el nácar se denomina *biomineralización* (Saucedo *et al.*, 2023; Saez-Saavedra *et al.*, 2024).

Desde siglos atrás, el hombre supo aprovechar esta capacidad de síntesis de nácar

del manto de los moluscos para desarrollar el cultivo de perlas como actividad comercial, introduciendo de forma artificial en el cuerpo del animal el agente extraño (un núcleo) y una pieza de manto para provocar su irritación (Saucedo *et al.*, 2023). Esta actividad se desarrolló con mucho éxito principalmente en un grupo de moluscos llamado *ostras perleras* (género *Pinctada*), las cuales poseen un nácar muy brillante y colorido que es valorado para el cultivo de dos tipos de perlas: las perlas libres (o sueltas) y las medias perlas (mabés). Sin embargo, el abulón también posee un nácar de lustre metálico intenso y colores tornasol que son muy valorados para la elaboración de joyería fina y perlas, tanto sueltas como mabés (Rojas-Figueroa *et al.*, 2019, 2023; Homkrajae *et al.*, 2023; Saez-Saavedra *et al.*, 2024). A su vez, existen ciertos grupos de moluscos de la Familia Pectinidae, como la almeja mano de león *Nodipecten subnodosus*, que son capaces de producir perlas no nacaradas (más bien de naturaleza porcelanizadas) que tienen un nicho y valor en algunos mercados perleros (Torres-Martínez *et al.*, 2012).

¿Cómo se producen las medias perlas en el abulón?

La técnica para producir medias perlas (mabés) en el abulón es relativamente sencilla, poco invasiva y se denomina *implante* (Saucedo *et al.*, 2023). Inicia anestesiando los animales con alguna sustancia natural o artificial que reduce su estrés, relaja sus tejidos y facilita su manipulación. Entre algunas de las sustancias evaluadas experimentalmente con este fin en los últimos años se encuentran el aceite de clavo, benzocaina, cloruro de magnesio y dióxido de carbono (CO₂). Este último disuelto a saturación como gas en agua de mar es el que mejores resultados ha ofrecido, pues relaja rápidamente a los animales y permite su recuperación también de forma rápida y sin tantos efectos secundarios, como mortalidad, irritación de tejidos o decoloración del pie (Rojas-Figueroa *et al.*, 2019, 2023). Una vez

relajado, el abulón se coloca boca arriba para descubrir la cara interna nacarada, particularmente la que está opuesta a los respiraderos o espiráculos (Fig. 1A). Esta parte se seca bien con una esponja y se pegan uno o varios medios núcleos (mitad de una esfera) con un pegamento de contacto o instantáneo (Fig. 1B). Los medios núcleos suelen ser de plástico y forma redonda, aunque los óvalos y gotas también se pueden utilizar dependiendo de las preferencias del mercado.

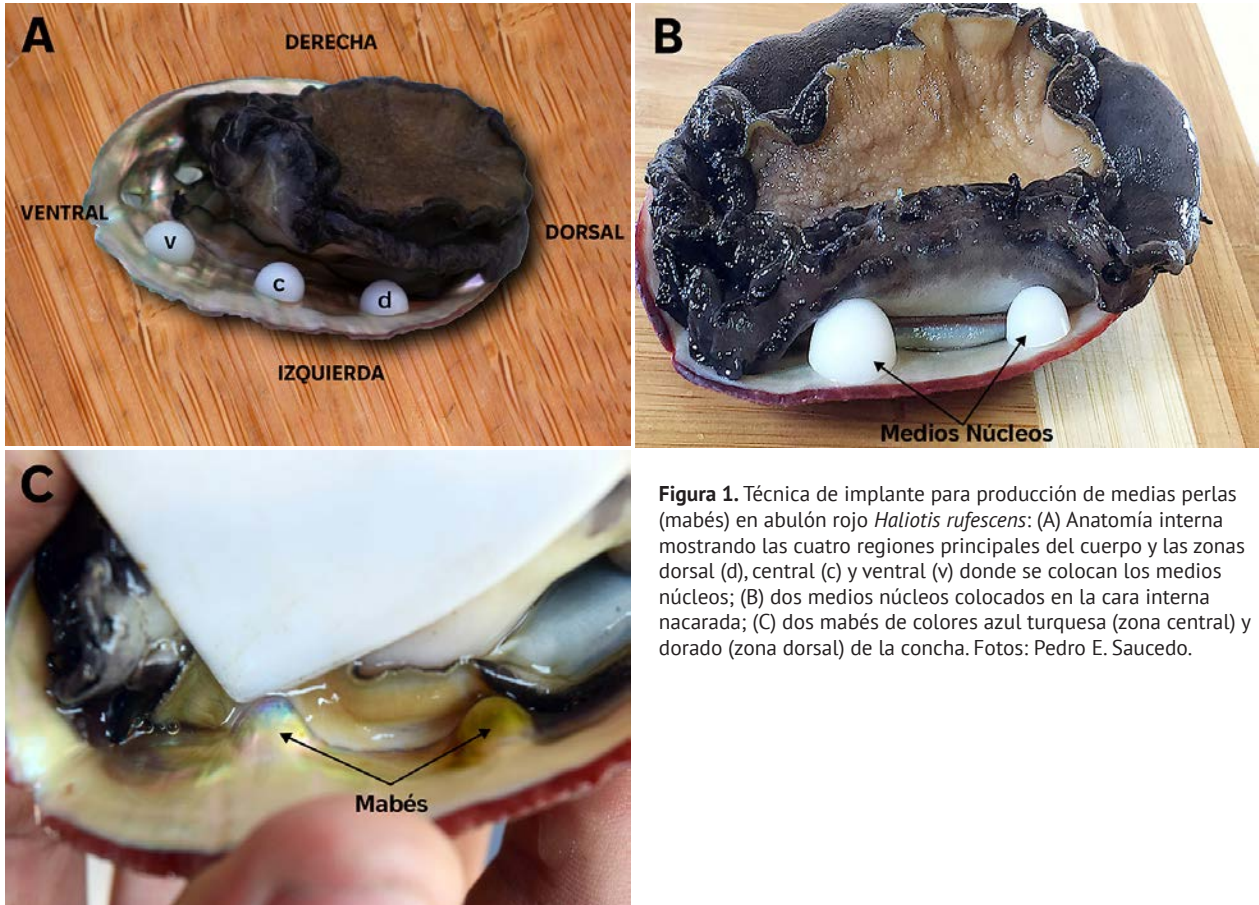


Figura 1. Técnica de implante para producción de medias perlas (mabés) en abulón rojo *Haliotis rufescens*: (A) Anatomía interna mostrando las cuatro regiones principales del cuerpo y las zonas dorsal (d), central (c) y ventral (v) donde se colocan los medios núcleos; (B) dos medios núcleos colocados en la cara interna nacarada; (C) dos mabés de colores azul turquesa (zona central) y dorado (zona dorsal) de la concha. Fotos: Pedro E. Saucedo.

Los abulones implantados son observados por unos días y todos los sobrevivientes son regresados a las instalaciones de cultivo, donde se mantienen por 18 a 24 meses hasta la cosecha de la carne y las perlas. El fundamento de formación de una mabé radica en el hecho de que el medio núcleo se implanta en una parte de la cara interna de la concha que asegura que el manto lo envuelva y recubra poco a poco con nácar. Los resultados de las investigaciones realizadas a la fecha en Chile indican que existen tres factores que influyen la calidad de la mabé en formación: el número, tamaño y sitio exacto de colocación de los medios núcleos. Por ejemplo, un abulón rojo de dos a tres años de edad, y una talla promedio de 7 a 9 cm de largo, debe recibir un solo medio núcleo de 9-12 mm de diámetro en la región dorsal de la concha, o máximo dos núcleos de 9-10 mm en las regiones dorsal y central (Saez-Saavedra *et al.*, 2024) (Fig. 1C). Esto depende de la talla



del abulón a implantar. La calidad de la(s) mabé(s) cosechadas se evalúa a partir de cinco criterios básicos: color, brillo, tamaño, superficie y grosor de la capa de nácar que las recubre (Rojas-Figueroa et al., 2019). Para ello, se maneja una escala de clasificación por letras que evalúa la calidad de las perlas como: (1) gemas o AAA, cuando tienen un color único, brillo superior, forma esférica y una superficie del nácar sin imperfecciones como arrugas y manchas; (2) buena calidad o AA, cuando cumplen entre el 75% y 50% de estos criterios; (3) calidad promedio o A, cuando cumplen al menos el 50% y 25% de estos criterios; y (4) mala calidad o B, cuando poseen <25% de estos criterios (Saucedo et al., 2023; Saez-Saavedra et al., 2024). En promedio una mabé de abulón suelta sin montar en joyería (collares, aretes, anillos) puede valer unos US\$75.00 a US\$100.00, dependiendo de sus características.

¿Cómo se producen las perlas libres barrocas en el abulón?

La técnica para cultivar perlas libres fue desarrollada desde el siglo XIX para las ostras perleras del género *Pinctada* y conlleva una cirugía invasiva llamada *injerto*, la cual no solo es estresante para el animal, sino que puede poner en riesgo su vida (Saucedo et al., 2023). Esta técnica ha sido particularmente difícil de adaptar en el abulón, debido a dos claras diferencias anatómicas con las ostras perleras (Saucedo et al., 2015). Primero, el abulón carece de un sitio en su cuerpo para colocar el injerto, como es el caso de las ostras perleras que poseen una amplia bolsa de tejido conectivo llamada *asa intestinal*, que es en realidad una continuación del órgano reproductivo o gónada (Fig. 2A). Segundo, el abulón es un animal que se desplaza continuamente en búsqueda de alimento, y su pie de gran tamaño ejerce una presión constante sobre el área de injerto, separando muchas veces el núcleo y manto injertados y evitando que se forme la perla; esto no ocurre tanto

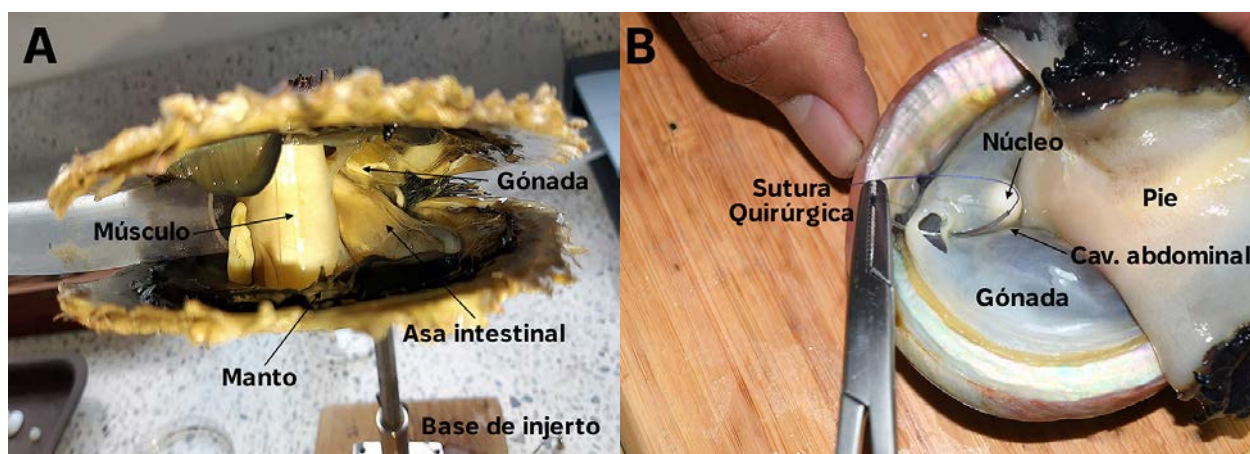


Figura 2. Técnica de injerto para producción de perlas libres en una madreperla del género *Pinctada* (A) y en el abulón rojo *Haliotis rufescens* (B). La foto A muestra el área de la gónada (órgano reproductor) donde se hace la incisión y el asa intestinal (bolsa de tejido conectivo) donde se coloca el injerto para formar la perla libre. La foto B muestra la cavidad abdominal del abulón, cerca de la gónada, donde se hace la incisión y se coloca el injerto, la cual se cierra con sutura quirúrgica. Fotos: Pedro E. Saucedo.

con las ostras perleras que son bivalvos sésiles que carecen de movilidad. Solucionar este problema en el abulón ha representado un desafío en materia de investigación científica y tecnológica (Saez-Saavedra *et al.*, 2024), el cual ha dado frutos satisfactorios en los últimos años (ver sección de abajo).

Para la cirugía de injerto, los abulones son anestesiados con CO₂ de la misma forma como se describió para las perlas mabés. Cada animal anestesiado es colocado boca arriba para exponer su cavidad abdominal, particularmente el área reproductiva (gónada), donde se realiza una pequeña incisión de unos 5 a 7 mm para introducir un núcleo esférico y una pequeña pieza de manto obtenida de un abulón donador de la misma especie, la cual asegura la secreción de nácar. A diferencia de los medios núcleos de plástico que se utilizan con las mabés, los núcleos esféricos para las perlas libres están elaborados de concha y su diámetro (6 a 9

mm) varía en función de la talla del abulón a injertar. La cirugía debe ser precisa y en un tiempo no mayor a los dos minutos para reducir el riesgo de mortalidad.

Finalmente, la herida se cierra utilizando sutura quirúrgica, la cual ha representado una mejora tecnológica muy importante para reducir el riesgo de rechazo del injerto (Saez-Saavedra *et al.*, 2024) (Fig. 2B).

Si la cirugía de injerto es exitosa, la pieza de manto envolverá al núcleo esférico en unos 15 a 20 días para formar una estructura llamada *saco perlero*, el cual está formado por la primera capa de células epiteliales de manto que se multiplican continuamente por mitosis para secretar capas concéntricas de nácar por toda la vida del animal. Los abulones que sobreviven a la cirugía de injerto y forman con éxito el saco perlero son cultivados por 18 a 24 meses hasta la cosecha coordinada de la perla y la carne. Cada perla libre cosechada es valorada a partir de los mismos criterios descritos para las perlas mabés (tamaño, color, brillo, superficie y grosor del nácar) y empleando el mismo esquema de clasificación. Sin embargo, las perlas libres son el producto principal por el que se cultivan estos animales y alcanzan precios mucho más altos que las mabés, pudiendo ser hasta de US\$3,000 por pieza suelta y sin montar en joyería (ver sección de abajo).

Perspectivas para el desarrollo del cultivo de perlas de abulón en América Latina

El cultivo de perlas de abulón ha abierto una clara ventana de oportunidad para la expansión de la industria abulonera de América Latina, no sólo por la madurez que ya posee en torno al aprovechamiento de la carne para consumo humano (Cook, 2014), sino por la generación de valor agregado que representa el cultivo de perlas (Saez-Saavedra *et al.* 2024). En México, por ejemplo, la colaboración entre un centro de investigaciones



biológicas de La Paz, B.C.S. y una sociedad cooperativa de Ensenada, B.C., permitió optimizar la técnica de cultivo de mabés en abulón rojo y abulón azul, así como la creación de una empresa privada dedicada desde 2009 a su comercialización (Monteforte y Bervera, 2010). En Chile, las mabés de abulón rojo también se producen a escala comercial desde 2012, en colores metálicos azul turquesa y sobre-tonos azul, verde y dorado (Saez-Saavedra et al., 2024) (Fig. 1C).

Aunque la optimización de la técnica de injerto en el abulón rojo a partir de los conocimientos generados para las ostras perleras ha representado un reto científico-tecnológico, se ha logrado de forma exitosa en Chile debido a una activa colaboración entre la Universidad de Antofagasta (Chile) y un centro de investigación de La Paz, B.C.S., México. Por ejemplo, la tasa de mortalidad post-injerto se redujo del 8% en 2013 a <1% en 2022, así como la tasa de

rechazo de injertos del 80% (2013) al 35% (2022), gracias al uso de sutura quirúrgica. También se incrementó la tasa de formación de perlas libres del 0.5% (2013) al 7% (2022), estimándose un incremento al 10% para 2025 (Saez-Saavedra et al., 2024). Derivado de la ciencia detrás del cultivo de perlas de abulón rojo, hoy se producen comercialmente en Chile perlas libres de 8 a 12 mm, en colores metálicos iridiscentes azul turquesa y violeta, y de formas barrocas conspicuas que incluyen colmillos y bolas de fuego con cola (Homkrajae et al., 2023) (Fig. 3). Igualmente, la tecnología para su producción se patentó en 2016 (Araya et al., 2016), dando pie en 2023 a la creación de la empresa comercial *Atacama Pearls* (www.atacamapearls.com), cuya meta está dirigida a maximizar el valor de las perlas a través de la fabricación y venta de joyería fina en mercados internacionales, así como a abrir los canales para la transferencia de la tecnología a sectores productivos del país y el extranjero (Saez-Saavedra et al., 2024).

Es importante destacar algunas diferencias que existen en términos de forma, calidad y precio entre las perlas cultivadas producidas por las ostras perleras y las de abulón. Las primeras suelen ser de forma esférica o semi-esférica, de unos 7 a 15 mm de diámetro y de colores muy variados (plateados, rosados, dorados, negros) en función de la especie de ostra perlera de que se trate. Suelta, una perla libre de ostra perlera puede alcanzar precios que también varían mucho dependiendo de estos tres criterios, aunque en promedio puede oscilar entre unos US\$75.00 a US\$150.00.

Por el contrario, una perla libre de ostra perlera ya montada (por ejemplo en un anillo) puede incrementar su valor hasta unos US\$750.00

En un escenario diferente las perlas cultivadas de abulón difícilmente son esféricas o semi-esféricas, sino de formas barrocas y caprichosas (Fig. 3). Como aún son escasas y raras en el mercado, el precio actual de las perlas cultivadas de abulón

rojo *H. rufescens* es de US\$200 dólares por quilate de nácar (Saez-Saavedra *et al.*, 2024). Este precio considera no sólo el valor actual por quilate de las perlas naturales de abulón, sino una serie de criterios de sostenibilidad que tienen estas perlas para su producción en Chile, como el uso de sistemas de recirculación, eliminación de residuos sólidos, manejo sostenible de praderas de macroalgas e incorporación de programas de cuidado y bienestar animal (Saez-Saavedra *et al.*, 2024).



Figura 3. Perlas libres de abulón rojo *Haliotis rufescens*, mostrando formas barrocas (dientes, bolas de fuego) y conspicuas indefinidas, tallas variables y colores metálicos dominantes azul turquesa y sobre-tonos verdes y violetas. Las perlas se produjeron mediante la técnica de injerto patentada en Chile en 2016. Fotos cortesía de Rubén Araya, editadas por Diego A. Saucedo-Ortega.

Conclusión

Claramente, las medias perlas de abulón rojo y azul que se han producido en México a la fecha, así como las perlas libres producidas en Chile con abulón rojo, representan las primeras de su tipo en todo el continente americano y son muy valoradas por joyeros y gemólogos de todo el mundo. A pesar de este logro, es necesario continuar fomentando el cultivo sostenible de la carne y perlas de abulón, con el fin de integrar esta actividad acuícola a los esquemas de desarrollo social y económico regional de México y Chile. De forma particular, se deben desarrollar acciones que permitan a sectores más rezagados donde se desarrollan estas actividades un crecimiento socioeconómico significativo y sostenido, similar a lo que ocurre en Asia y Oceanía con las ostras perleras. Para lograr esto, se requiere el apoyo de los gobiernos estatales y municipales, así como la participación de sociedades cooperativas y centros de investigaciones de ambos países.



Referencias bibliográficas

- Araya, R., P.E. Saucedo, A. Rojas-Figueroa y J. Maturana. 2016. *Method for producing free pearls in abalone*. Solicitud internacional publicada por la Organización mundial de la Propiedad intelectual. WO 2016/183695 A1.
- CONAPESCA, 2020. *Anuario Estadístico de Acuicultura y Pesca*. www.conapesca.gob.mx.
- Cook, P.A. 2014. *The worldwide abalone industry*. *Modern Economy*. 5: 1181–1186.
- FAO, 2017. *Aquaculture News: La producción de abalón sigue creciendo, unida a la demanda continua, y los precios altos y estables*. Globefish. <https://www.fao.org/in-action/globefish/marketreports/resource-detail/es/c/903190/>.
- Flores-Aguilar, R., A. Gutierrez, A. Ellwanger y R. Searcy-Bernal. 2007. *Development and current status of abalone aquaculture in Chile*. *Journal of Shellfish Research* 26: 705–711.
- Fougerouse A., M. Rousseau, J.S. Lucas. 2008. Soft tissue anatomy, shell structure and biomineralization. En: Southgate, P.C., Lucas, J.S., eds. *The Pearl Oyster: Biology and Culture*. Elsevier Science, p.p. 77–102.
- Homkrajae, A., A. Steen, M. Hardman, Z. Sun, R. Araya y J. Maturana. 2023. *Bead culture abalone pearls from Chile*. *Gems & Gemology* 59: 140–142.
- Monteforte, M. y H. Bervera, H. 2010. *Abalone pearl culture on the West Coast of the Baja California Peninsula, Mexico*. *World Aquaculture Magazine* 41: 12–17.
- Morales-Bojorquez, E., M.O. Muciño-Díaz, y J.A. Vélez-Barajas. 2008. *Analysis of the decline of the abalone fishery (Haliotis fulgens and H. corrugata) along the West central coast of the Baja California Peninsula, Mexico*. *Journal of Shellfish Research* 27: 865–870.
- Ponce-Díaz, G., F. Arreguín-Sánchez, A. Hernández-Llamas, P. del Monte-Luna y M. Ramade-Villanueva. 2013. *Estimación de la captura ilegal de abulón y langosta en la costa de la península de Baja California*. *Ciencias Marinas* 39: 323–329.
- Rojas-Figueroa, A., R. Araya, H. Acosta-Salmon, F. Chávez-Contreras, N.L. Ortiz-Cornejo y P.E. Saucedo. 2019. *Factors influencing half-pearl (mabé) production and quality in the red abalone Haliotis rufescens*. *Aquaculture Research* 50: 3392–3400.
- Rojas-Figueroa, A., C. Angulo, R. Araya, A. Granados-Amores, F. Guardiola y P.E. Saucedo. 2023. *Comparative analysis of anesthetic agents used in pre-operative therapy for pearl culture in the red abalone Haliotis rufescens (Swainson, 1822)*. *Aquaculture* 574: 739623.

- Saez-Saavedra, C., P.E. Saucedo, A. Rojas-Figueroa, A. Tanguy y R. Araya. 2024. *Progress towards development of a unique pearl culture technology for red abalone *Haliotis rufescens* in Chile*. *Aquaculture Reports* 34: 101917.
- Saucedo, P.E., R. Araya y A. Rojas-Figueroa. 2015. *Informe final de resultados del proyecto INNOVA-CORFO "Investigación y optimización de la tecnología para la producción de perlas en abalón rojo *Haliotis rufescens* en Chile"*. Universidad de Antofagasta, Chile, 36 pp.
- Saucedo, P.E., D. McLaurin, C. Loderios, L. Freitas, J.I. Cáceres-Puig, M.D. Albuquerque y H. Acosta-Salmón. 2023. *Progress towards reestablishing Latin America as a major pearl producing region: A review*. *Reviews in Aquaculture* 15: 242–260.
- SERNAPESCA, 2020. *Estadísticas de Acuicultura*. www.sernapesca.cl.
- Torres-Martínez, J.A., Saucedo, P.E., Rangel-Dávalos, C., Acosta-Salmón, H. 2012. Advances in pre-operative techniques for pearl production in the lions-paw scallop *Nodipecten subnodosus*: Relaxation and mantle excision. *Aquaculture* 357: 279–283.

Cita

Rojas-Figueroa A., C. Angulo, P.E. Saucedo. La ciencia detrás de la tecnología para cultivar perlas de abalón: una realidad en América Latina. **Recursos Naturales y Sociedad, 2024. Vol. 10 (2): 39-49.** <https://doi.org/10.18846/renaysoc.2024.10.10.02.0004>

Sometido: 17 de junio de 2024

Aceptado: 9 de septiembre de 2024

Editor asociado: Dra. Crisalejandra Rivera Pérez

Editora ejecutiva: Dra. Crisalejandra Rivera Pérez

Diseño gráfico editorial: Lic. Gerardo Hernández

Portada, fotografía: DG. Gerardo Hernández

La almeja mano de león: una historia de desencanto y esperanza

The lion's paw scallop: a story of disenchantment and hope

Recursos Naturales y Sociedad, 2024. Vol. 10 (2): 51-64. <https://doi.org/10.18846/renaysoc.2024.10.10.02.0005>

Lluch-Cota, S.E.¹, Carreño León, D.P.², Cruz Hernández, P.², Escobedo Fregoso, C.², Galindo Sánchez, C.E.³, González Soriano, G.², Hernández Casas, S.¹, Hernández Herrera, R.³, Hernández-Saavedra, N.Y.¹, Kraffe De Laubrade, E.⁴, Lafarga De La Cruz, F.³, López Galindo, L.L.⁵, Monge Quevedo, A.², Pacheco Ayub, C.¹, Pecquerie, L.⁴, Racotta, I.S.², Ramírez Arce, J.L.², Rivera Pérez, C.¹, Rojo Arreola, L.C.¹, Salgado García, R.L.², Salmón Acosta, H.², Sánchez Castrejón, E.³, Sicard, M.T.², Tripp Valdez, M.A.², S., Valenzuela Quiñonez, F.¹, Vázquez Sánchez, R.I.²

¹ Programa de Pesquerías, Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste, S.C.

² Programa de Acuicultura, Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste, S.C.

³ Centro de Investigación Científica y Educación Superior de Ensenada, B.C.

⁴ Laboratoire LEMAR. Univ Brest, IRD, CNRS, IFREMER, Plouzané, France

⁵ Instituto de Investigaciones Oceanológicas, Universidad Autónoma de Baja California



Resumen

La pesquería y el cultivo de almeja mano de león han tenido problemas que han impedido su producción sostenida. La pesquería pasó de 320 toneladas (2009) a tan sólo 56 (2011) y posteriormente al cierre total en 2012. A nivel comercial, el cultivo enfrenta desafíos técnicos y las experiencias han sido mayormente negativas posiblemente por falta de información científica. No obstante, prospecciones recientes y la incursión de nuevos empresarios podrían reactivar las actividades productivas próximamente. Adicionalmente, la incertidumbre asociada a la explotación de la especie podría reducirse gracias al trabajo de varios grupos de investigación, incluido el nuestro. Recientemente un grupo de colaboradores estudiamos si existen diferencias genéticas (evolutivas) en la capacidad de respuesta de diferentes poblaciones de esta almeja ante variaciones de la temperatura, o si la respuesta es genéticamente similar y las diferencias se deben únicamente al efecto del ambiente. Comparamos poblaciones de Laguna Ojo de Liebre (costa del Pacífico de la península) y Bahía de Los Ángeles (Golfo de California). Encontramos que existen diferencias genéticas entre ellas y que la población del Golfo cuenta con mayor capacidad de respuesta (a nivel molecular y del organismo) ante la variabilidad térmica. Falta estimar el riesgo asociado a eventos térmicos extremos y otros factores ambientales; estos estudios incrementarán el conocimiento sobre la especie. Estamos comprometidos a comunicar nuestros hallazgos a los actores clave del sistema productivo (administradores, pescadores y acuicultores), para ayudar a reducir la incertidumbre en sus actividades y mejorar las condiciones de sostenibilidad del recurso y del modo de vida de quienes dependen de él.

Palabras clave: Pesquerías, acuicultura, cambio climático, variabilidad térmica, ecofisiología.

Abstract

The lion's paw scallop fishery and cultivation have had problems that have prevented its sustained production. The fishery went from 320 tons (2009) to 56 tons (2011) and subsequently to total closure. At a commercial level, the culture faces technical challenges and some of the experiences have been mostly negative, possibly due to lack of scientific information. Nevertheless, recent surveys and the incursion of new entrepreneurs could reactivate productive activities rapidly. Additionally, the uncertainty associated with the commercial exploitation of the species could be reduced thanks to the work of several research groups, including ours. We recently studied whether there are genetic (evolutionary) differences in the response

capacity of different populations of this scallop to variations in temperature or if the response is genetically similar and the differences are solely due to the effect of the environment. We compared populations from Laguna Ojo de Liebre (Pacific coast of the peninsula) and Bahía de Los Ángeles (Gulf of California). We found genetic differences between both populations, and that from the Gulf showed a wider response capacity (at molecular and organism level) to thermal variability. The risk associated with extreme thermal events and other environmental factors remains to be estimated; these studies will increase knowledge about the species. We are committed to communicating our findings to key actors in the production system (managers, fishermen, and aquaculturists) as a contribution to reduce uncertainty in their activities and improve the conditions of sustainability of the resource and the lifestyle of those who depend on it.

Keywords: Fisheries, aquaculture, climate change, temperature variability, ecophysiology

Antecedentes

Frecuentemente, cuando aumenta el mercado para recursos pesqueros que son consumidos localmente, se detona el desarrollo rápido de nuevas pesquerías comerciales, incrementando la extracción para abastecer la demanda, incluso antes de que se establezcan las normas formales de gestión.

En el mejor de los casos, la evaluación de las poblaciones permite a los manejadores identificar el tamaño de la población y definir puntos de referencia antes de que la explotación supere la capacidad de crecimiento poblacional. Sin embargo, no es raro que la reducción de la producción, e incluso de los colapsos pesqueros, ocurran antes de que se alcance a generar la información técnica indispensable para el manejo, lo que suele provocar el cierre de las pesquerías y afectar las expectativas de los pescadores. Ante los colapsos, la poca comprensión sobre las causas de la reducción de las poblaciones, como la variabilidad ambiental, los mecanismos ecológicos o la presión pesquera, dificulta frecuentemente la posibilidad de reconstruir las poblaciones con estrategias de gestión fiables y sostenibles.

En algunos casos, particularmente en recursos bentónicos (que viven en contacto con el fondo del mar), la acuicultura puede reaccionar y desarrollarse como una alternativa para satisfacer la demanda, pero, de nuevo, la falta de conocimiento sobre aspectos básicos de la biología y los requerimientos de las especies, así como de su sensibilidad ante factores ambientales adversos, reduce el interés de los productores de acuicultura y, en algunos casos, el fracaso en aventuras de cultivo genera un desencanto que puede perdurar por mucho tiempo en la



memoria de los inversionistas. La almeja mano de león es, desafortunadamente, un ejemplo perfecto de todo esto.

La almeja mano de león (*Nodipecten subnodosus*; Fig. 1) pertenece a la familia de los pectínidos, que agrupa actualmente a más de 350 especies, de las cuales 15 son de importancia económica.

La almeja mano de león se distribuye a lo largo de la costa occidental de Baja California Sur, desde Laguna Ojo de Liebre, México, el centro y sur del Golfo de California hasta las costas de Perú, siendo Laguna Ojo de Liebre, en su extremo templado de distribución, donde se han reportado las mayores densidades. Habita principalmente en canales de lagunas y bahías con fondos arenosos a partir de los 6 m y hasta 100 m de profundidad.

Esta especie puede alcanzar tallas de hasta 22 cm de altura de concha, 1.8 kg de peso total (con concha) y un músculo abductor que puede llegar a ser hasta de poco más de

100 g que representa un pequeño filete de excelente aceptación culinaria. La duración estimada de su ciclo de vida es de hasta cinco años, con un pico reproductivo en el verano a partir del primero o segundo año de vida. Se trata de un hermafrodita funcional; es decir, presenta tanto tejido testicular como ovárico al mismo tiempo y produce tanto esperma como óvulos, aunque la autofecundación es poco probable por la coordinación temporal entre la expulsión de los dos tipos de gametos.



Figura 1. Almeja mano de león (*Nodipecten subnodosus*).

De la esperanza al desencanto

En el noroeste mexicano, la pesca de la almeja mano de león ha sido de carácter artesanal, realizada por grupos locales, sin acceso a infraestructura significativa para el procesamiento de la captura. La mayor parte de la captura se ha dado históricamente en la región conocida como Pacífico Norte, en la parte media de la costa occidental de la península de Baja California, y especialmente en las lagunas de Guerrero Negro y Ojo de Liebre.

Entre 1970 y 1990, la captura fue incipiente y no se cuenta con estadísticas pesqueras confiables, pues su registro se encuentra mezclado con el de otras especies, como las almejas catarina (*Argopecten ventricosus*) y voladora (*Euvola vogdesi*) (Morales-Hernández y Cáceres-Martínez, 1996). A partir de 1995 se empieza a registrar de forma independiente, particularmente en laguna Ojo de Liebre, donde se extrajo para tratar de atender el mercado tras las disminuciones en la producción de captura de la almeja catarina. Su producción aumentó de unas 5 toneladas (t) en 1995 a un promedio de 260 t por año en la segunda mitad de los 2000s, cuando alcanzó un valor de unos 4 millones de dólares por año. En 2009 la captura de esta especie en la región alcanzó su máximo histórico con 320 t, para posteriormente caer a 280 en 2010 y después a niveles muy bajos, coincidiendo con mortalidades masivas, aparentemente no asociadas a

la pesca. En 2011, la captura fue de tan solo 56 t y desde el 2012 se detuvo la extracción dada la afectación de la población, tanto en cantidad como calidad (salud de los organismos y aspecto del músculo), afectando así a unas 300 familias de pescadores de la zona que dependían del recurso (Ruíz-Verdugo et al., 2016).

A pesar de que aún hoy día el mercado sigue demandando este producto, y que de hecho se ha vuelto tendencia gastronómica regional, la captura comercial se encuentra lejos de poder abastecer la demanda y no aparece en la carta nacional pesquera desde el 2012.

En cuanto al cultivo, la experiencia en el pasado ha sido también de desencanto.

El cultivo de la mano de león se ha logrado satisfactoriamente a nivel técnico piloto. Se han explorado diferentes técnicas de cultivo, desde el repoblamiento de bancos hasta el cultivo intensivo, que implica el manejo controlado de los individuos a altas densidades, utilizando artes de cultivo en suspensión, como las canastas perleras, las linternas japonesas y las canastas ostrícolas de plástico. Sin embargo, la eficiencia de los artes de cultivo en términos de crecimiento depende fuertemente del sitio y las condiciones ambientales asociadas, como la disponibilidad de alimento, la dinámica del cuerpo de agua, la presencia de depredadores, el tipo de sedimento, entre otros. En este sentido, la selección de sitio representa un reto mayor para la actividad.

A nivel comercial, el cultivo aún enfrenta dos retos mayores: el abastecimiento de semilla y el manejo sanitario. Respecto al primero, la captación de semilla del medio es extremadamente variable e impredecible y la alternativa, la producción de semilla en laboratorio, se ha logrado sólo de manera parcial (Maeda-Martínez y Lodeiros-Seijo, 2016). El primer lote de semillas que se obtuvo de almeja mano de león fue en el Centro Reproductor de Especies Marinas del Estado de Sonora (CREMES) en 1993 con unas 50,000 semillas. En 1997, se obtuvieron las primeras



20,000 semillas en el Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste (CIBNOR), y el proceso de maduración de la tecnología pudo continuarse hasta alcanzar una producción de aproximadamente dos millones de semillas en el 2001. Hoy día, CIBNOR es uno de los centros que tiene mayor dominio en la producción de semilla. Sin embargo, la demanda por las mismas es limitada. En parte por el segundo gran reto, relacionado con el rendimiento en cultivo debido a ciclos prolongados de cultivo de 1 a 2 años, la incidencia de patógenos y la presencia de depredadores, entre otros. Por ende, para el mantenimiento de los organismos en el mar, tanto en suspensión como en fondo, se requieren condiciones de alta calidad del agua, sin contaminación microbiológica y química y cierto grado de mantenimiento de los cultivos (e.g. limpieza y desdobles).

Las experiencias de la implementación de cultivos comerciales de la almeja mano de león han sido en

general negativas, en buena medida por la incertidumbre asociada a enfermedades y mortalidades masivas potencialmente acentuadas por eventos climáticos. En el cultivo de esta especie resalta la enfermedad causada por organismos perforadores (poliquetos y esponjas), que afecta la forma de la concha y su efectividad como protección, presumiblemente dejando a los organismos más expuestos al ingreso de bacterias oportunistas y al estrés ambiental (González-Ortiz, 2016). Adicionalmente, se trata de un cultivo de ciclo relativamente largo, de entre 430 y 540 días, y abarca la siembra inicial (30 a 60 días), la preengorda (100 a 120 días) y la engorda (300 a 390 días). Es decir, para lograr individuos de talla comercial es necesario mantener a los organismos en el mar por periodos prolongados, con el riesgo que esto implica, por las razones anteriormente expuestas.

Del desencanto a la esperanza

No todas son malas noticias. Resultados de prospecciones recientes y la incorporación de nuevos empresarios acuícolas están abriendo una ventana de esperanza para reactivar tanto la actividad pesquera como el cultivo en un futuro relativamente cercano.

En un comunicado de prensa del Instituto Mexicano de Investigación en Pesca y Acuicultura Sustentables (IMIPAS), antes Instituto Nacional de la Pesca (INAPESCA), a mediados del 2023 (INAPESCA, 2023) se anunció que, sobre la base de prospecciones recientes que muestran señales de recuperación de las poblaciones de almeja mano de león en la región Pacífico norte, el Instituto ha formulado un plan de manejo para la recuperación de la pesquería que establecerá los lineamientos para un aprovechamiento ordenado y sustentable, en beneficio de las organizaciones pesqueras en la región.

Por su parte, si bien muchos productores acuícolas sufrieron el desencanto de la mano de león, existen otros que están

reingresando a las filas de la esperanza. Sabemos, por ejemplo, que de los 831 permisos de acuicultura otorgados por la Comisión Nacional de Pesca y Acuicultura (CONAPESCA) entre 2014 y 2019 (la información confiable más reciente), cerca del 10% incluyen a la mano de león (junto con otras especies), 6% para recolección de reproductores y 4% son de acuicultura de fomento.

Con el fin de no repetir la historia de desencanto, la pregunta central ante estas nuevas perspectivas es ¿cómo reducir la incertidumbre tanto en el manejo de la pesquería como en el éxito de los cultivos? La respuesta está, evidentemente, en la disponibilidad de conocimiento técnico y científico.

Hasta hace poco se habían realizado una cantidad relativamente modesta de estudios alrededor de la almeja mano de león (*N. subnodosus*). Una búsqueda reciente de toda la literatura generada durante casi tres décadas (Joachin-

Mejia, 2022), tanto en revistas científicas y libros de circulación como en literatura gris arrojó únicamente 110 documentos (un libro especializado, 74 artículos científicos, 31 tesis y el resto son capítulos de libro y memorias en extenso). La mayor parte de estos trabajos se realizaron en Centros Públicos de Investigación, como el Centro de Investigación Científica y Educación Superior de Ensenada, B.C. (CICESE), el Centro de Investigación en Alimentación y Desarrollo (CIAD) y el CIBNOR, así como en universidades estatales autónomas de Baja California (UABC), Baja California Sur (UABCS), la Universidad de Sonora (UNISON), o bien por el INAPESCA (hoy IMIPAS) (Fig. 2).

En la actualidad, estamos viviendo un repunte en el esfuerzo de investigación respecto de esta especie y sabemos que viene en los próximos años un aumento significativo de publicaciones, gracias al trabajo de varios grupos de investigación.

El nuestro es uno de esos grupos, enfocado a las respuestas fisiológicas ante el Cambio Climático y organizado alrededor de un proyecto de investigación financiado por el Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías (CONAHCYT 78911, Ciencia de Frontera 2019), donde la pregunta rectora de investigación fue si existen diferencias de naturaleza genética (evolutiva) en la capacidad de respuesta de diferentes grupos poblacionales de esta almeja ante variaciones de la temperatura, o si la capacidad de respuesta es genéticamente similar y las diferencias observadas entre poblaciones se deben únicamente al efecto del ambiente. La respuesta a esta pregunta ayuda a resolver cuestionamientos de naturaleza más aplicada, como si tendrán la misma capacidad de respuesta ante el cambio climático (incluido el aumento de frecuencia e intensidad de eventos climáticos extremos), todas las poblaciones de almeja mano de león del noroeste de México o si es viable utilizar individuos de cualquier banco silvestre para establecer cultivos en cualquier localidad de la región.

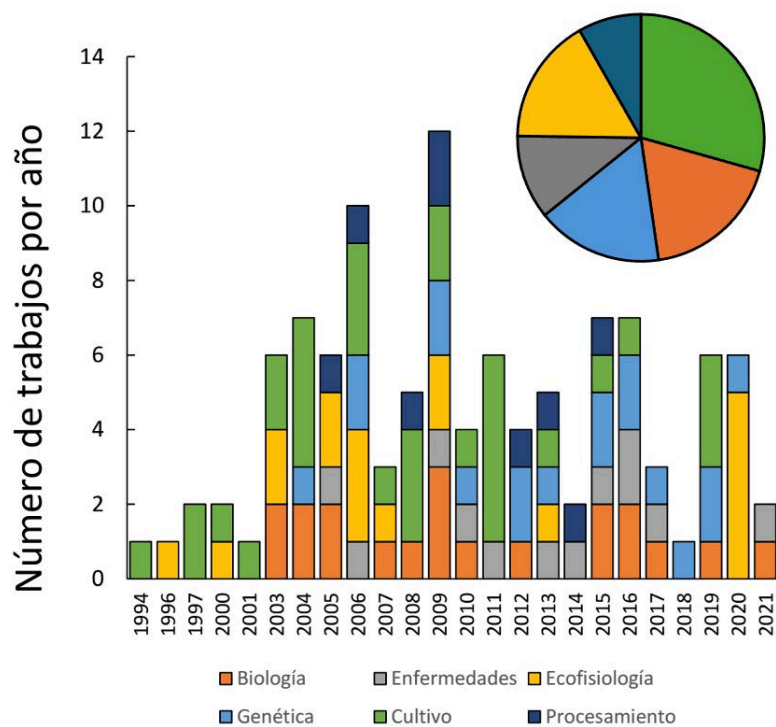


Figura 2. Número de estudios relacionados con la almeja mano de león. La figura muestra que aproximadamente una quinta parte de los estudios realizados hasta 2021 abordaron aspectos biológicos y ecológicos generales, como distribución geográfica, morfología y anatomía, ciclo de vida, reproducción, alimentación, hábitat y dinámica poblacional (color naranja), un 16% se refieren a estudios de corte ecofisiológico (mostaza), principalmente en apoyo al desarrollo acuícola, otro 16% está enfocado a genética (azul claro), incluyendo tanto la caracterización de poblaciones silvestres como algunas aplicaciones para la producción acuícola y un 8% de los estudios se refieren a la bioquímica post mortem y técnicas de mantenimiento y procesamiento del producto (principalmente el callo) para su más eficiente comercialización (azul oscuro). Los temas de cultivo y manejo pesquero (verde) concentran poco menos de una tercera parte de los trabajos publicados, e incluyen ensayos de cultivo de larvas y juveniles en laboratorio, técnicas de producción en ambiente controlado, nutrición acuícola, pruebas de diferentes técnicas de cultivo, para acuicultura, y análisis del crecimiento en poblaciones silvestres, reconstrucción histórica de la actividad pesquera y propuestas de esquemas de manejo, en el caso de las pesquerías. A pesar de que el restante 10% de trabajos publicados ha estado enfocado específicamente al estudio de enfermedades y la sensibilidad de la especie (gris), incluyendo la detección y evaluación de efectos de organismos perforadores como los poliquetos y esponjas y la presencia y sensibilidad ante patógenos como bacterias del género *Vibrio*, no fueron suficientes para esclarecer a ciencia cierta las causas y mecanismos asociados a las mortandades masivas de la mano de león, tanto en poblaciones naturales como en cultivo.

Una primera pregunta que abordamos fue si existen diferencias ambientales entre sitios que nos hicieran esperar diferencias poblacionales en la respuesta ante la variabilidad de la temperatura. Tomamos como casos de estudio las dos localidades más contrastantes de donde teníamos registro de

la presencia de poblaciones silvestres: Laguna Ojo de Liebre, en la parte central de la costa occidental de la península de Baja California y Bahía de Los Ángeles, en la parte centro norte de la costa oriental de la península, dentro del Golfo de California (Fig. 3). En términos generales, las temperaturas en la costa oeste de la península son más bajas y menos variables que en el Golfo de California. En Laguna Ojo de Liebre encontramos temperaturas promedio de 19.4°C, y un rango histórico (mínima - máxima) entre los 13.1 y los 26.4°C, mientras que en Bahía de Los Ángeles la temperatura promedio se encontró en 22.7°C con una amplitud histórica de 19.5°C, de 12.8 a 32.3°C. La varianza total de las series de temperatura es de más del doble en Bahía de Los Ángeles que en Laguna Ojo de Liebre, principalmente por una mucho mayor amplitud del ciclo estacional (Joachin-Mejia, 2022).

A partir de esta información, nuestra segunda pregunta fue si existían o no diferencias genéticas (linajes diferentes) entre las poblaciones de mano de león provenientes de estas dos localidades con condiciones ambientales contrastantes. Utilizando herramientas genéticas, nuestros resultados indicaron una elevada divergencia poblacional; es decir, son linajes que han evolucionado de manera independiente desde hace miles de generaciones.

del ecológico (expresión de la plasticidad fenotípica; es decir, la capacidad de cambiar sus características físicas, fisiológicas o comportamentales en respuesta a estímulos ambientales).

Se desovaron en laboratorio adultos silvestres de cada una de las localidades por separado, generando así larvas de grupos experimentales representativos de cada sitio. Tras dos meses y medio en laboratorio, los individuos alcanzaron una talla de semilla (3-5 mm) y ambos lotes se llevaron a crecer bajo las mismas condiciones en campo (Laguna Ojo de Liebre). Después de aproximadamente 4 meses, ya en su etapa juvenil (3-5 cm), las almejas se regresaron al laboratorio para realizar los experimentos.

Evaluamos la temperatura letal media de individuos recién llegados de campo (la temperatura a la que, después de un cierto tiempo de exposición, muere el 50% de los animales de prueba), a través de un experimento

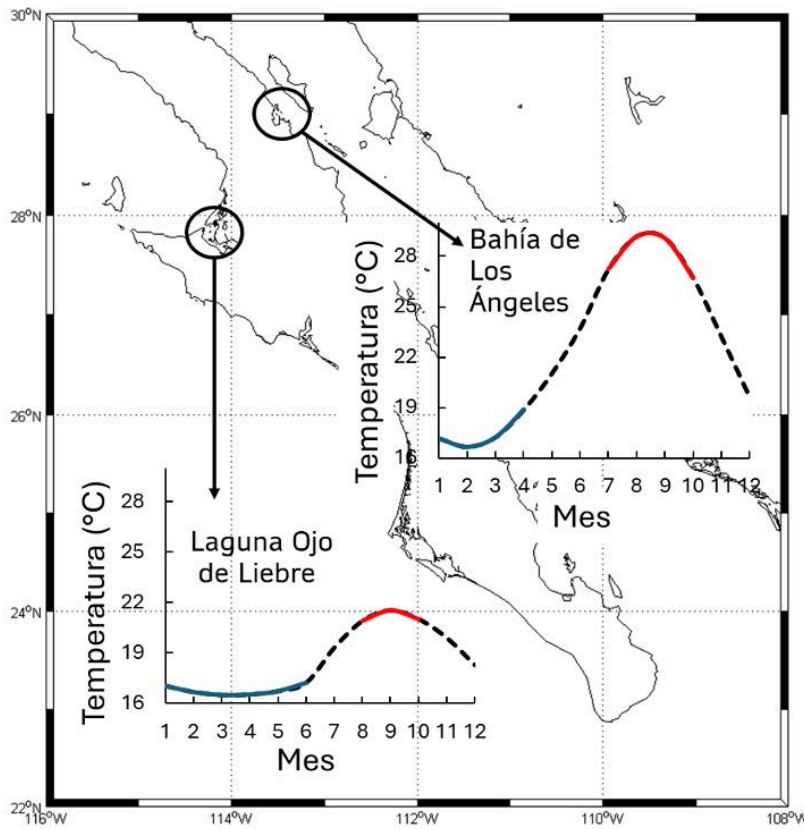


Figura 3. Mapa indicando los sitios de origen de las poblaciones estudiadas y el ciclo anual de temperatura (calculado sobre el periodo base de 1982 a 2020)

Exploramos entonces si esta diferencia genética se reflejaba en la capacidad de respuesta de los organismos ante condiciones térmicas adversas, para lo cual planteamos una serie de experimentos en laboratorio. Inicialmente generamos un lote de organismos experimentales que nos permitiera aislar el efecto genético (diferencias evolutivas en la capacidad de respuesta)



donde se registró la mortalidad en un periodo de 96 h a temperaturas de entre 5 y 35°C.

Encontramos que las almejas de la población de Bahía de Los Ángeles presentaron una mayor resistencia a temperaturas altas que las de Laguna Ojo de Liebre (32.13°C y 30.58°C, respectivamente).

Con el objetivo de comprender mejor el efecto de la variabilidad de la temperatura y comparar la capacidad de respuesta de ambas poblaciones dentro del rango de tolerancia de la especie, realizamos un experimento donde mantuvimos a individuos de ambos lotes experimentales (de las dos localidades) por 30 días en tres regímenes de variabilidad térmica diferentes: a temperatura constante (21°C), sometidos a oscilaciones regulares de temperatura de un ciclo por día, con valores mínimos de 17°C y máximos de 25°C y un régimen de cambios aleatorios de temperatura cada hora, también en el intervalo entre 17 y 25°C. Al término de

ese periodo, los organismos fueron expuestos a un cambio agudo de temperatura, llevándolos de una temperatura de 21 a 28°C en pocas horas.

Al término del periodo de simulación de los regímenes térmicos y también tras el reto agudo, medimos las tasas metabólicas (respiración, ingestión, excreción y asimilación) de forma individual para estimar el equilibrio entre la cantidad de energía ingerida y la utilizada para mantener sus funciones corporales y actividades físicas (balance energético). En términos generales, encontramos muy poca diferencia entre poblaciones, tanto en la tasa respiratoria, que sirve como indicador de cuánta energía gasta el organismo para su mantenimiento, como en el potencial de crecimiento, que representa la energía “adicional” que el organismo puede canalizar al crecimiento y a la reproducción, una vez atendidas las funciones de mantenimiento. No detectamos grandes diferencias en la respuesta de los animales entre los tres tratamientos térmicos.

Tras el reto agudo, la respuesta general de ambas poblaciones, sin diferencia entre ellas, fue el aumento de la tasa respiratoria y la disminución del potencial de crecimiento, reflejando condiciones de estrés en las cuales se reconoce que aumenta el gasto energético para su mantenimiento.

Otro componente del crecimiento que estudiamos fue la formación de concha, que es controlada por un conjunto particular de proteínas y que, se reconoce, dependen de las condiciones ambientales. A pesar de que la expresión de la mucina (una de las proteínas clave en este proceso) en el manto (el tejido responsable del proceso de formación de concha) no fue significativamente diferente entre las poblaciones de ambos sitios, sí detectamos diferencias en la capacidad de calcificación ante el modo irregular de variabilidad térmica, siendo menor en los juveniles de Laguna Ojo de Liebre y sugiriendo, por lo tanto, que esta población tiene una menor capacidad de respuesta ante

la variabilidad de la temperatura que la de Bahía de Los Ángeles, en términos de la formación de concha.

Otro indicador de la condición del organismo es el balance energético a nivel celular basado en los niveles de tres moléculas clave que reflejan la necesidad de energía: el adenosín trifosfato (ATP), adenosín difosfato (ADP) y adenosín monofosfato (AMP). En condiciones óptimas se espera un balance entre la energía que se consume y la que se produce en forma de ATP. Sin embargo, cuando un organismo experimenta cambios extremos de temperatura, este equilibrio se rompe porque el mantenimiento demanda más energía de la que se produce. Nuestras observaciones arrojaron que, si bien ambas poblaciones presentaron un desbalance en la homeostasis celular en respuesta a valores extremos de temperatura, algunos de los indicadores a nivel celular sugieren que la población de Bahía de Los Ángeles está mejor adaptada para conservar energía ante condiciones de mayor variabilidad estacional en la temperatura que la población de Laguna Ojo de Liebre.

Uno de los mecanismos de respuesta ante factores de estrés a los que se ha puesto mayor atención en años recientes se relaciona con la actividad de un grupo particular de proteínas conocidas como chaperonas o proteínas de choque térmico (HSP, por sus siglas en inglés). Estas proteínas ayudan a mantener la estabilidad celular ante condiciones adversas, ya que asisten en el plegamiento correcto de otras proteínas y participan en la reparación o degradación de aquellas que han sido dañadas. En el proyecto pudimos medir la activación de diferentes tipos de proteínas de choque térmico (HSP40, dos tipos de HSP70 y HSP90), observamos que no difiere sustancialmente entre las dos poblaciones ante las oscilaciones térmicas del bioensayo. Sin embargo, ante el incremento agudo de temperatura vimos una mayor expresión de dos de ellas, la HSP70 y la HSP90 en los organismos de la población de Bahía de Los Ángeles, lo que

nos indicó que una mejor adaptación de esta población ante condiciones térmicas adversas.

En contraste, algunas mediciones de transcriptómica (cómo y cuánto se expresan los genes ante diferentes condiciones ambientales) sí mostraron diferencias entre poblaciones. Si bien, en ambas poblaciones detectamos patrones de expresión asociados al metabolismo energético y el sistema inmune en respuesta a la variabilidad térmica, cada población presentó respuestas particulares, especialmente asociadas al metabolismo de carbohidratos y aminoácidos, que sugieren que la población de Bahía de Los Ángeles tiene un mayor potencial de plasticidad fenotípica que la de Laguna Ojo de Liebre.

Además de las diferencias genéticas, encontramos diferencias en los procesos epigenéticos (activación y desactivación de los genes) que modifican la respuesta ante diferentes condiciones



ambientales. En el proyecto determinamos que esta almeja sí cuenta con genes que participan en este proceso, aunque su expresión es menor respecto a otras especies de moluscos. Al analizar a los individuos de ambas poblaciones, pero crecidos en las mismas condiciones, encontramos respuestas similares en la expresión de los genes involucrados en la metilación. Sin embargo, tras la exposición de los organismos a un reto agudo de temperatura, la expresión de genes involucrados en la metilación fue menor en almejas de Laguna Ojo de Liebre en comparación con las de Bahía de Los Ángeles.

En resumen, hasta el momento podemos decir que existen diferencias genéticas en la capacidad de respuesta ante condiciones térmicas adversas entre ambas poblaciones, derivadas de la adaptación evolutiva a las condiciones de variabilidad propias de cada sitio. En general, notamos

que la población del interior del Golfo de California (Bahía de Los Ángeles), históricamente expuesta a mayores niveles de variabilidad de temperatura, cuenta con una mayor capacidad de respuesta, y se establecieron algunas bases sobre los mecanismos que intervienen, desde el nivel molecular hasta el organismo como un todo.

Hasta dónde esto les confiere a las poblaciones del Golfo de California una mejor perspectiva de supervivencia a largo plazo ante los embates del cambio climático depende, además de la capacidad de respuesta, de las tendencias ambientales en cada sitio.

Cruzando información sobre el historial térmico de los sitios a lo largo de la costa de la península de Baja California con mediciones fisiológicas de laboratorio y de crecimiento en cultivo, confirmamos que las localidades en la costa del Pacífico (Bahía Magdalena y el complejo lagunar Ojo de Liebre-Guerrero Negro-Manuela) tienen una mayor aptitud para el cultivo de almeja mano de león que localidades de Golfo de California (Bahías de Los Ángeles, Loreto y La Paz) y corren un menor riesgo ante eventos climáticos extremos.

Por supuesto, hace falta complementar la estimación del riesgo asociado a eventos térmicos extremos con el derivado de otros factores ambientales, como la disponibilidad de alimento, los eventos de reducción drástica de oxígeno en el agua, la acidificación del océano, la presencia de depredadores y especies invasoras y la prevalencia de enfermedades y patógenos.

Tenemos también información de cómo el modo de variabilidad (regular, constante e irregular) afecta los diferentes procesos fisiológicos, pero seguimos trabajando para reunir otras piezas del rompecabezas, como indicadores de estrés oxidativo (el desequilibrio entre la producción de radicales libres que pueden dañar al organismo y la capacidad de éste para contrarrestar dichos efectos nocivos mediante antioxidantes), los cambios

en la composición bioquímica en los diferentes tejidos y la movilización interna de moléculas combustibles. Más aún, estamos analizando los resultados de un segundo bioensayo donde esperamos poder entender la influencia del nivel de variabilidad en el disparo de los mecanismos de respuesta.

Confiamos en que a medida que todos estos resultados sean publicados en literatura científica, junto con aquellos de los otros grupos de investigación involucrados en el estudio de la mano de león, se alentará la construcción aún más acelerada de conocimiento sobre la especie. Igualmente, estamos convencidos de que al comunicar lo que estamos aprendiendo a los actores clave del sistema productivo, incluidos administradores de los recursos, pescadores y acuicultores, ayudaremos a reducir la incertidumbre en sus actividades y mejorar las condiciones de sostenibilidad del recurso y del modo de vida de quienes dependen de él.

Bibliografía y referencias

- González-Ortíz, L. 2016. Poliquetos (Annelida: Polychaeta) y esponjas (Porifera: Demospongiae) perforadores de la Almeja Mano de León (*Nodipecten subnodosus*) en la Laguna Ojo de Liebre, Guerrero Negro, Baja California Sur, México. Doctorado. Universidad Autónoma de Nuevo León. México. 144pp.
- INAPESCA. Comunicado de prensa 3 de mayo del 2023. En: <https://www.gob.mx/inapesca/prensa/> (consultado el 12/11/2023).
- Joachin-Mejia, N.G. 2022. Caracterización del hábitat térmico de la almeja mano de león (*Nodipecten subnodosus*) en el noroeste mexicano. Licenciatura. Universidad Nacional Autónoma de México. México. 65pp.
- Maeda-Martínez, A.N. y C. Lodeiros-Seijo. (Eds.). 2011. Biología y Cultivo de los Pectínidos del Género *Nodipecten*. LIMUSA. México. 400pp.
- Morales-Hernández, R. y C. Cáceres-Martínez. 1996. *Pesquería de Almeja Mano de León*. 87-100. En: Casas-Valdez, M. y G. Ponce-Díaz. (Eds.). Estudio del potencial pesquero y acuícola de Baja California Sur, Vol. 1. Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste, S.C. La Paz, BCS. México. 350pp. <http://cibnor.repositorioinstitucional.mx/jspui/handle/1001/888>
- Ruíz-Verdugo, C.A., V. Koch, E. Félix-Pico, A.I. Beltrán-Lugo, C. Cáceres-Martínez, J.M. Mazón-Suastegui, M. Robles-Mungaray y J. Cáceres-Martínez. 2016. *Chapter 29 - Scallop Fisheries and Aquaculture in Mexico*. 1111-1125. En: S.E. Shumway and G.J. Parsons (Eds.). *Developments in Aquaculture and Fisheries Science* Vol. 40. Elsevier. DOI: 10.1016/B978-0-444-62710-0.00029-8



Cita

Lluch-Cota, S.E., D.P. Carreño León, P. Cruz Hernández, C. Escobedo Fregoso, C.E. Galindo Sánchez, et al., La almeja mano de león: una historia de desencanto y esperanza. **Recursos Naturales y Sociedad**, 2024. Vol. 10 (2): 51-64. <https://doi.org/10.18846/renaysoc.2024.10.10.02.0005>

Sometido: 1 de julio de 2024

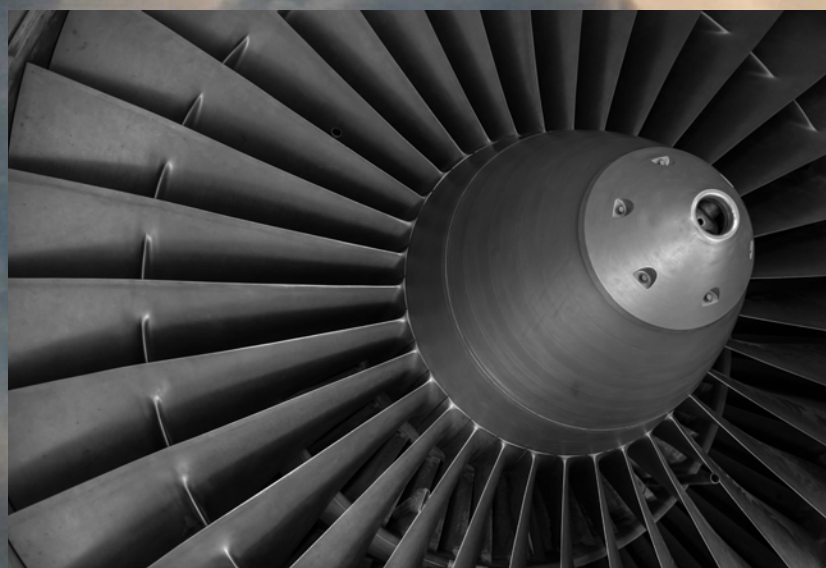
Aceptado: 17 de septiembre de 2024

Editor asociado: Dr. Arturo Sánchez Paz

Editor ejecutivo: Dr. Arturo Sánchez Paz

Diseño gráfico editorial: Lic. Gerardo Hernández

Portada: pexels-inspiredimages-157515.jpg



Del suelo mexicano a las nubes: panorama de la bioturbosina en México

From Mexican soil to the clouds: an overview of bioturbosine in Mexico

Recursos Naturales y Sociedad, 2024. Vol. 10 (2): 65-75. <https://doi.org/10.18846/renaysoc.2024.10.10.02.0006>

Elizabeth Ibarra Lizárraga¹, David U. Santos Ballard^{2,3}, Dulce L. Ambriz Pérez^{2,4}.

¹Maestría en Ciencias Aplicadas, Universidad Politécnica de Sinaloa, México.

²Ingeniería en Energía, Maestría en Ciencias Aplicadas. Universidad Politécnica de Sinaloa, México.

³Laboratorio de Ecotoxicología, Centro de Investigación en Alimentación y Desarrollo (CIAD) Unidad Mazatlán.

⁴Estancias Postdoctorales por México 2022, CONAHCYT. México.

*dambriz@upsin.edu.mx

Resumen

Los combustibles aéreos son perjudiciales para el medio ambiente e incluso para la salud, además de que generan una gran cantidad de gases de efecto invernadero. Se ha considerado que la aviación contribuye al calentamiento global alrededor de un 5%, y ha emitido más de 32 mil millones de toneladas de CO₂ al ambiente, por lo que se han buscado alternativas para mitigar dicho impacto ambiental. Una de las alternativas prometedoras ha sido el desarrollo de la *bioturbosina*, un biocombustible que cumple con las mismas especificaciones técnicas que la turbosina convencional, pero con una menor huella de carbono. Este bioenergético se genera a partir de distintos procesos que transforman a la biomasa (materia orgánica), que puede provenir de origen animal, vegetal o incluso de residuos urbanos o industriales. En este sentido, México también ha sido participante de la transición energética, promoviendo la investigación para el desarrollo de *bioturbosina* a partir de la materia orgánica disponible en la región y promoviendo la utilización de *bioturbosina* por parte de aerolíneas mexicanas. Si bien, el futuro de la *bioturbosina* en México es incierto, hay que destacar el hecho de que México cuenta con gran potencial para la generación de este biocombustible, desde los recursos naturales, hasta el desarrollo de investigación nacional. En este artículo se describen aspectos claves para entender el “viaje” de la *bioturbosina* en nuestro país.

Palabras clave: Biocombustibles, Energías renovables, aeronaves.

Abstract

Aviation fuels are considered as harmful to the environment and health; besides, its use is related to a large amount of greenhouse

gases generation (GHG). It has been reported that the aviation sector is responsible for almost 5% of the global warming recorded in the world and, this sector has emitted more than 32 billion of CO₂ tons to the environment. Due to this, different alternatives have been proposed to mitigate this impact. One of these alternatives with great interest is the development of biojet fuel that presents the same technical specifications as the conventional jet fuel, but with a lower carbon footprint. This bioenergetic product could be generated from different processes related with biomass (organic matter) transformation, with possibility of use materials from animal, plants or even urban or industrial wastes. In this sense, Mexico has entered into an energy transition, promoting research for biojet fuel development from organic matter regionally available and also promoting the use of biojet fuel by mexican airlines. Although the future of biojet fuel in Mexico is still uncertain,

it is important to highlight that Mexico shows great potential for the generation of this biofuel, including natural resources (as feedstock) and scientific resources. This article describes some key aspects to understand the “journey” of biojet fuel in our country.

Key words: Biofuels, Renewable energy, airplanes.

Introducción

Desde niños estamos maravillados con la posibilidad de volar, algunos de nosotros observábamos fijamente a insectos voladores y aves, esperando entender cómo es que podían volar; otros nos tendíamos en el césped esperando ver pasar aviones e imaginábamos cuál pudiera ser su destino; incluso desde antes, nuestros padres atraían nuestra atención de esta manera para alimentarnos: “ahí viene un avión”. Y es que, gracias a la globalización, el transporte aéreo se ha vuelto algo cotidiano y más accesible, ya sea para trasladarnos o para el envío de nuestras compras. Sin embargo, esta multiplicación de vuelos ha traído consecuencias al medio ambiente, con la posible contribución al cambio climático. Debido a esto, diversos grupos de científicos han desarrollado un biocombustible llamado *bioturbosina*, el origen de los biocombustibles viene de la materia orgánica recientemente viva, por lo que representan una alternativa más amigable con el planeta. La *bioturbosina* es cada vez más empleada en el mundo, y México no es la excepción, nuestro país ha participado activamente en el desarrollo de este interesante producto energético, y es de lo que hablaremos a continuación.

Antecedentes

Combustible para aeronaves

Dependiendo del tipo de aeronave, se pueden utilizar diferentes tipos de combustibles, por ejemplo, los aviones de combate por

lo general usan JP-5 y JP-8, mientras que la mayoría de aviones comerciales y privados, así como los helicópteros, usan Jet A, mejor conocido como turbosina, siendo este último el más utilizado. Los tres tipos de combustible (JP-5, JP-8 y Jet A) son una mezcla de diferentes hidrocarburos, o sea, que contienen solamente carbono e hidrógeno; estos compuestos son derivados del petróleo crudo (ATSDR, 2017).

Aunque estos combustibles han sido utilizados por décadas, se ha determinado que son perjudiciales para el medio ambiente e incluso para la salud, ya que algunos de sus componentes pueden movilizarse lentamente del suelo al agua subterránea, lo que tiene un impacto negativo sobre el agua de consumo humano y animal, agua de riego, sembradíos y suelos agrícolas. Otros compuestos se adhieren a partículas en el agua y se depositan en el sedimento del fondo, donde pueden permanecer por décadas. Si bien estos



riesgos pueden afectar la salud solo de la población que trabaja directamente con ellos, que bebe o nada en agua contaminada o que vive cerca de donde se vierten los residuos, no dejan de ser alarmantes; sin embargo, su mayor impacto ambiental radica en la generación de gases de efecto invernadero (GEI) (ATSDR, 2017).

Relación de la aviación con los GEI y el cambio climático

Los GEI son gases que se encuentran en la atmósfera, ya sean de origen natural o antropogénico (resultantes de la actividad humana), que absorben y emiten radiación infrarroja, lo que causa el famoso efecto invernadero. El efecto invernadero es un fenómeno de regulación de la temperatura del planeta, gracias a los gases atmosféricos se incrementa la temperatura de este.

Dicha regulación es necesaria, ya que sin ella prevalecerían temperaturas frías o incluso bajo cero. El problema surge cuando cambia y/o aumenta la concentración de estos gases, provocando el cambio climático. La Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático reconoce seis GEI: dióxido de carbono (CO_2), metano (CH_4), óxido nitroso (N_2O), hidrofluorocarbonos (HFC), perfluorocarbonos (PFC) y hexafluoruro de azufre (SF_6), siendo el CO_2 el más importante, ya que la producción de éste está altamente relacionada con el uso de combustibles fósiles (CCPY, s.f.).

Al respecto, diversos grupos de científicos han estudiado la contribución del sector de la aviación al cambio climático, estimando que es responsable de aproximadamente el 4.9% del calentamiento global creado por el hombre, y que desde que inició en 1940, hasta el 2018, ha generado 32.6 mil millones de toneladas de CO_2 , de las cuales más de la mitad se generaron en los últimos 20 años debido al incremento de vuelos (EN, 2019).

¿La bioturbosina podría ser la respuesta?

Para mitigar el impacto ambiental de la aviación, los gobiernos

de varios países han propuesto distintas alternativas. Una de las más populares es la propuesta de la Unión Europea, que plantea aumentar los impuestos a la actividad de la aviación debido a su alta contaminación, principalmente en el tema de combustibles.

Otras alternativas son el desarrollo de combustibles y motores más eficientes, así como la promoción del uso de combustibles alternativos que tengan una menor huella de carbono (Fig.1), como es la *bioturbosina*. Sea cual fuere la respuesta, deben tomarse medidas urgentes, ya que de acuerdo con la Agencia Europea de Seguridad Aérea (EASA por sus siglas en inglés), el aumento del transporte provocará que en 2040 las emisiones de CO_2 y N_2O aumenten, al menos, un 21% y un 16% respectivamente (elperiodicodelaenergia.com, 2019).

De acuerdo con lo anterior, destaca como alternativa la *bioturbosina*.

Este biocombustible proviene de la biomasa, es decir, de origen orgánico. Su nombre técnico es mezcla de bioquerosenos parafínicos sintéticos (bkp o kps), y está conformada por una mezcla de hidrocarburos lineales y ramificados. La *bioturbosina* cumple con las mismas especificaciones técnicas que la turbosina convencional y por ello pueden mezclarse con ésta de manera segura. La similitud en propiedades es de gran importancia, dadas las condiciones extremas de temperatura y presión a las que se somete el combustible durante el vuelo. La *bioturbosina* cumple particularmente con la especificación de resistencia al frío y alto contenido energético, además, que dichas características permiten que pueda ser utilizada por los mismos motores (Romero-Izquierdo y col., 2016; IATA, 2016).

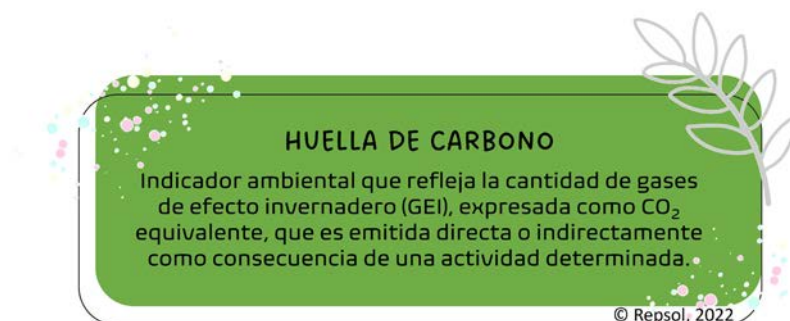


Figura 1. Concepto de la huella de carbono.

Otra cuestión interesante de la *bioturbosina* es que puede ser producida a partir de materia orgánica de origen animal o vegetal, lo que ofrece una vasta gama de opciones, permitiendo aprovechar incluso cualquier tipo de residuo orgánico rico en lípidos o lignocelulosa. Además, el hecho de aprovechar los residuos permite disminuir considerablemente la huella de carbono de la *bioturbosina*, si a esto le sumamos que se produzca a partir de organismos fotosintéticos como plantas, macroalgas y microalgas, que durante su formación estuvieron consumiendo CO₂ ambiental, el impacto en el descenso de la huella de carbono es notable, con respecto a la turbosina convencional (Romero-Izquierdo y col., 2016).

Por otro lado, existen varios procesos para la obtención de *bioturbosina*, dependiendo de la composición de la materia prima. Por ejemplo, los triglicéridos pueden convertirse en hidrocarburos renovables mediante hidroxigenación, hidroisomerización e hidrocrackeo. Los azúcares y almidones pueden fermentarse para producir alcohol, que posteriormente se somete a reacciones de oligomerización, craqueo e isomerización para producir hidrocarburos renovables. Mientras que, los materiales lignocelulósicos pueden someterse a un proceso de pirólisis para obtener un bioaceite que es hidrotratado, o bien gasificarse para obtener un gas sintético conocido como *syngas*, el cual se somete a un proceso tipo Fischer-Tropsch, para obtener con este paso los kps. En todos los casos, los productos deben pasar por un proceso de refinación o purificación a través de columnas de destilación (Fig. 2) (Gutiérrez y col., 2022).

Se ha reportado que el uso de la *bioturbosina* se ha extendido, sobre todo por los compromisos ambientales que han establecido las naciones en el acuerdo de París (un tratado internacional firmado en el 2015, del que México forma parte), donde algunos líderes mundiales se comprometieron a disminuir sustancialmente las emisiones de gases de efecto invernadero que emiten sus países (Naciones Unidas, s.f.). Para cumplir con tal objetivo, se comprometieron múltiples acciones, entre ellas establecer normativas que dictaban adicionar *bioturbosina* al combustible convencional de origen fósil (turbosina) en las siguientes cantidades: 1% para el año 2015, 10% para 2017, 15% para 2020, hasta alcanzar 50% en 2050. Sin embargo, estas cifras no han sido alcanzadas al día de hoy (Romero-Izquierdo y col., 2016; Gutiérrez y col., 2022).

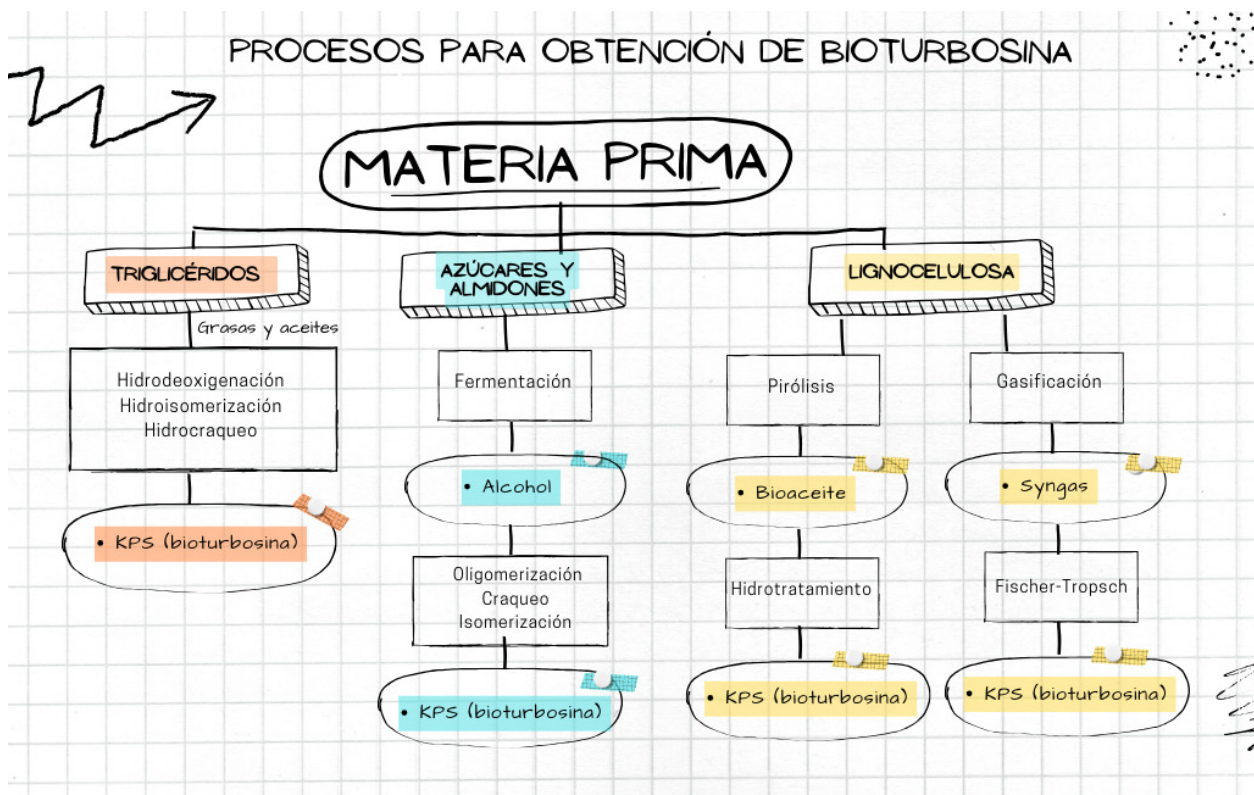


Figura 2. Procesos de obtención de bioturbosina dependiendo la materia prima. (Elaboración propia).

México y la bioturbosina

Anualmente, en México se consumen aproximadamente 3,200 millones de litros de turbosina fósil, distribuidos en 62 aeropuertos del país. Esto resalta la importancia de desarrollar alternativas sostenibles como la *bioturbosina* para reducir la dependencia de combustibles fósiles y mitigar el impacto ambiental de la aviación.

México resulta atractivo para la producción de biocombustibles debido a su vasta extensión territorial, disponibilidad de superficie agrícola, clima favorable, amplia población joven y un marco jurídico que permite la producción y comercialización de bioenergéticos (Ley de Promoción y Desarrollo de los Bioenergéticos) (SAGARPA, 2017). Estos elementos son esenciales para la producción de biomasa, y aceites necesarios para biodiesel y *bioturbosina*. Mientras que en otros países se cultivan diversas plantas no comestibles productoras de aceite, México se ha centrado principalmente en la *jatropha* y la higuera. La *jatropha*, en particular, ha mostrado un gran potencial debido a su capacidad para crecer y producir aceites de alta calidad para biocombustibles. En 2014, se reportaron entre 50,000 y 100,000 hectáreas sembradas con *jatropha* en todo el país, orientadas a la producción de aceite vegetal para *bioturbosina*, sin afectar los cultivos alimenticios (González, 2012; Romero-Izquierdo y col., 2016).

Por otro lado, las microalgas productoras de aceite han adquirido especial relevancia en México. Las microalgas son una fuente prometedora debido a su rápido crecimiento y alto contenido de lípidos, lo que las convierte en una materia prima eficiente y sostenible para la producción de *bioturbosina*.

Estos microorganismos pueden cultivarse en diversas condiciones, incluidas áreas costeras y desérticas, lo que amplía las posibilidades de producción en diferentes regiones del país (González, 2012).

México está avanzando hacia una transición energética con el objetivo principal de aumentar la participación de energías limpias y diversificar la matriz energética, esto para lograr un sector sostenible y con menor dependencia de los combustibles fósiles. Por ello, la Ley de Transición Energética establece que para el año 2024, la participación mínima de energías limpias en la generación de electricidad debería ser del 35% (DOF, 2015).

Una muestra del gran potencial y avance en México es el primer vuelo demostrativo llevado a cabo por una aerolínea comercial con *bioturbosina*. Este histórico vuelo se registró el 01 de abril de 2011, realizado por la aerolínea Interjet^{MR} en un Airbus A320-214 conocido como Ecojet, transportó a 120 pasajeros desde la Ciudad de México con destino a Tuxtla Gutiérrez, Chiapas. Para este vuelo se utilizó *bioturbosina* en un 27% del total de combustible del avión. El biocombustible fue suministrado por Aeropuertos y Servicios Auxiliares (ASA) y producido mediante tecnología de hidrotratamiento, utilizando aceite vegetal de *Jatropha curcas* producido en nuestro país en Chiapas, Yucatán, Michoacán y Puebla. Este vuelo fue el séptimo en su categoría a nivel mundial (Romero-Izquierdo y col., 2016). Meses más tarde, el 01 de agosto de 2011, se realizó el primer “vuelo verde” comercial transoceánico de Aeroméxico^{MR},

utilizando *bioturbosina* en un 30% del combustible total empleado. En este vuelo, la aeronave fue un Boeing 777-200ER en la ruta México-Madrid. Este logro se realizó de manera conjunta por la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT), Aeropuertos y Servicios Auxiliares (ASA), Aeroméxico^{MR} y Boeing^{MR}.

El entonces Secretario de Energía, José Antonio Meade, explicó que el uso de materiales ligeros durante los vuelos representa beneficios tanto económicos como ecológicos, donde mencionó “cada minuto de eficiencia que se reduce en vuelo, se dejan de emitir 100 kilogramos de dióxido de carbono” (revistafortuna.com, 2011). Un ejemplo ilustrativo se puede ver en la Fig.3. donde se muestran varios de los esfuerzos que se han realizado en México para una transición energética en temas de aviación.



Figura 3. Vuelos operados con bioturbosina en México. Adaptado de Mar, 2021.

Estos logros subrayan el compromiso de México con la innovación y la sostenibilidad en la aviación, posicionándose como un líder en la adopción de biocombustibles para reducir la huella de carbono de la industria aérea. Sin embargo, no hay reportes oficiales del uso de *bioturbosina* en vuelos comerciales más allá del año 2012, por lo que el futuro de la *bioturbosina* en México ha sido incierto y controversial (Mar, 2021).

A pesar de lo anterior, México ha sido perseverante en cuanto a esfuerzos en este sentido. Como ejemplo, en el año en 2016 hubo un acuerdo entre Aeropuertos y Servicios Auxiliares (ASA), Aeroméxico^{MR}, el Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica (IPICYT) y Boeing^{MR}, apoyados por el fondo sectorial del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) y la

Secretaría de Energía (SENER) con el fin de investigar y desarrollar Bio Jet sostenible en México (Mar, 2021). A la fecha, científicos mexicanos de 14 instituciones diferentes a lo largo del país, han creado un consorcio de investigación y desarrollo para la producción de aceites vegetales como materia prima para la elaboración de *bioturbosina* (México Ambiental, 2018). Por otro lado, distintos centros de investigación nacionales siguen apostando al desarrollo de la *bioturbosina* de diversas fuentes como jatropha, higuera, moringa y cebo de res, entre otras; tal es el caso del Instituto Politécnico Nacional (IPN) que obtuvo el primer lugar en el Concurso Sustainable Aviation Fuels México 2023, organizado en el marco de la Feria Aeroespacial México, en dicha ocasión uno de los científicos que encabezaron el equipo de trabajo, el Dr. Rogelio Sotelo Boyás, declaró: “El fin del IPN es lograr combustibles renovables, mostrar su potencial para un mundo sin contaminación; queremos impulsar un mercado de *bioturbosina* en México para que los aviones puedan operar con cierto porcentaje de combustible renovable y contribuir de este modo a uno de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) de la ONU” (Vértigo político, 2023).

Consideraciones finales y perspectiva

La *bioturbosina* representa una solución viable y necesaria para enfrentar los retos ambientales del sector aéreo.

Este biocombustible ofrece una alternativa sostenible a los combustibles fósiles tradicionales, contribuyendo a un futuro más limpio y responsable en la aviación. México está en una posición privilegiada para desarrollar la *bioturbosina*, gracias a sus abundantes recursos naturales, científicos y marco jurídico. La colaboración entre el sector público, la industria y la academia será esencial para superar los desafíos y aprovechar plenamente el potencial de la *bioturbosina* como una solución sostenible para la aviación. La consolidación de esta industria en México no solo ayudará a reducir la dependencia de combustibles fósiles, sino que también posicionará al país entre uno de los líderes en innovación y sustentabilidad en el sector aéreo. El éxito en el desarrollo y adopción de la *bioturbosina* en México dependerá de la capacidad para superar desafíos técnicos y económicos, así como del continuo apoyo de políticas públicas y colaboraciones internacionales. La inversión en el desarrollo de investigación es crucial para optimizar los procesos de producción, y la reducción de costos, allanando el camino hacia una aviación más sostenible.



Literatura citada

- Agencia para Sustancias Tóxicas y el Registro de Enfermedades (ATSDR), 2017. *ToxFAQs™ - Combustibles de aviones a reacción JP-5 y JP-8 (Jet Fuels JP-5 and JP-8)*. En: https://www.atsdr.cdc.gov/es/toxfaqs/es_tfacts121.html (Consultado el 29/06/2024).
- Diario Oficial de la Federación, 2015. *Ley de Transición Energética*. En: <https://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/LTE.pdf> (Consultado el 29/06/2024).
- elperiodicodelaenergia.com, 2019. *Las emisiones de CO₂ del sector de la aviación crecerán un 21% hasta 2040*. En: <https://elperiodicodelaenergia.com/las-emisiones-de-co2-del-sector-de-la-aviacion-creceran-un-21-hasta-2040/> (Consultado el 29/06/2024).
- EnergyNews (EN), 2019. *Si la aviación fuera un país, estaría en el top 10 de contaminantes*. En: <https://www.energynews.es/contaminacion-aviacion/> (Consultado el 29/06/2024).
- Estrategias para el cambio climático Península de Yucatán (CCPY), s.f. *Gases de efecto invernadero*. En: <http://www.ccpy.gob.mx/cambio-climatico/gases-efecto-invernadero.php> (Consultado el 29/06/2024).
- González, I. S., 2012. *Bioturbosina*. Producción de cultivos energéticos para la aviación comercial. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 3(3), 579-594.
- Gutiérrez Antonio C., Caltzontzin Rabell V., Sánchez Estrada M. D. L. L., Chávez Jaime, Feregrino Pérez A. A., García Trejo J. F., 2022. Diseño de una biorrefinería para la obtención de combustible renovable de aviación a partir de microalgas, PCT, vol. 5. En: <https://revistas.uaq.mx/index.php/perspectivas/article/view/924https://www.un.org/es/climatechange/paris-agreement>. (Consultado el 29/06/2024).
- IATA. (2016). *Fact Sheet: Alternative Fuels*. En: https://www.iata.org/pressroom/facts_figures/fact_sheets/Documents/fact-sheet-alternative-fuels.pdf
- Mar Juárez E., 2021. *Mapa de ruta bio jet en México: construcción, análisis y puntos de reflexión*. CIENCIA ergo-sum, *Revista Científica Multidisciplinaria de Prospectiva*, vol. 28, núm. 1, noviembre 2020-febrero 2021.
- México ambiental, 2018. *Científicos mexicanos crean consorcio científico para producir a escala comercial bioturbosina*. En: <https://www.mexicoambiental.com/cientificos-mexicanos-crean-consorcio-cientifico-para-producir-a-escala-comercial-bioturbosina/> (Consultado el 04/07/2024).
- Naciones Unidas, s.f. El Acuerdo de París. En: <https://www.un.org/es/climatechange/paris-agreement> (Consultado el 29/06/2024).

REPSOL. s.f. *¿Qué es la huella de carbono y por qué es importante?* En: <https://www.repsol.com/es/sostenibilidad/cambio-climatico/reduccion-huella-carbono/index.cshtml> (Consultado el 29/06/2024).

revistafortuna.com, 2011. *Aeroméxico: primer “vuelo verde” transoceánico con bioturbosina*. En: <https://revistafortuna.com.mx/2011/08/04/aeromexico-primer-%E2%80%9Cvuelo-verde%E2%80%9D-transoceanico-con-bioturbosina/#:~:text=Aerom%C3%A9xico%3A%20primer%20%E2%80%9Cvuelo%20verde%E2%80%9D%20transoce%C3%A1nico%20con%20bioturbosina,-Por&text=Veintis%C3%A9is%20mil%20litros%20de%20bioturbosina,verde%E2%80%9D%20comercial%20transoce%C3%A1nico%20de%20Aerom%C3%A9xico> (Consultado el 29/06/2024).

Romero Izquierdo, A., Gómez De la Cruz, A., Gutiérrez-Antonio C., 2016. *Bioturbosina: retos y oportunidades*. En: <https://www.revistaciencia.amc.edu.mx/online/Bioturbosina.pdf> (Consultado 29/01/24).

SAGARPA, 2017. *Bioenergéticos: higuera, jatropha curcas, sorgo dulce mexicanos*. In Planeación Agrícola Nacional 2017-2030. Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación.

Vértigo político, 2023. *Crean bioturbosina verde*. En: <https://www.vertigopolitico.com/columnas/notas/bioturbosina-verde> (Consultado el 04/07/2024).

Cita

Ibarra Lizárraga, E., D.U. Santos Ballardo, D.L. Ambríz Pérez. Del suelo mexicano a las nubes: panorama de la bioturbosina en México. **Recursos Naturales y Sociedad, 2024. Vol. 10 (2): 65-75.** <https://doi.org/10.18846/renaysoc.2024.10.10.02.0006>

Sometido: 4 de julio de 2024


Aceptado: 17 de septiembre de 2024

Editor asociado: Dr. Arturo Sánchez Paz

Editor ejecutivo: Dr. Arturo Sánchez Paz

Diseño gráfico editorial: Lic. Gerardo Hernández

Fotos portada: pexels-pixabay-40024.jpg; pexels-pixabay-46148.jpg



Propuesta de conservación ecológica de las Sierras de Parras y la Paila en el Municipio de Parras, México

Ecological conservation proposal of mountain ranges
“Parras” and “La Paila” in the city of Parras, Mexico

Recursos Naturales y Sociedad, 2024. Vol. 10 (2): 77-88. <https://doi.org/10.18846/renaysoc.2024.10.10.02.0007>

M.C. Edgar Eduardo Tolentino Armendáriz^{1,2}

¹Centro de Estudios e Investigaciones Interdisciplinarios de la Universidad Autónoma de Coahuila (Centro Cultural 2° piso. Ciudad Universitaria. Carretera México km 13.C.P. 25350 Arteaga, Coahuila.)

²Instituto de Investigaciones Dr. José María Luis Mora (Plaza Gómez Farias, Benito Juárez, 03730 Ciudad de México, CDMX)

Resumen

El Municipio de Parras se encuentra dentro del Desierto Chihuahuense y, por su localización y la relación de los ecosistemas con el agua, cuenta con una riqueza biótica considerable y que se encuentra amenazada: existen al menos 114 especies de plantas endémicas en el municipio y al menos 2 especies de aves, 4 de anfibios y 6 de reptiles que presentan algún nivel de endemismo. Adicional a los endemismos, 20 especies de plantas endémicas están en riesgo y bajo el esquema de protección ofrecido por la *NOM 059-SEMARNAT-2010* así como también otras especies que habitan en la región de Parras y no son necesariamente endémicas del Desierto Chihuahuense, entre las que destacan: 29 especies de aves, 6 de anfibios, 15 de reptiles y 11 de mamíferos que se encuentran en las mismas circunstancias de necesidad de conservación. Por otro lado, a los 3 acuíferos de la región se les está extrayendo el 177%, 300% y 358% de la capacidad de recarga de estos. Por lo anterior, se propone que las zonas de importancia ecológica como la Sierra de Parras y La Paila, sean declaradas Área Natural Protegida.

Palabras clave: Parras, México, desierto, acuífero, endemismo, conservación, CONAGUA, NOM 059-SEMARNAT-2010.

Abstract

The city of Parras, is located within the so called Chihuahuan desert and, for its location and ecosystems that are water related, has a considerable biotic richness and which is in danger: 114 species of plants are endemic, and at least 2 bird species, 4 species of amphibians and 6 species of reptiles have some sort of endemism. Besides the endemism of the place, 20 of these 114 plants are under protection under Federal Mexican Norm

NOM 059-SEMARNAT-2010

but also other living species-not necessary endemic: 29 species of birds, 6 species of amphibians, 15 species of reptiles and 11 species of mammals are under the same circumstances of living there and on the need of protection.

On the other side, to the 3 aquifers it's been extracted 177%, 300% and 358% their water recharging capacity. Therefore, its proposed that the zones of ecologic importance like the "Sierra de Parras" and "Sierra de la Paila" are declared as Protected Natural Areas.

Key Words: Parras, México, desert, aquifer, endemism, conservation, CONAGUA, NOM 059-SEMARNAT-2010.

Introducción

Las actividades humanas, en especial las económicas realizadas durante la época moderna, denominada Antropoceno por los impactos realizados por el hombre, han tenido, en la mayoría de los

casos, un impacto directo y negativo en todos los ecosistemas y en el medio ambiente en general (IPCC, 2018). Con el fin de detener, y si es posible, revertir los daños que ya se han producido, es importante que se lleven a cabo actividades de conservación y mitigación en las áreas de importancia ecológica para que se siga desarrollando la vida de diversas especies, incluida la humana.

El Municipio de Parras de la Fuente (Parras), en el estado de Coahuila (Figura 1), ha sido catalogado como “oasis del Desierto” por la gran cantidad de biodiversidad que se encuentra en su territorio y en especial por la gran cantidad de agua que fluye de la Sierra de Parras hacia el Municipio, lo que ha permitido que desde su fundación se desarrollen asentamientos humanos y diversas actividades económicas destacando las relacionadas con la agricultura (Instituto Nacional de Antropología e Historia (INAH), 2017).



Figura 1. Localización del Municipio de Parras en el Estado de Coahuila de Zaragoza:
Fuente: <https://www.ecured.cu/images/c/cf/05m024.jpg.gif>

Acuíferos y su sobreexplotación

Respecto a la gestión de los recursos hídricos del municipio se puede comentar que, a la fecha y con datos de la Comisión Nacional del Agua, existe sobreexplotación de las aguas subterráneas que acontece en los acuíferos de la región, en especial en el acuífero Saltillo Sur, el cual cubre gran parte de la parte de la zona sur del municipio. Este acuífero tiene una capacidad de recarga del acuífero Saltillo Sur es de 13.40 hm³/año (hectómetros cúbicos o millones de metros cúbicos, por año) pero, en contraste, se han otorgado autorizaciones para extraer agua por un total de 40.16 hm³/año (CONAGUA y Diario Oficial de la Federación, 2023). Esto significa que la CONAGUA ha expedido permisos para extraer 300% de la capacidad de recarga que tiene el acuífero, lo que implica daños potencialmente severos a los ecosistemas presentes.

Por otro lado, a los acuíferos General Cepeda La Saucedá y

el acuífero la Paila, se les extrae un total equivalente a 177% y 358%, respectivamente, de su capacidad de recarga (CONAGUA y Diario Oficial de la Federación, 2023).

Estos datos indican que los tres acuíferos, en especial el Saltillo Sur y La Paila están gravemente sobreexplotados.

Los datos proporcionados por la CONAGUA son oficiales más no reales toda vez que la mayoría de los aprovechamientos carecen de medidor volumétrico, por lo que los datos que los usuarios reportan a la Conagua distan considerablemente de la realidad y, sin control ni vigilancia, extraen más agua que el volumen permitido

Por ende, es notorio que el abatimiento de los niveles estáticos y dinámicos de los pozos que existe en la región implica que la extracción de agua es superior a la capacidad que tienen los acuíferos de recargarse (Carlos Valdés, 2023).

Problemática social y económica

Aunado a la grave situación de falta de control en la expedición de permisos para la explotación de las aguas y sobreexplotación de los acuíferos, las actividades agrícolas y ganaderas de la zona no están respaldadas con ningún tipo de estudio de impacto ambiental o de propuestas de conservación, siendo éstos los factores principales para que se den los cambios de uso de suelo (Secretaría de Medio Ambiente Gobierno de Coahuila (SEMA), 2022). De la misma manera, se han instalado diversas agroindustrias en la parte baja de la Sierra de Parras y, con los crecientes abatimientos de pozos las empresas agroindustriales están cambiando su residencia hacia lugares más altos y cercanos a las zonas de recarga, acrecentando aún más la problemática del aprovechamiento sustentable de las aguas subterráneas, ya que las nuevas tomas de agua se hacen más “aguas arriba” (Peña y Rodríguez, 2022).

Por otro lado, ejidatarios y residentes de los ejidos de la región de Parras están emigrando a las ciudades por la falta de oportunidades laborales, o por falta de conocimiento sobre cómo crear valor a los productos que ofertan. Por ejemplo, la incapacidad de crear marcas para la cera de candelilla y participar en el mercado de manera más directa, hasta los impactos derivados de la creciente producción de ganado vacuno, que fomenta la degradación de los suelos y la deforestación de diversas plantas que son importantes en el ciclo del agua, principalmente (Vásquez Aguilar, 2024).

Biodiversidad

El desierto Chihuahuense alberga en su territorio múltiples especies de flora y fauna endémicas de la región y el municipio de Parras no es la excepción (CONABIO y SMADU, 2018; J. A. Villarreal-Quintanilla et al., 2017; J. Á. Villarreal-Quintanilla y

Encina-Domínguez, 2005). Los endemismos del reino vegetal reportados en este municipio son incluso mayores que los que existen en el Municipio de Cuatro Ciénegas (J.A. Villarreal-Quintanilla et al., 2017), el cual cuenta desde hace tiempo con diversos proyectos nacionales e internacionales de conservación (Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas, 2019). De la misma manera, existen especies que habitan en la región que se encuentran en algún grado de protección como se muestra en las tablas 1 y 2, y de acuerdo con la Norma Oficial Mexicana *NOM-059-SEMARNAT-2010, Protección ambiental-Especies nativas de México y flora y fauna silvestres- Categorías de riesgo y especificaciones para su inclusión, exclusión o cambio- Lista de especies en riesgo* (SEMARNAT y Diario Oficial de la Federación, 2010).

Así mismo, es necesario señalar que el Desierto Chihuahuense, en el que se encuentra ubicado el Municipio de Parras, es uno de los 3

desiertos con mayor biodiversidad a nivel mundial, especialmente por la gran cantidad de cactáceas con que cuenta, muchas de las cuales son endémicas. Las cualidades de dicho desierto son resultado de una serie de factores, siendo los principales el tipo de suelo, la orografía, la biodiversidad terrestre y los relacionados con el agua dulce (Dinerstein et al., 2000).

El municipio de Parras se encuentra dentro del Estado de Coahuila y dentro del Desierto Chihuahuense. Aunado a lo anterior, dos provincias fisiográficas se encuentran en el municipio: La Sierra Madre Oriental, y Sierras y Llanuras del Norte (Subsecretaría Recursos Naturales de Coahuila, 2021), tal y como se observa en la Figura 2. Así mismo, Parras es el único municipio de Coahuila que cuenta con 4 subprovincias fisiográficas tal y como se muestra en la Figura 3:

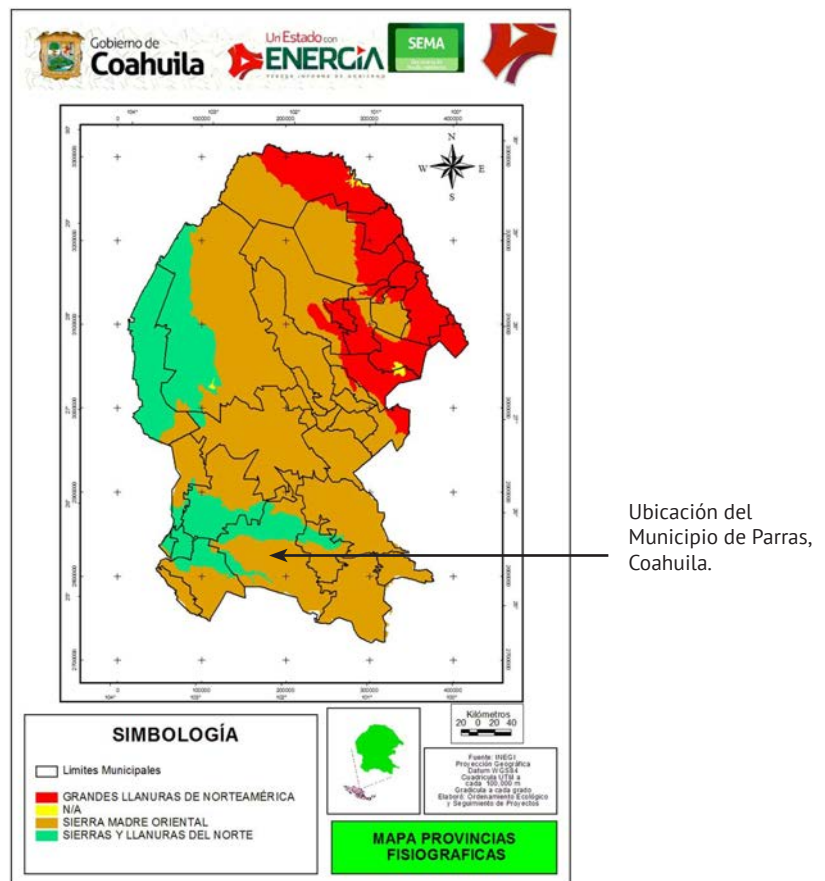


Figura 2. Ubicación del Municipio de Parras, Coahuila y provincias fisiográficas del Estado de Coahuila de Zaragoza. Fuente: (Subsecretaría Recursos Naturales de Coahuila, 2021)

- En la parte sur la denominada Sierras Transversales;
- En medio se encuentran los Pliegues Saltillo Parras;
- La Laguna de Mayran penetra en la subprovincia Sierras Transversales y se ubica también entre los Pliegues Saltillo Parras y la Sierra de La Paila; y
- En la parte más al norte la llamada Sierra de La Paila.

Tanto las condiciones fisiográficas, como la relación de los ecosistemas con el agua, así como el ser parte del desierto Chihuahuense ha resultado en que se generen condiciones extraordinarias de riqueza biótica en la región. De esta manera se han registrado los siguientes hallazgos:

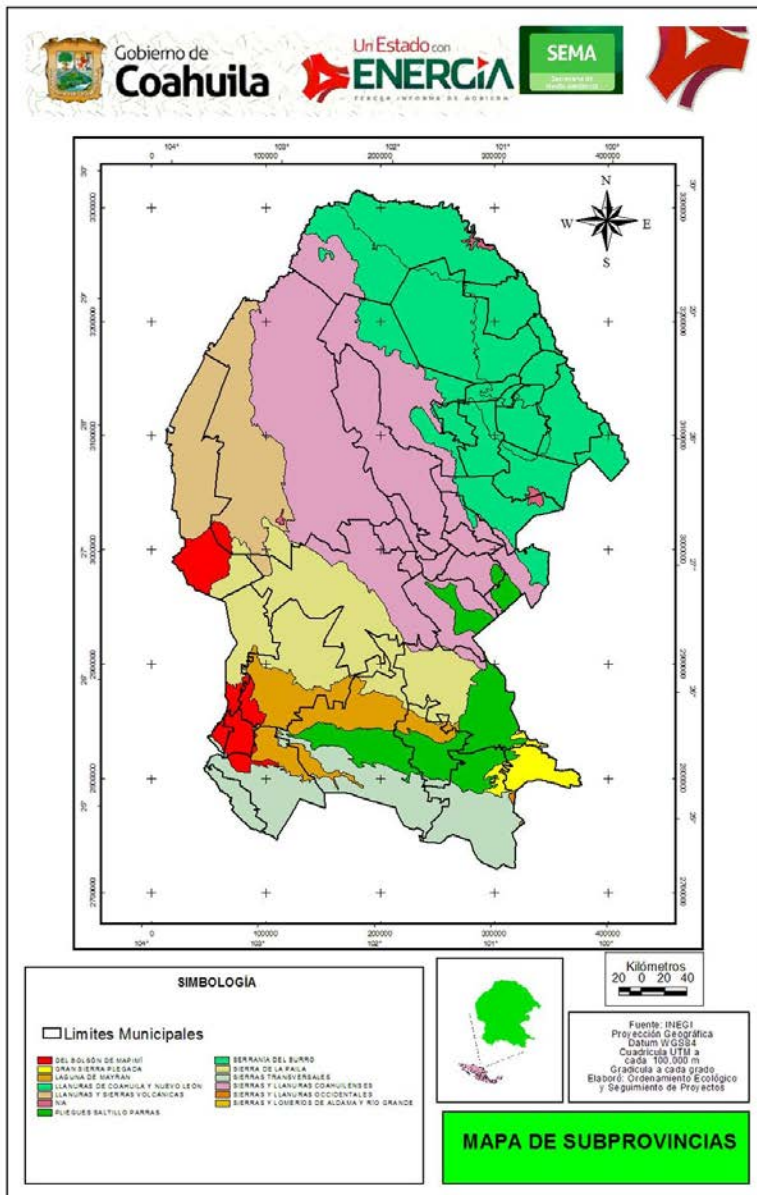


Figura 3. Subprovincias fisiográficas del Estado de Coahuila de Zaragoza. Fuente: (Subsecretaría Recursos Naturales de Coahuila, 2021)

- Se ha documentado la presencia de 114 especies de flora endémicas del Desierto Chihuahuense que se encuentran en la Sierra de Parras y de La Paila, de las cuales 20 se encuentran bajo algún nivel de protección bajo la *NOM 059-SEMARNAT-2010* como lo son *Echinomastus unguispinus*, *Epithelantha micromeri*, *Agave parrasana* entre otras (Flores-Valdés, 2016; SEMARNAT y Diario Oficial de la Federación, 2010; J. A. Villarreal-Quintanilla et al., 2017; J. Á. Villarreal-Quintanilla y Encina-Domínguez, 2005).

- Se han registrado alrededor de 330 aves que habitan en el Municipio, existiendo 30 que se encuentran bajo el esquema de protección de la *NOM*

059-SEMARNAT-2010, entre los que destacan *Rhynchopsitta terrisi*, *Parabuteo unicinctus*, *Buteo regalis*, entre otras (CONABIO y SMADU, 2018; SEMARNAT y Diario Oficial de la Federación, 2010).

· Existen 13 anfibios siendo 3 endémicos de la región y estando 6 bajo el esquema de protección antes mencionado entre los que destacan *Chiropterotriton priscus*, *Aquiloerycea scandens*, *Gastrophryne olivacea* entre otras (CONABIO y SMADU, 2018; SEMARNAT y Diario Oficial de la Federación, 2010).

Tabla 1. Especies endémicas de flora en la Sierra de Parras y de la Paila, y estatus de protección. Fuente: Elaboración propia con datos de (SEMARNAT y Diario Oficial de la Federación, 2010; J. A. Villarreal-Quintanilla et al., 2017; J. Á. Villarreal-Quintanilla y Encina-Domínguez, 2005)

Número	Nombre científico	Nombre Común	Familia	Sierra de Parras	Sierra de la Paila	Estatus de acuerdo con NOM 059*
1	<i>Echinomastus unguispinus</i>	Nido de Pájaro	Cactaceae		X	A
2	<i>Epithelantha micromeris</i>	Botón	Cactaceae	X	X	A
3	<i>Leuchtenbergia principis</i>	Biznaga palmilla de San Pedro	Cactaceae	X	X	A
4	<i>Turbincarpus mandragora</i>	Mandragora, biznaguilla, palito	Cactaceae	X		A
5	<i>Echinocereus longisetus</i>	Viejito	Cactaceae		X	A; A; Pr
6	<i>Thelocactus bicolor</i>	Biznaga bicolor	Cactaceae		X	A; Pr
7	<i>Ariocarpus fissuratus</i>	Biznaga o peyotillo	Cactaceae	X	X	P
8	<i>Coryphantha werdermanni</i>	biznaga partida amacollada o manca caballo	Cactaceae		X	P
9	<i>Agave parrasana</i>	Magüey de Parras	Asparagaceae	X		Pr
10	<i>Manfreda potosina</i>	Amole cenizo	Asparagaceae	X		Pr
11	<i>Yucca endlichiana</i>	Izote pitilla	Asparagaceae	X	X	Pr
12	<i>Acharagma aguirreana</i>	Biznaga de Aguirre	Cactaceae		X	Pr
13	<i>Coryphantha pseudoechinus</i>	Biznaga partida de falsas espinas	Cactaceae		X	Pr
14	<i>Echinocereus nivosus</i>	Alicoche blanco	Cactaceae	X		Pr
15	<i>Epithelantha micromeris</i>	Botón	Cactaceae		X	Pr
16	<i>Escobaria dasyacantha</i>	Biznaga blanca	Cactaceae		X	Pr
17	<i>Escobaria laredoi</i>	Biznaga blanca	Cactaceae	X		Pr
18	<i>Turbincarpus beguinii</i>	Biznaga plateada	Cactaceae		X	Pr
19	<i>Coryphantha pseudoechinus</i>	Biznaga	Cactaceae		X	Pr
20	<i>Ariocarpus retusus</i>	Chautle	Cactaceae	X		Pr;A

· Habitan 58 reptiles siendo 4 endémicos y 21 los protegidos bajo el esquema de protección de la *NOM 059-SEMARNAT-2010*, entre los que destacan *Sceloporus ornatus*, *Lampropeltis getula*, *Pituophis deppei*, entre otras (CONABIO y SMADU, 2018; SEMARNAT y Diario Oficial de la Federación, 2010)

· Hay 19 mamíferos, siendo 2 endémicos y estando 11 protegidos, entre los que destacan *Sorex milleri*, *Puma yagouaroundi*, *Vulpes macrotis*, entre otras (CONABIO y SMADU, 2018; SEMARNAT y Diario Oficial de la Federación, 2010)

A continuación, se muestran algunas especies de flora y fauna endémicas y bajo algún esquema de protección ofrecido por la mencionada *NOM 059*:

Tabla 2. Especies endémicas de fauna en la Sierra de Parras y de la Paila, y estatus de protección. Fuente: Elaboración propia con datos de (CONABIO y SEMA Coahuila, 2017; CONABIO y SMADU, 2018; SEMARNAT y Diario Oficial de la Federación, 2010)

Nº	Grupo	Nombre científico	Nombre común	Distribución	Pliegues Saltillo-Parras	Sierra de Paila	Laguna de Mayran	Sierras Transversales	Estatus de acuerdo a NOM 059*
1	Ave	<i>Rhynchopsitta terrisi</i>	Cotorra Serrana oriental	Endémica	X			X	P
2	Anfibio	<i>Chiropterotriton priscus</i>	Salamandra pie plano primitiva	Endémica	X				PR
3	Anfibio	<i>Aquiloerycea galeanae</i>	Tlaconete de galeana	Endémica	X				A
4	Anfibio	<i>Aquiloerycea scandens</i>	Tlaconete Tamaulipeco	Endémica	X				PR
5	Reptil	<i>Sceloporus ornatus</i>	Lagartija espinosa adornada	Endémica	X			X	A
6	Reptil	<i>Lampropeltis getula</i>	Falsas coralillo real estadounidense	Endémica	X		X		A
7	Reptil	<i>Pituophis deppei</i>	Culebra sorda mexicana, cincuate, alicante	Endémica	X			X	A
8	Reptil	<i>Hypsiglena torquata</i>	Serpiente nocturna	Endémica	X				PR
9	Mamífero	<i>Sorex milleri</i>	Musaraña de sierra del Carmen	Endémica	X			X	PR
10	Mamífero	<i>Sorex salvini</i> subsp. <i>veraecrucis</i>	Musaraña de Saussure	Endémica	X			X	PR

Propuesta de conservación

Por lo importante que resulta proteger la zona de posibles desequilibrios graves que pudieran significar que los ecosistemas y la vida en la parte baja de la región, que es donde se encuentra la cabecera urbana del Municipio de Parras de la Fuente, se vea severamente afectada y comprometida, se propone que las Sierras de Parras y La Paila, tengan las características propias de un Área Natural Protegida. Lo anterior permitiría contar con mayores elementos de protección y vigilancia con el fin de regular el aprovechamiento sustentable de la zona.

La sociedad civil organizada, junto con las autoridades de todos los niveles de gobierno, deben regular y vigilar el aprovechamiento de los recursos naturales de manera que existan más elementos a tomar en cuenta en el momento en que se quieran realizar proyectos que puedan amenazar la vida del Municipio.

Discusión

Toda vez que los acuíferos se encuentran severamente afectados por la sobreexplotación y a que la riqueza biótica de la región es cuantiosa, contiene especies endémicas, así como especies listadas en la *NOM 059-SEMARNAT-2010*, es que resulta de vital importancia que se tomen todas las medidas necesarias para conservar y fortalecer los ecosistemas de la región. Tanto por la visión de conservación como por lo que puede significar las afectaciones irreversibles de los acuíferos de la región. Adicional a lo anterior, el aumento de la población, así como la falta de control en la explotación de los recursos naturales de la zona, ha generado diversos conflictos socioambientales entre los habitantes de esta, especialmente entre ejidatarios y empresas

por desacuerdos en el reparto del agua (Ramos Leopoldo, 2022).

El Estado Mexicano proporciona elementos de protección ecológica a través de la Ley General del Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente, pero también el Estado de Coahuila y el Municipio de Parras, a través de leyes estatales y locales tiene mecanismos para el establecimiento de las Áreas Naturales Protegidas (LEY DEL EQUILIBRIO ECOLOGICO Y LA PROTECCION AL AMBIENTE DEL ESTADO DE COAHUILA DE ZARAGOZA, 2020; LEY GENERAL DEL EQUILIBRIO ECOLOGICO Y LA PROTECCIÓN AL AMBIENTE, 2024). Cada uno, desde su ámbito jurídico y marco normativo, puede establecer las áreas protegidas que considere necesarias. La soberanía de cada elemento del Estado mencionado no es una contradicción o una desventaja sino lo contrario, la oportunidad de brindar mecanismos de protección de manera eficaz y a la

brevidad posible. Sin la protección de las zonas de importancia ecológica y el reordenamiento de los aprovechamientos de elementos naturales, en especial las extracciones de agua subterránea, aunado a las consecuencias del cambio climático, los problemas socioambientales aumentarían de manera considerable y los daños irreversibles pueden ocasionar que la vida de la comunidad y las especies que la habitan se vea severamente comprometida.

Consideraciones finales y perspectivas

El Municipio de Parras enfrenta diversos problemas socioambientales debido a múltiples factores, entre los que destacan: los impactos del calentamiento global; el establecimiento de agroindustrias sin control y sin permisos necesarios (en especial viñedos); cambios irregulares de uso de suelo; acuíferos sobreexplotados motivado por el descontrol en los aprovechamientos de agua por la falta de ordenamiento por parte de la CONAGUA, entre otros.

Por otro lado, Parras está ubicado en una zona de alta riqueza biológica, encontrando especies de flora y fauna endémicas. También, múltiples especies que no son necesariamente endémicas se encuentran en necesidad de conservación por parte de la *NOM 059-SEMARNAT-2010*.

Entre los mecanismos que existen para la conservación y mitigación de problemas ambientales, se encuentra el establecimiento de Áreas Naturales Protegidas, las cuales pueden ser declaradas por cualquier entidad del Estado (Federación, Entidad Federativa y/o Municipio). Lo anterior significa una simplicidad administrativa en la búsqueda de mecanismos de conservación de ecosistemas.

En conclusión, la riqueza biológica del Municipio y los problemas ambientales existentes pueden beneficiarse de los esquemas que ofrece el establecimiento de Áreas Naturales Protegidas. Por un lado, se promueve la conservación de especies y sus entornos; y por el otro, se ofrecen esquemas de desarrollo sustentable para el aprovechamiento ordenado de los ecosistemas de la región, en especial del agua. Adicionalmente, diversos actores del sector público, privado y social pueden beneficiarse de participar activamente en los programas de ordenamiento y aprovechamiento que pudieran surgir del establecimiento de las Áreas Naturales Protegidas.

Referencias bibliográficas

- Carlos Valdés, L. (2023, agosto 26). Con medidores buscan terminar la lucha por el agua en Parras. <https://www.milenio.com/estados/coahuila-medidores-buscan-terminar-lucha-agua-parras>
- Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas. (2019, octubre 1). La restauración de los humedales de Cuatrociénegas sólo será posible con esfuerzos conjuntos e integrales

de largo plazo. <https://www.gob.mx/conanp/prensa/la-restauracion-de-los-humedales-de-cuatrocieneegas-solo-sera-posible-con-esfuerzos-conjuntos-e-integrales-de-largo-plazo-220438>

CONABIO, y SEMA Coahuila. (2017). Estrategia para la conservación y el uso sustentable de la Biodiversidad en el Estado de Coahuila y plan de acción 2040 (Vol. 2017).

CONABIO, y SMADU. (2018). La Biodiversidad en Coahuila: Estudio de Estado, Volumen II, México: Vol. II. <https://old.sma.gob.mx/SRN-CONSER-ESTUDIO-AP.php>

CONAGUA, y Diario Oficial de la Federación. (2023, septiembre 11). ACUERDO por el que se actualiza la disponibilidad media anual de agua subterránea de los 653 acuíferos de los Estados Unidos Mexicanos, mismos que forman parte de las regiones hidrológico-administrativas que se indican. https://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5708074&fecha=09/11/2023#gsc.tab=0

Dinerstein E., Olson, D., Atchley, J., Loucks, C., Contreras-Balderas, S., Abell, R., Iñigo, E., Enkerlin, E., Williams, C., y Castilleja, G. (2000). Ecoregion-Based Conservation in the Chihuahuan Desert A Biological Assessment.

Flores-Valdés, A. (2016). Nueva Guía de Cactáceas del Estado de Coahuila.

Instituto Nacional de Antropología e Historia (INAH). (2017). Zona de Monumentos Históricos de Parras de la Fuente, Coahuila. INAH.

IPCC. (2018). Informe especial del IPCC sobre los impactos del calentamiento global de 1,5 oC.

LEY DEL EQUILIBRIO ECOLÓGICO Y LA PROTECCIÓN AL AMBIENTE DEL ESTADO DE COAHUILA DE ZARAGOZA (2020). https://www.coahuilatransparente.gob.mx/leyes/documentos_leyes/Ley%20de%20equilibrio%20ecol%C3%B3gico1.pdf

LEY GENERAL DEL EQUILIBRIO ECOLÓGICO Y LA PROTECCIÓN AL AMBIENTE (2024). <https://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/LGEEPA.pdf>

Peña Jesús, y Rodríguez Francisco. (2022, junio 13). 'Guerra' por el agua en Parras: errores de CONAGUA desata conflicto entre Casa Madero y ejidatarios. <https://vanguardia.com.mx/coahuila/semanario/guerra-por-el-agua-en-parras-errores-de-conagua-desata-conflicto-entre-casa-madero-y-ejidatarios-YX2808890>

Ramos Leopoldo. (2022, mayo 31). Ejidatarios de Parras acusan a la vinícola Casa Madero de quitarles agua para riego. <https://www.jornada.com.mx/notas/2022/05/31/estados/ejidatarios-de-parras-acusan-a-la-vinicola-casa-madero-de-quitarles-agua-para-riego/>

Secretaría de Medio Ambiente Gobierno de Coahuila (SEMA). (2022, mayo). CAMBIO DE USO DE SUELO . <https://siiac.sma.gob.mx/docs/cambio-de-uso-de-suelo/>

- SEMARNAT, y Diario Oficial de la Federación. (2010, diciembre 15). 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. https://dof.gob.mx/nota_detalle_popup.php?codigo=5173091
- Subsecretaría Recursos Naturales de Coahuila. (2021, junio). Fisiografía. <https://old.sma.gob.mx/SRN-SIIAECC-DG-MF-FISIOGRAFIA.php#:~:text=El%20paisaje%20de%20Coahuila%20est%C3%A1,destacan%20Las%20Sierras%20y%20Llanuras>
- Vásquez Aguilar, A. A. (2024, abril 9). La ganadería y la pérdida de la biodiversidad. <https://www.inecol.mx/inecol/index.php/es/ct-menu-item-25/ct-menu-item-27/17-ciencia-hoy/845-la-ganaderia-y-la-perdida-de-la-biodiversidad#:~:text=El%20principal%20impacto%20de%20la,suelo%2C%20principalmente%20en%20zonas%20%C3%A1ridas>
- Villarreal-Quintanilla, J. A., Bartolomé-Hernández, J. A., Estrada-Castillón, E., Ramírez-Rodríguez, H., y Martínez-Amador, S. J. (2017). El elemento endémico de la flora vascular del Desierto Chihuahuense. *Acta Botánica Mexicana*, 118, 65–96.
- Villarreal-Quintanilla, J. Á., y Encina-Domínguez, J. A. (2005). PLANTAS VASCULARES ENDÉMICAS DE COAHUILA Y ALGUNAS ÁREAS ADYACENTES, MÉXICO. *Acta Botanica Mexicana*, 70, 1–46.

Cita

E.E. Tolentino Armendáriz. Propuesta de conservación ecológica de las Sierras de Parras y la Paila en el Municipio de Parras, México. **Recursos Naturales y Sociedad**, 2024. Vol. 10 (2): 77-88 <https://doi.org/10.18846/renaysoc.2024.10.10.02.0007>

Sometido: 11 de abril de 2024

Aceptado: 20 de septiembre de 2024

Editor asociado: Dr. Arturo Sánchez Paz

Editor ejecutivo: Dr. Arturo Sánchez Paz

Diseño gráfico editorial: Lic. Gerardo Hernández

Portada. Región de Paila, Coahuila, México

Los hongos y oomicetos, habitantes naturales del suelo: ¿Amigos o enemigos de las plantas?

Fungi and oomycetes, natural inhabitants of the soil:
Friends or enemies of plants?

Recursos Naturales y Sociedad, 2024. Vol. 10 (2): 89-105. <https://doi.org/10.18846/renaysoc.2024.10.10.02.0008>

María Goretty Caamal-Chan¹, Abraham Loera-Muro¹, Aarón Barraza¹, Luis Guillermo Hernández Montiel

¹CONAHCYT-Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste, SC. (CIBNOR), Av.Instituto Politécnico Nacional 195, Playa Palo de Santa Rita Sur, La Paz, B.C.S., C.P. 23096, México.

²Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste, SC. (CIBNOR), Av.Instituto Politécnico Nacional 195, Playa Palo de Santa Rita Sur, La Paz, BCS, C.P. 23096, México.





Resumen:

Los hongos y los oomicetos son actores esenciales en los ecosistemas terrestres y tienen un papel principal en las interacciones biológicas de las plantas y los microorganismos del suelo. Existen diferentes tipos de hongos en los suelos de todo el mundo. Asimismo, algunos hongos interactúan estrechamente con las plantas y las ayudan a crecer al mejorar la disponibilidad de nutrientes en el suelo, tales como nitrógeno, fósforo y potasio. Otros hongos producen algunas moléculas que tienen acción contra otros microorganismos o promueven la activación de mecanismos de defensa de las plantas que las protegen de agentes patógenos. Sin embargo, existen hongos y oomicetos que provocan enfermedades en las plantas. En la rizosfera, una región importante de interacción planta-suelo-microorganismo, hay interacciones tanto con microorganismos benéficos y no benéficos, lo que resulta en un equilibrio saludable para la comunidad de microorganismos benéficos que protegen a las plantas. La forma en que los hongos y oomicetos interactúan con las plantas y el ambiente es un factor muy importante para comprender el papel central de estos microorganismos en el crecimiento, la salud o las enfermedades de las plantas.

Palabras claves: comunidades microbianas, diversidad de hongos, funciones de los hongos, salud del suelo, microbioma del suelo.

Abstract:

Fungi and oomycetes are essential players in terrestrial ecosystems and are central to the plant-soil microbe biological interactions. There are different types of fungi distributed in soils worldwide. Likewise, some fungi closely interact with plants and promote their growth, improving soil nutrient availability,

such as nitrogen, phosphorus, and potassium. Other fungi produce molecules that act against other microorganisms or promote the plant defense mechanisms that protect plants from pathogenic agents. However, some fungi and oomycetes can cause diseases in the plants. In the rhizosphere, an essential zone of plant-soil-microorganism interaction, there are simultaneous interactions between beneficial and non-beneficial microorganisms, resulting in a healthy balance for the beneficial microbial community that protects the plants. How fungi and oomycetes interact with plants and the environment is an essential factor in understanding the central role of those microorganisms in the growth, health, or diseases of plants.

Keywords: microbial communities, fungal diversity, fungal functions, soil health, soil mycobiome.

Introducción

En el suelo habitan una gran variedad de microorganismos necesarios para un ecosistema sano. Estos son muy diversos, pudiendo ser bacterias, arqueas, protozoos, algas, hongos y oomicetos. Por otro lado, las plantas alteran la composición del suelo gracias a su capacidad de absorber nutrientes del mismo y a través de la producción en las raíces de compuestos orgánicos, los cuales pueden variar en cantidad y variedad en la rizosfera según sea necesario. Esta variación en la producción de compuestos por parte de la raíz permite a las plantas adaptar la composición de su comunidad microbiana de la rizosfera de acuerdo a sus necesidades (Hu *et al.* 2021; Kawasaki *et al.* 2021).

En este trabajo nos centraremos en dos grupos microbianos importantes que comparten estrategias de vida similares: los llamados hongos verdaderos y los oomicetos. Ambos microorganismos tienen alta plasticidad fenotípica que les permite colonizar diferentes tipos de hábitats y soportar condiciones ambientales variables, como es el caso de los suelos.

Estos organismos exhiben crecimiento micelial filamentoso, reproducción por esporas y estrategias similares de adquisición de nutrición mediante la secreción de enzimas extracelulares para descomponer nutrientes complejos y recuperar azúcares simples por osmotrofia (Richards *et al.* 2006). Los suelos albergan comunidades fúngicas muy diversas que dan forma a la estructura de las comunidades microbianas y desempeñan papeles clave en la descomposición de la materia orgánica, en el ciclo de nutrientes y en la salud del hospedero vegetal (Tedersoo *et al.* 2014).

Sin embargo, la salud de las plantas también puede ser afectada por algunos miembros de estos hongos y oomicetos, lo cual, es determinado por el tipo de interacción con la planta, la cual puede ser benéfica, neutra o hasta patogénica. Por lo anterior,

el estudio de los hongos y de los oomicetos tiene alta relevancia en el área de la agricultura.

1. Las plantas y el suelo poseen hongos y oomicetos en su microbioma.

El suelo está conformado por materiales inertes que proporcionan sostén y los nutrientes necesarios para que las plantas puedan crecer, desarrollar y reproducirse de manera eficiente. Además, el suelo posee una comunidad microbiana muy diversa, que está compuesta principalmente por procariotas (bacterias y arqueas) y eucariotas (hongos, oomicetos, protozoarios, nemátodos, entre otros). Para determinar la calidad del suelo, los microorganismos que lo habitan se emplean como indicadores directos. Algunos de estos microorganismos se encargan de la descomposición y aprovechamiento de la materia orgánica, nutrientes o xenobióticos. Los microorganismos del suelo están estrechamente



relacionados con los cambios en las propiedades del suelo y en la sanidad de su huésped vegetal (Odelate y Babalola, 2019).

El suelo es un ecosistema muy complejo, el cual puede llegar albergar hasta un billón (1×10^{12}) de microorganismos por gramo de suelo (Zhang *et al.* 2019). A este conjunto de microorganismos que forman una comunidad microbiana se le conoce colectivamente como microbioma. El microbioma del suelo ofrece beneficios a las plantas, entre los cuales se incluye la promoción del crecimiento, incremento en la eficiencia en la absorción de nutrientes, control de plagas y fitopatógenos (Ray *et al.* 2020).

Además, el suelo es el principal reservorio del microbioma vegetal. Las raíces de las plantas pueden restringir la presencia de ciertos microorganismos, para así promover el establecimiento de otros microorganismos que son sus socios específicos, tales como las bacterias benéficas y los hongos micorrízicos

(hongos que habitan los suelos y que viven en simbiosis con las plantas, en sus raíces).

Los hongos micorrízicos interactúan directamente con las raíces de las plantas para obtener nutrientes (azúcares, ácidos grasos, aminoácidos), y en cambio el hongo procesa los minerales y materia orgánica del suelo en formas asimilables para la raíz (Shi *et al.* 2023). La rizosfera posee la composición microbiana más abundante y compleja en el suelo. Esta región es la zona que rodea a las raíces de las plantas, con hasta un billón de microorganismos por gramo en esta región del suelo, que se ha estimado puede albergar hasta un millón de diferentes grupos filogenéticos de microorganismos (denominados taxones para su clasificación) (Lakshmanan *et al.* 2017).

Los microorganismos de tipo eucariota representan una importante contribución a la biomasa microbiana. En biología y taxonomía, Eukaryota o Eukarya es el

dominio que incluye a los organismos constituidos por células con núcleo verdadero.

Los hongos y los oomicetos son microorganismos eucariotas filamentosos que se caracterizan por establecer redes de hifas vegetativas filamentosas, para la reproducción asexual y sexual generan esporas y, además comparten procesos similares de infección vegetal y adquisición de nutrientes. Estos organismos son morfológicamente muy similares (por ejemplo, la apariencia de la estructura del micelio) (Figura 1) y, presentan muchas similitudes en las etapas de su ciclo de vida. De hecho, a los oomicetos se les clasificó como hongos. No obstante, algunas características distinguen a los oomicetos de los hongos, tales como la composición de la pared celular, la estructura genómica y las secuencias de marcadores filogenéticos, entre otras. Estas diferencias los ubican en agrupaciones evolutivas distantes. Los

hongos están más cercanos a los animales, mientras que los oomicetos con las algas fotosintéticas (algas pardas) como parte de las Chromalveolata (Richards *et al.* 2006).

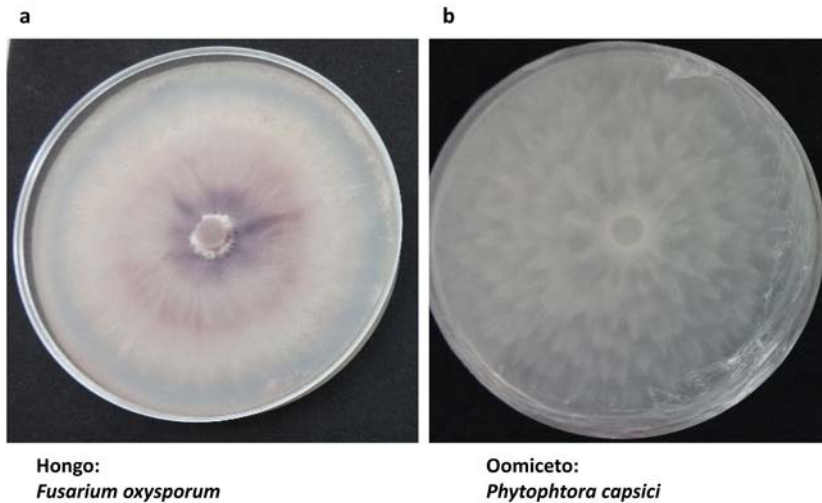


Figura 1. Colonias de hongos y oomicetos: a) colonia del hongo *Fusarium oxysporum* crecido en medio PDA (Papa Dextrosa Agar); b) colonia del oomiceto *Phytophthora capsici* crecido en medio PDA.

Las plantas han interactuado y, a su vez han evolucionado en conjunto con los microorganismos presentes en el suelo, durante millones de años. Además, se ha estimado que la interacción simbiótica con los hongos micorrízicos se estableció al menos 400 millones de años (Pirozynski y Malloch, 1975).

También, se ha estimado que los oomicetos evolucionaron hace aproximadamente hace 400 a 800 millones de años de un ancestro marino autótrofo (capaz de sintetizar su propio alimento) y posteriormente perdieron la capacidad de realizar el metabolismo fotosintético, en adaptación a un estilo de vida heterótrofo (sin capacidad de sintetizar su propio alimento) (Matari *et al.* 2014; Saraiva *et al.* 2023). Algunos oomicetos se convirtieron en patógenos de plantas, con una plasticidad genómica que les permitió infectar a un gran número de hospederos vegetales (Rovenich *et al.* 2023).

Las interacciones que se llevan a cabo por cada miembro del microbioma, en donde se abarca desde los microorganismos

benéficos, neutros y, hasta los patógenos, así como el constante movimiento entre el suelo y en la planta, dan lugar al incremento de la complejidad de las interacciones, lo cual establece un reto constante para la investigación y caracterización de estos ecosistema microbianos (Trivedi *et al.* 2020).

2. Los hongos y oomicetos, grupos de importancia del suelo y las plantas.

Los hongos y oomicetos son habitantes comunes del suelo, debido a su alta capacidad de adaptación. El grupo taxonómico de los hongos es uno de más diversos, los cuales están distribuidos en los diferentes suelos del mundo. Este grupo de microorganismos participan directamente en el ciclo del carbono y nitrógeno del suelo, nutrición, descomposición de la materia orgánica, así como en ser agentes de infecciones en las plantas o ser benéficos para estas en el proceso de



movilización de nutrientes del suelo a la planta y protegiendo contra otros microorganismos patogénicos (Tedersoo *et al.* 2014).

Debido a la importancia de los hongos en el suelo y en las plantas, ha surgido la necesidad de conocer sus patrones globales de distribución y de su diversidad, identificar los grupos particulares de las diferentes regiones geográficas (grupos endémicos), identificar los factores que generan vulnerabilidad en la ecología de los hongos, como la respuesta al cambio climático y la perturbación humana, así como la identificación de áreas de conservación (Tedersoo *et al.* 2014, 2022). Para abordar los estudios de la diversidad de los hongos del suelo es necesario la caracterización de los grupos taxonómicos de dicha comunidad, para tales análisis se usan marcadores genómicos de identificación, los cuales funcionan como un código de barras, los cuales están presentes en el genoma. En el caso de los hongos se utilizan las regiones genómicas del 18S rDNA y las regiones de “espaciadores internos de transcritos (ITSs)”. Estos marcadores se pueden utilizar de manera individual o en combinación para su procesamiento junto con tecnologías de secuenciación de nueva generación (NGS) y herramientas bioinformáticas, permitiendo la identificación taxonómica hasta el nivel de especie (parientes muy cercanos). El proceso de la caracterización de los grupos taxonómicos de hongos que integran una comunidad microbiana implica extraer la información genética (ADN genómico) de todo lo que habita en el suelo (bacterias, arqueas, hongos, oomicetos, nematodos, entre otros). A partir de esta enorme cantidad de información, mediante procesamiento bioinformático se extrae la información correspondiente a la comunidad fúngica y sus similares (oomicetos) empleando la región 18S rDNA y/o ITS, para proceder con la identificación y realizar la agrupación por categoría taxonómica (desde el nivel de filo hasta especie).

Para este proceso se emplean las bases de datos disponibles, en donde se encuentra la información de hongos y oomicetos

ya identificados. Estas bases de datos es empleada como plantilla para determinar la identidad de cada grupo de hongo y oomicetos presentes en la muestra analizada (Frac *et al.* 2018).

El estudio de las comunidades microbianas conformadas por hongos en suelos, se puede hacer referencia al trabajo de investigación realizado por Tedersoo y colaboradores (2014), en el cual se caracterizaron las comunidades microbianas de hongos en el suelo de diferentes regiones del mundo. Se reportó, que los taxones o agrupaciones taxonómicas que representan a los habitantes fúngicos de los suelos son *Basidiomycota*, *Ascomycota*, *Mortierellomycotina*, y *Mucoromycotina* (Tedersoo *et al.* 2014). Otro ejemplo de este tipo de estudios es un trabajo reciente de los mismos autores en donde se tomaron datos ya generados del consorcio global de los hongos para caracterizar las comunidades microbianas de

este grupo de organismos del suelo o microbioma, en el cual participaron varios grupos de investigación de suelos de todo el mundo. En este trabajo se analizaron los patrones de hongos endémicos, así como los factores que afectan a los hongos debido al cambio climático y las áreas para la conservación de grupos de hongos del suelo. En los hábitats tropicales como la Amazonia, la Península de Yucatán y el centro-oeste de África poseen patrones de hongos endémicos o exclusivos a cada región mencionada, aun siendo regiones tropicales. Además, en este trabajo se pudo determinar que los factores ambientales, tales como la sequía, calor, cobertura vegetal, ácidos o alcalinidad del suelo influyen directamente en diversidad, distribución y en la abundancia de estos organismos (Tedersoo *et al.* 2022). La información generada de estos trabajos influye directamente en la toma de decisiones para la conservación de las especies de hongos como las micorrizas arbusculares (AM: endomicorriza que penetra en las células corticales de las raíces) y las ectomicorrizas simbióticas de raíces (colonizan la raíz sin penetrar en el tejido vegetal). La importancia de las endo- y ectomicorrizas se debe a su capacidad de promover el desarrollo y crecimiento vegetal o como agentes de control biológico, una característica altamente cotizada en la agricultura sustentable. Los hongos endomicorrizicos o AM tienen una comunicación compleja con las plantas hospedantes, al punto de promover en la planta hospedante un incremento en la tasa fotosintética, intercambio de gases y adsorción de agua, dando lugar a un crecimiento favorable en condiciones de estrés (Begum *et al.* 2019; Shi *et al.* 2023).

En contraste, la importancia de los oomicetos en las comunidades microbianas del suelo radica en que muchos de estos organismos son patógenos de plantas. Los estudios de la diversidad de oomicetos se han enfocado en suelos de actividad agrícola, en donde se cultivan plantas de importancia agroalimentaria, las cuales son huéspedes de muchos patógenos

microbianos. La información generada de este tipo de estudios permite analizar: 1) la presencia de oomicetos y que géneros están relacionados con actividades patogénicas en plantas, 2) el efecto de la rotación de cultivos en la diversidad de estos microorganismos, 3) los efectos de la aplicación de agroquímicos en la estructura comunitaria (Mácia-Vicente *et al.* 2020).

3. Las funciones de los hongos y oomicetos del suelo en las prácticas agrícolas.

La eubiosis es un término utilizado cuando se ha alcanzado el equilibrio microbiano en un ecosistema.

En los ecosistemas microbianos se pueden encontrar una gran cantidad de integrantes, las cuales están conformadas por organismos benéficos, neutros y patogénicos. Los organismos patogénicos representan una parte pequeña, pero importante de los microorganismos presentes. La disbiosis se



refiere a la pérdida de equilibrio microbiano en un ecosistema, lo cual afecta directamente al huésped e incluso provocando efectos negativos en su salud. Los conceptos expuestos se aplican directamente para los microbiomas. Por lo que el microbioma del suelo y la planta son indicadores directos del estado de saludables o enfermedad del agroecosistema (Frac *et al.* 2022).

Los hongos que habitan el suelo se pueden clasificar de acuerdo a su función ecológica. Los responsables de la formación del suelo se clasifican en el grupo de los reguladores del ecosistema.

Los que regulan enfermedades, plagas y el crecimiento de otros microorganismos se clasifican como controladores biológicos. Finalmente, está el grupo encargado de la estabilización de la materia orgánica del suelo y participar en la descomposición de la materia orgánica y entregar nutrientes para el crecimiento de las plantas (Frac *et al.* 2018). En suelos agrícolas los hongos micorrízicos arbusculares (AM) son la clase de microorganismos benéficos más importantes. Otro grupo importante son los hongos con acción antagónica hacia otros hongos que son patogénicos, tales como *Glomus sp.* o *Trichoderma sp.* Los hongos pertenecientes al género *Trichoderma* suelen ser empleados para el biocontrol de fitopatógenos y, también se pueden utilizar como bioestimulantes vegetales (Shi, 2023).

Por otro lado, los suelos agrícolas pueden poseer fitopatógenos. Los géneros más sobresalientes de patógenos de los grupos de hongos y oomicetos son: *Fusarium* (Michielse y Rep, 2009), *Verticillium* (Klosterman *et al.* 2009), *Rhizoctonia* (Hane *et al.* 2014), *Pythium* y *Phytophthora* (Ho *et al.* 2008). Estos géneros de fitopatógenos tienen importancia fitosanitaria a nivel mundial. Algunas prácticas agrícolas favorecen la selección de genotipos virulentos de fitopatógenos de plantas del reservorio natural de diversidad genética presente en los suelos agrícolas. En la naturaleza, la gran diversidad de plantas y de sus genotipos

(variaciones genéticas entre individuos) impide que las cepas que divergen como patógenas progresen con éxito. Esto se debe a que el proceso de divergencia se lleva a cabo en estrecha relación con la planta hospedera, la cual está rodeada de otras plantas pertenecientes a otras especies, géneros y familias; que a su vez no son susceptible a esta nueva cepa.

Sin embargo, en un campo de cultivo intensivo, donde predominan los monocultivos (plantas de la misma especie y variedad), una cepa patogénica de reciente divergencia cuenta con un gran número de hospederos vegetales que le permite aprovechar su nueva estrategia de patogenicidad. Los hongos que divergen como fitopatógenos de plantas cuentan con elementos en su genoma que les facilitan desarrollar su patogenicidad, así como de obtener mayor número de hospederos vegetales. Además, estos microorganismos pueden ser introducidos por el hombre,

mediante plantas o semillas infectadas a un nuevo nicho en donde podrían adaptarse con éxito (Stukenbrock y McDonald, 2008).

La importancia de la caracterización adecuada y constante de la diversidad del microbioma, para determinar si está en equilibrio, así como el desarrollo y aplicación de métodos para incrementar a los microorganismos benéficos dentro de un ecosistema desequilibrado o disbiótico, son necesarios para obtener una producción sostenible, disminuir o eliminar la aplicación de agroquímicos y para favorecer la protección del ambiente (Frac *et al.* 2018).

4. Los hongos y los oomicetos tienen la maquinaria molecular para poder interactuar con una planta.

Las plantas persisten a la presencia de patógenos, los cuales pueden ser desfavorables para su supervivencia, gracias a que cuentan con diferentes estrategias de defensa, las cuales, son multifacéticas y adaptables, lo que ayuda a contrarrestar a los agentes patógenos y, a su vez permite la asociación con los microorganismos benéficos (Vlot *et al.* 2021). Existen mecanismos de detección como en un primer nivel de interacción entre plantas y microorganismos, hay mecanismos de detección y reconocimiento mutuo. No obstante, el éxito de asociación de los microbios al interactuar con las plantas no depende totalmente de la capacidad de la planta para percibirlos como beneficiosos.

Los microorganismos benéficos o patógenos secretan pequeñas proteínas efectoras, para promover la colonización del hospedero manipulando los mecanismos celulares de la planta en su beneficio. La función más importante de las proteínas efectoras es la supresión de las señales de defensa de las plantas modulando las vías de señalización del jasmonato, el salicilato o el etileno. Lo anterior con el fin de que el microorganismo se integre como parte del microbioma endofítico del hospedero

o pueda desarrollar su ciclo infeccioso, en el caso de un patógeno (Lucke *et al.* 2020).

Estas proteínas se pueden clasificar según su naturaleza molecular en proteínas, metabolitos secundarios o ARN pequeños.

Inicialmente se consideró que los efectores eran específicos de los patógenos, pero cada vez más se reconoce que estas moléculas no son secretadas exclusivamente por los microorganismos patógenos con la finalidad de lograr la infección de la célula vegetal. Se ha reportado que los genomas de hongos y oomicetos patógenos tienen una gran cantidad de genes que codifican para proteínas efectoras en contraste con sus respectivas contrapartes no patogénicas. Los patógenos de plantas llevan a cabo la estrategia de reprogramación de las células del hospedero en su beneficio para establecer con éxito la infección, mediante las proteínas efectoras que secretan durante la infección (Dodds y Rathjen, 2010). Por



ejemplo, la familia de los hongos *Ustilaginaceae*, donde encontramos a *Ustilago maydis* causante del huitlacoche, utilizan a la proteína Pep1 para suprimir los mecanismos de defensa temprana de la planta, en específico se suprime el “estallido oxidativo”, lo cual es indispensable para la virulencia de este grupo de hongos (Doehlemann *et al.* 2009). Algunas de las proteínas efectoras pueden ser reconocidas mediante los receptores codificados por los genes R de las plantas, lo que desencadena una respuesta inmunitaria. Tales receptores son considerados con una actividad de avirulencia (AVR), debido que el reconocimiento de las proteínas efectoras resulta en la pérdida de virulencia del patógeno en los hospederos vegetales que portan los receptos inmunitarios correspondientes (Petit-Houdenot y Fudal, 2017).

La hipótesis de que los hongos micorrízicos codifican proteínas efectoras que se dirigen a las proteínas

del hospedero vegetal para promover una simbiosis positiva se planteó por Marti y colaboradores (2016). Solo se han caracterizado cuatro proteínas efectoras de hongos micorrízicos mutualistas que se dirigen a las proteínas de la célula hospedera para promover la colonización al eludir la respuesta inmune desplegada por las plantas. Por ejemplo, la proteína secretada 7 (SP7, por sus siglas en inglés) del hongo micorrízico arbuscular ingresa a la célula vegetal he interrumpe la señalización de defensa al secuestrar la respuesta mediada por proteínas de la planta, denominada factor 19 de respuesta a etileno (Ethylene Response Factor 19) (Kloppholz *et al.* 2011). El hongo ectomicorrízico *Laccaria bicolor* secreta la proteína LbMiSSP7 (Mycorrhizal induced small secreted protein) que interactúa con una proteína correceptora de la planta encargada de modular la respuesta de defensa mediada por jasmonato (Plett *et al.* 2011a).

5. Hongos benéficos y su interacción con las plantas.

En 1904 se describió el término “rizosfera”, como el área alrededor de la raíz de la planta que está habitada por una población única de organismos. La mayoría de los estudios se han centrado en los microorganismos bacterianos, lo que aún sigue contrastando con los enfocados a hongos y oomicetos, porque siguen siendo escasos.

Los hongos asociados a las plantas están presentes en tres regiones: la región epífita, la región endófito y la rizosfera. La región epífita de las plantas son las partes aéreas, como las hojas, en esta asociación el hongo la protege al hospedero de los patógenos. La región endófito se refiere a las partes internas de la planta, como las semillas, tallo y raíces. Los hongos que colonizan estas regiones no actúan como patógenos y establecen una interacción simbiótica. Finalmente, la rizosfera es la zona en contacto directo de la planta con el suelo y esta región es influenciada directamente por la raíz (Devi *et al.* 2023; García-Latorre *et al.* 2023).

Entre los microorganismos que residen en la rizosfera se encuentran los hongos promotores de crecimiento vegetal (PGPF). Estos hongos son muy cotizados en el sector agrícola por su potencial benéfico como biofertilizantes y agentes de control biológico.

El mecanismo empleado por estos hongos para promover el crecimiento vegetal son mecanismos directos, como la solubilización de macronutrientes como el fósforo, el potasio y el zinc del suelo. Así como la utilización de mecanismos indirectos, como la producción de precursores de auxinas, citoquininas, etileno, ácido abscísico y sideróforos que son reguladores del crecimiento vegetal. Además, los hongos para ejercer su actividad de agentes de control biológico emplean mecanismos antifúngicos o antagonicos hacia otros hongos, así como provocar la activación del sistema de defensa de la planta. Los géneros de hongos PGPF más conocidos son

Aspergillus, *Fusarium*, *Trichoderma*, *Penicillium* y *Phoma*. El más estudiado por promover el crecimiento vegetal y ser un agente de control biológico o biocontrol es el género *Trichoderma* (Tyśkiewicz *et al.* 2022).

La importancia de conocer los beneficios que estos hongos aportan se debe a la dependencia de los agroquímicos, como los fertilizantes y pesticidas, en la producción agrícola y una de sus consecuencias directas de su uso a gran escala es el aumento en los costos de la cadena productiva y su efecto en el poder adquisitivo de la canasta básica. Si bien estos son eficientes en reducir pérdidas del cultivo debido a deficiencia de nutrientes, maleza, enfermedades e insectos plaga, el uso excesivo de estos agroquímicos está afectando negativamente al ambiente, aunado a efectos nocivos a la salud humana y animal. Por ejemplo, se ha determinado efectos perjudiciales en especies no objetivo (abejas y otros insectos polinizadores, hongos y bacterias benéficas) lo que afecta directamente a la diversidad natural de las especies nativas en el campo.

Además, su uso constante ha afectado negativamente la calidad del suelo y el agua y las plagas están desarrollando resistencia por su manejo inadecuado. Ante estos peligros, se busca una agricultura sustentable y amigable con el ambiente y la salud humana, en donde los hongos y otros microorganismos puedan ser la base para lograr este objetivo, realizando más estudios con los que podamos acrecentar su comprensión y elaborar estrategias de manejo eficiente e integral (Tudi *et al.* 2021).

6. Hongos y oomicetos como agentes patógenos en la interacción con la planta.

La seguridad alimentaria se ve amenazada por las enfermedades infecciosas emergentes causadas por hongos y oomicetos. En la historia evolutiva de plantas y patógenos fúngicos se



han establecido relaciones altamente especializadas y extremadamente complejas, creando un patrón de selección mutua. Hechos de relevancia histórica han sido grabados debido a patógenos de plantas, un ejemplo es la hambruna irlandesa representada en la escultura en Dublín "Famine".

El patógeno del tizón tardío de la papa (*Phytophthora infestans*) se introdujo en Europa en el año 1840, provocando la devastación alimentaria de la población irlandesa, ya que los cultivos de la papa resultaron ser altamente susceptibles a este patógeno. Este acontecimiento es conocido como la gran hambruna irlandesa que orilló a la población de este país a migrar en masa a Estados Unidos de América y a otras partes del mundo.

Se ha determinado, mediante la caracterización y análisis filogenéticos de los marcadores moleculares de *P. infestans*, que este patógeno tiene su origen en México (Goss *et al.* 2014). Como hecho

sobresaliente, en su centro de origen los cultivos no sufrieron pérdidas en su producción, ni provocó hambruna, la razón fue que en esta región las especies nativas de papa que contienen elementos en su genoma, los genes R que codifican para los receptores (AVR) que reconocen las proteínas efectoras de este patógeno y, a través de este reconocimiento a nivel molecular las plantas adquieren una resistencia natural al patógeno.

Actualmente estos patógenos afectan a cultivos como el chile *Capsicum* (Figura 2), chayote *Sechium edule* y otras hortalizas.



Figura 2. Enfermedad causada por *Phytophthora capsici* en chile. La numeración de 0-4 indica el grado de la severidad de los síntomas causados por el oomiceto en chile; del 0-1 sin síntomas visibles, 2 necrosis en el área de inoculación, 3 necrosis y marchitez en el área de inoculación, 4 necrosis en tejido sistémico.

Otro hecho histórico moldeado por patógenos vegetales es el del cultivo de plátano. La enfermedad más destructiva del plátano es causada por un hongo conocido como *Fusarium oxysporum* f. sp. Cubense, el cual puede estar en el suelo por mucho tiempo hasta que sea cultivado su hospedero preferencial. Reportado por primera vez en Australia, actualmente está disperso en todo el mundo. Provoca pérdidas económicas que orillaron a emplear variedad de plátano Cavendish, el cual era resistente al patógeno, expandiéndose como monocultivo. Lo cual provocó una disminución en la investigación del patógeno *Fusarium oxysporum* f. sp. Cubense. Actualmente, se reporta la aparición de una nueva raza de *Fusarium oxysporum* f. sp. Cubense, a la que la variedad Cavendish es susceptible junto con otros cultivares, esto ha generado una preocupación mundial promoviendo la investigación de esa interacción planta-patógeno como de alta prioridad (Ditta *et al.* 2018).

Los impactos de las enfermedades fúngicas en los cultivos tienen consecuencias directas en la economía, la alimentación y en la salud pública. Actualmente, se han estudiado y caracterizado infecciones persistentes de importancia agrícola ocasionadas por hongos y oomicetos, tales como la de *Magnaporthe oryzae* en el arroz, *Puccinia graminis* en el trigo, *Ustilago maydis* en el maíz, *Phytophthora infestans* en la papa y *Phakospora pachyrizi* en la soya; por mencionar las de mayor importancia. Cabe destacar que estas interacciones pueden variar regionalmente, lo que representan una amenaza constante y creciente para la seguridad alimentaria a nivel mundial.

7.- Aplicaciones de las interacciones planta - hongos y oomicetos.

La caracterización de las interacciones bióticas de las plantas con otros microorganismos ha permitido reconocer y clasificarlas en neutras, mutualistas, simbióticas y patogénicas. Además, se ha podido establecer la importancia de los organismos que pueden ser antagónicos a otros organismos, en especial a los organismos patógenos. A estos organismos se le ha clasificado como biocontroles por su efectividad para restringir o eliminar la propagación de organismos patógenos. De lo cual pueden derivarse los productos de tipo biocontrol. Estos productos biológicos para tener éxito a nivel comercial, deben satisfacer las necesidades de los agricultores en varios aspectos, como otorgar resultados positivos repetidos, precios accesibles, fácil uso y larga vida útil (Dutta *et al.* 2022).

El género *Trichoderma* ha sido estudiado y caracterizado desde 1970 con éxito en el manejo de enfermedades contra patógenos fúngicos y oomicetos. Adicionalmente, los factores estimulantes como la síntesis de fitohormonas y fitorreguladores inducidos por *Trichoderma* en las plantas favorecen la promoción de crecimiento, mejora en la estructura y funcionamiento de las raíces, incrementa la tasa germinación y la viabilidad de las semillas, así como un incremento en la eficiencia fotosintética,

floración, rendimiento y calidad de la producción. Actualmente en el mercado agrícola existen una gran cantidad de biofungicidas basadas en *Trichoderma*, representando el 60 % del mercado de hongos utilizados como agentes de control biológico en todo el mundo y se registran nuevos productos de manera constante. La aplicación de *Trichoderma* como agente de control biológico o biocontrol en campo ha enfrentado limitaciones en su eficacia contra los microorganismos a los que va dirigido, ya que las condiciones ambientales como la humedad del suelo y ambiental, la biodisponibilidad de nutrientes, la acidez o alcalinidad del suelo, así como el uso previo de agroquímicos afectan negativamente su actividad biológica (Woo *et al.* 2023). Lo que supone la necesidad de seguir buscando nuevos agentes de control biológico para que puedan ser empleados en conjunto o de manera secuencial con *Trichoderma*.



8. Conclusión y perspectivas futuras.

Los microbiomas son parte integral de la biodiversidad de nuestro planeta Tierra y desempeñan un papel clave en los suelos. Los hongos del suelo desempeñan un papel crucial en el ambiente e influyen directamente en las actividades biológicas de las plantas como simbioses, patógenos o mediante la degradación de la materia orgánica. Sin embargo, las actividades humanas han provocado una alteración sustancial de los suelos afectando la diversidad de microorganismos que la habitan, incluyendo el microbioma. Este desequilibrio aumenta la emergencia de miembros con actividad patógena del microbioma e impide que microorganismos benéficos lleven a cabo sus funciones biológicas en el ambiente. Para hacer frente a los desafíos de la demanda de alimentos y el cuidado del ambiente, los estudios sobre microbiomas relacionados con la patología y la protección de las plantas deben ser constantes e implementar enfoques multidisciplinarios, como el uso de herramientas tradicionales de aislamiento, cultivo y propagación, caracterización a nivel molecular de las interacciones y la bioinformática para la caracterización de los genomas y la dinámica ecológica del microbioma.

Referencias

- Begum, N., C., Qin M.A. Ahanger, S. Raza, M. I. Khan, M. Ashraf, ... & L. Zhang. 2019. *Role of arbuscular mycorrhizal fungi in plant growth regulation: implications in abiotic stress tolerance*. *Frontiers in plant science*, (10), 1068.
- Blakney A. J., L.D. Bainard, M. St-Arnaud, & M. Hijri. 2023. *Soil chemistry and soil history significantly structure oomycete communities in Brassicaceae crop rotations*. *Applied and Environmental Microbiology*, 89(1), e01314-22.
- Devi R., R. Verma, R. Dhalaria, A. Kumar, D. Kumar, S. Puri, ... & K. Kuca. 2023. *A systematic review on endophytic fungi and its role in the commercial applications*. *Planta*, 257(4), 70.
- Dita, M., M. Barquero, D. Heck, E. S. Mizubuti, & C. P. Staver. 2018. *Fusarium wilt of banana: current knowledge on epidemiology and research needs toward sustainable disease management*. *Frontiers in Plant Science*, 9, 1468.
- Dodds, P. N., & J.P. Rathjen. 2010. *Plant immunity: towards an integrated view of plant-pathogen interactions*. *Nature Reviews Genetics*, 11(8), 539-548.
- Doehlemann, G., K. Van Der Linde, D. Aßmann, D. Schwambach, A. Hof, A. Mohanty... & R. Kahmann. 2009. *Pep1, a secreted effector protein of Ustilago maydis, is required for successful invasion of plant cells*. *PLoS pathogens*, 5(2), e1000290.

- Dutta P., L. Deb & A. K. Pandey. 2022. *Trichoderma-from lab bench to field application: Looking back over 50 years*. *Frontiers in Agronomy*, 4, 932839.
- Frąc, M., S. E. Hannula, M. Bełka, & M. Jędrzycka. 2018. *Fungal biodiversity and their role in soil health*. *Frontiers in Microbiology*, 9: 707.
- Frąc, M., E. S. Hannula, M. Bełka, J. F. Salles, & M. Jedryczka. 2022. *Soil mycobiome in sustainable agriculture*. *Frontiers in Microbiology*, 13, 1033824.
- García-Latorre, C., S. Rodrigo, Y. Marin-Felix, M. Stadler, & O. Santamaria. 2023. *Plant-growth promoting activity of three fungal endophytes isolated from plants living in dehesas and their effect on Lolium multiflorum*. *Scientific Reports*, 13(1), 7354.
- Goss, E. M., J.F. Tabima, D. E. Cooke, S. Restrepo, W. E. Fry, G. A. Forbes, ... & N.J. Grünwald. 2014. *The Irish potato famine pathogen Phytophthora infestans originated in central Mexico rather than the Andes*. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 111(24), 8791-8796.
- Hane, J. K., J.P. Anderson, A. H. Williams, J. Sperschneider, & K. B. Singh. 2014. *Genome sequencing and comparative genomics of the broad host-range pathogen Rhizoctonia solani AG8*. *PLoS genetics*, 10(5), e1004281.
- Ho, H. H. 2018. *The taxonomy and biology of Phytophthora and Pythium*. *Journal of Bacteriology and Mycology*. 6, 40-45.
- Hu L., Z. Wu, C. Robert, X. Ouyang, T. Zust, A. Mestrot, J. Xu, M. Erb. 2021. *Soil chemistry determines whether defensive plant secondary metabolites promote or suppress herbivore growth*. *Proceedings of the National Academy of Sciences U S A* 118: e2109602118.
- Kawasaki A, P.G.Dennis, C. Forstner, A.K.H. Raghavendra, U. Mathesius, A.E. Richardson, E. Delhaize, M. Gilliam, M. Watt, P. R. Ryan. 2021. *Manipulating exudate composition from root apices shapes the microbiome throughout the root system*. *Plant Physiology* 187:2279–2295.
- Kloppholz, S., H. Kuhn, & N. Requena. 2011. *A secreted fungal effector of Glomus intraradices promotes symbiotic biotrophy*. *Current Biology*, 21(14), 1204-1209.
- Klosterman, S. J., Z. K. Atallah, G. E. Vallad, & K. V. Subbarao. 2009. *Diversity, pathogenicity, and management of Verticillium species*. *Annual review of phytopathology*, 47, 39-62.
- Lakshmanan, V., P. Ray, & K. D. Craven. 2017. *Toward a Resilient, Functional Microbiome: Drought Tolerance-Alleviating Microbes for Sustainable Agriculture*. *Plant Stress Tolerance* 163, 69–84.
- Lucke, M., M. G. Correa, & A. Levy. 2020. *The role of secretion systems, effectors, and secondary metabolites of beneficial rhizobacteria in interactions with plants and microbes*. *Frontiers in Plant Science*, 11, 589416.



- Maciá-Vicente, J. G., B. Nam, & M. Thines. 2020. *Root filtering, rather than host identity or age, determines the composition of root-associated fungi and oomycetes in three naturally co-occurring Brassicaceae*. *Soil Biology and Biochemistry*, 146, 107806.
- Matari, N.H., J. E. Blair. 2014. *A multilocus timescale for oomycete evolution estimated under three distinct molecular clock models*. *BMC Ecology and Evolution*. 14, 101.
- Martin, F., A. Kohler, C. Murat, C. Veneault-Fourrey, & D. S. Hibbett. 2016. *Unearthing the roots of ectomycorrhizal symbioses*. *Nature Reviews Microbiology*, 14(12), 760-773.
- Michielse, C. B., & M. Rep. 2009. *Pathogen profile update: Fusarium oxysporum*. *Molecular plant pathology*, 10(3), 311.
- Odelade KA, & O.O. Babalola. 2019. *Bacteria, Fungi and Archaea Domains in Rhizospheric Soil and Their Effects in Enhancing Agricultural Productivity*. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 12;16(20):3873.
- Petit-Houdenot, Y., & I. Fudal. 2017. *Complex interactions between fungal avirulence genes and their corresponding plant resistance genes and consequences for disease resistance management*. *Frontiers in plant science*, 8, 1072.
- Pirozynski, K. A., & D. W. Malloch. 1975. *The origin of land plants: a matter of mycotrophism*. *Biosystems*, 6(3), 153-164.
- Plett, J. M., M. Kemppainen, S. D. Kale, A. Kohler, V. Legué, A. Brun, A ... & F. Martin. 2011. *A secreted effector protein of Laccaria bicolor is required for symbiosis development*. *Current Biology*, 21(14), 1197-1203.
- Plett, J. M., & F. Martin. 2011. *Blurred boundaries: lifestyle lessons from ectomycorrhizal fungal genomes*. *Trends in Genetics*, 27(1), 14-22.
- Ray, P., V. Lakshmanan, J. L. Labbé, & K. D. Craven. 2020. *Microbe to microbiome: a paradigm shift in the application of microorganisms for sustainable agriculture*. *Frontiers in Microbiology* 11: 622926.
- Richards, T. A., J. B. Dacks, J. M. Jenkinson, C. R. Thornton, & N. J. Talbot. 2006. *Evolution of filamentous plant pathogens: gene exchange across eukaryotic kingdoms*. *Current Biology*, 16(18), 1857-1864.
- Rovenich, H., & B. P. Thomma. 2023. *Battle of the bugs: how an oomycete pathogen shapes the microbiota of its host*. *New Phytologist*. 239: 2320–2334.
- Saraiva, M., M. E. Ściślak, Y. T. Ascurra, T. M. Ferrando, N. Zic, C. Henard, ... & V. G. Vleeshouwers. 2022. *The molecular dialog between oomycete effectors and their plant and animal hosts*. *Fungal Biology Reviews*. 43; 100289.
- Shi, J., X. Wang, & E. Wang. 2023. *Mycorrhizal symbiosis in plant growth and stress adaptation: From genes to ecosystems*. *Annual Review of Plant Biology*, 74, 569-607.

- Stukenbrock, E. H., & B. A. McDonald. 2008. *The origins of plant pathogens in agro-ecosystems*. Annual Reviews Phytopathology, 46, 75-100.
- Tedersoo, L., M. Bahram, S. Põlme, U. Kõljalg, N. S. Yorou, R. Wijesundera, ... & K. Abarenkov. 2014. *Global diversity and geography of soil fungi*. Science, 346(6213), 1256688.
- Tedersoo, L., V. Mikryukov, A. Zizka, M. Bahram, N. Hagh-Doust, N., Anslan, S., ... & K. Abarenkov. 2022. *Global patterns in endemism and vulnerability of soil fungi*. Global Change Biology, 28(22), 6696-6710.
- Trivedi, P., J. E. Leach, S. T. Tringe, T. Sa, & B. K. Singh. 2020. *Plant-microbiome interactions: from community assembly to plant health*. Nature Reviews Microbiology, 18(11), 607-621.
- Tudi, M., H. Daniel Ruan, L. Wang, J. Lyu, R. Sadler, D. Connell, ... & D. T. Phung. 2021. *Agriculture development, pesticide application and its impact on the environment*. International Journal of Environmental Research and Public Health, 18(3), 1112.
- Tyśkiewicz, R., A. Nowak, E. Ozimek, & J. Jaroszuk-Ścisł. 2022. *Trichoderma: The current status of its application in agriculture for the biocontrol of fungal phytopathogens and stimulation of plant growth*. International Journal of Molecular Sciences, 23(4), 2329.
- Vlot, A. C., J. H. Sales, M. Lenk, K. Bauer, A. Brambilla, A. Sommer, ... & S. Nayem. 2021. *Systemic propagation of immunity in plants*. New Phytologist, 229(3), 1234-1250.
- Woo, S. L., R. Hermosa, M. Lorito, & E. Monte. 2023. *Trichoderma: A multipurpose, plant-beneficial microorganism for eco-sustainable agriculture*. Nature Reviews Microbiology, 21(5), 312-326.
- Zhang, C., Y. Zhang, Z. Ding, & Y. Bai. 2019. *Contribution of microbial inter-kingdom balance to plant health*. Molecular Plant, 12(2), 148-149.

Cita

Caamal-Chan M.G., A. Loera-Muro, A. Barraza, L.G. Hernández Montiel. Los hongos y oomicetos, habitantes naturales del suelo: ¿Amigos o enemigos de las plantas?. **Recursos Naturales y Sociedad, 2024. Vol. 10 (2): 89-105.** <https://doi.org/10.18846/renaysoc.2024.10.10.02.0008>

Sometido: 25 de abril de 2024

Aceptado: 20 de septiembre de 2024

Editor asociado: Dra. Crisalejandra Rivera Pérez

Editora ejecutiva: Dra. Crisalejandra Rivera Pérez

Diseño gráfico editorial: Lic. Gerardo Hernández

Más allá de una bebida, revelando el valioso residuo del agua de jamaica

Beyond a beverage, unveiling the
valuable residue of roselle water

Recursos Naturales y Sociedad, 2024. Vol. 10 (2): 107-117.
<https://doi.org/10.18846/renaysoc.2024.10.10.02.0009>

Evelyn Regalado-Rentería¹, Iza F. Pérez Ramírez^{1*}

¹Facultad de Química, Universidad Autónoma de Querétaro.
*Email: iza.perez@uaq.mx





Resumen

El agua de jamaica, una bebida popular en México y otras regiones de América Latina y del Caribe, es elaborada a partir de los cálices secos de la flor de jamaica mediante un proceso conocido como decocción, que da como resultado una bebida de vibrante color rojo, con un ligero toque ácido y notas florales. Sin embargo, el valor de la jamaica va más allá de su delicioso y refrescante sabor. El agua de jamaica es reconocida en la medicina tradicional mexicana por su valiosa contribución a la salud, debido a su contenido variado de compuestos químicos, entre los que se encuentran los polifenoles y los ácidos orgánicos. Pero, ¿sabías que no todos los compuestos químicos de los cálices son extraídos durante la preparación del agua de jamaica?. En este artículo, exploraremos los tipos de compuestos se encuentran presentes en el residuo que queda durante la preparación del agua de jamaica, y revisaremos los beneficios a la salud que han sido demostrados por la comunidad científica. Tras la lectura de este artículo, esperamos que la próxima vez que te prepares un vaso de agua de jamaica, pienses dos veces antes de desechar el residuo. ¡Podrías estar descartando algo muy valioso para tu salud!

Palabras claves: Agua de jamaica, residuo, valorización, compuestos químicos, fibra dietaria antioxidante, beneficios a la salud.

Abstract

Hibiscus water, a popular beverage in Mexico and other regions of Latin America and the Caribbean, is made from the dried calyces of the hibiscus flower through a process known as decoction, resulting in a vibrant, red-colored drink with a slightly acidic taste and floral notes. However, the value of hibiscus goes beyond

its delicious and refreshing flavor. Hibiscus water is recognized in traditional Mexican medicine for its valuable contribution to health, thanks to its diverse content of chemical compounds, including polyphenols and organic acids. Did you know that not all chemical compounds from the calyces are extracted during the preparation of hibiscus water? In this article, we will explore what types of compounds are present in the residue that remains during the preparation of hibiscus water, and we will review the health benefits that the scientific community has demonstrated. After reading this article, we hope you will think twice before discarding the residue the next time you prepare a glass of hibiscus water. You could be discarding something precious for your health!

Keywords: Roselle beverage, residue, valorization, chemical compounds, antioxidant dietary fiber, health benefits.

Antecedentes

El trayecto de jamaica: desde sus orígenes en África hasta tu vaso

La planta de jamaica (*Hibiscus sabdariffa*) es oriunda de África y se propagó con dirección a Asia y las Indias Occidentales entre los siglos XVI y XVII, llegando finalmente a Latinoamérica en el siglo XVI durante el periodo colonial. Se trata de un arbusto que alcanza una altura de unos 2 a 3 metros. Aunque sus grandes flores de color amarillo pálido son llamativas, lo que utilizamos al preparar el agua de jamaica no es la flor en sí, sino el cáliz, que tiene forma de copa y rodea la base de la flor, como si fuera una pequeña capa que protege el centro de la flor (ver Figura 1). Cuando la planta alcanza la madurez, la flor se cae y el cáliz comienza a crecer y engrosarse, volviéndose más carnoso. Posteriormente, se recolecta el cáliz, que en México suele dejarse secar al sol, para su comercialización.

Es común asociar el cáliz de jamaica con un color rojo intenso, pero existen diversas variedades que van desde un tono crema-blanquecino hasta el morado.

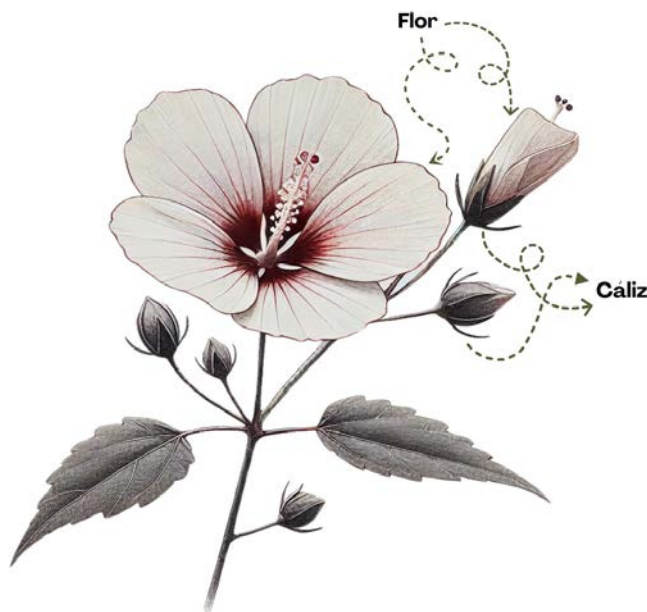


Figura 1. Ilustración de una planta de jamaica (*Hibiscus sabdariffa* L.) con énfasis en cómo el cáliz rodea la base de la flor antes de que los pétalos caigan. El cáliz es la estructura que se utiliza para la preparación del agua de jamaica.

Culturalmente, la jamaica es parte de la dieta cotidiana en México y en otros países de América Latina. A lo largo de los siglos, su consumo ha sido asociado no solo a su sabor refrescante, sino también a sus usos medicinales en la medicina tradicional, donde se valora por sus propiedades digestivas y diuréticas. El cáliz seco tiene como uso principal la elaboración de bebidas, aunque también puede consumirse de otras formas, como en mermeladas, salsas, o incluso en ensaladas. Además, se utiliza como pigmento en la industria alimentaria, cosmética y farmacéutica (Cid-Ortega y Guerrero-Beltrán, 2015; Salami y Afolayan, 2020).

Más allá de su valor culinario, la jamaica tiene una gran importancia económica en varias regiones, especialmente en México, donde su cultivo es una fuente de ingresos para muchas comunidades rurales. Los pequeños productores dependen de la venta de jamaica no solo para cubrir las necesidades de sus familias,



sino también para financiar el siguiente ciclo de cultivo. México produce alrededor de 7 mil toneladas de jamaica al año, siendo los estados de Guerrero y Oaxaca los principales productores. La importancia social de este cultivo radica en que la mayoría de los productores son de bajos recursos, y la cosecha se realiza de forma manual, abarcando poco más de 19 mil hectáreas en todo el país (SIAP, 2018).

A pesar de su relevancia en México, el 50% del consumo nacional de jamaica proviene de otros países debido a que la producción local no es suficiente para cubrir toda la demanda. Además de su relevancia económica, lo que realmente hace de la jamaica una planta tan valiosa es su composición química. No solo es popular por su sabor, sino que contiene compuestos bioactivos con propiedades beneficiosas para la salud. A continuación, exploraremos estos compuestos y cómo contribuyen a los efectos medicinales de la jamaica.

Compuestos químicos en el agua de jamaica, más allá de lo que los ojos ven

Las diferentes partes de las plantas, como semillas, raíces, tallos, hojas, flores y frutos, producen unos compuestos químicos llamados metabolitos secundarios. Son denominados así dado que no son esenciales para su crecimiento y desarrollo, pero les permiten adaptarse al entorno y sobrevivir. Las plantas los producen para protegerse de herbívoros, patógenos, radiación ultravioleta, así como para limitar el crecimiento de plantas cercanas que podrían afectar su desarrollo e incluso para atraer polinizadores. Cuando el consumo de estos metabolitos secundarios brinda un efecto benéfico a la salud, como su capacidad antioxidante o antiinflamatoria que puede ayudar a reducir el riesgo de enfermedades cardiovasculares o cáncer, se les llaman compuestos bioactivos (Banwo *et al.* 2021).

Estos compuestos bioactivos son los responsables de que muchas plantas sean consideradas medicinales, como es el caso de la jamaica.

Muchas de las bebidas que consumimos tienen una función más allá de la hidratación. Durante la preparación del agua de jamaica, se extraen algunos de los compuestos bioactivos presentes en cáliz.

Entre los más estudiados por sus efectos benéficos a la salud están los polifenoles, una gran familia grande de compuestos conocidos por su actividad antioxidante, es decir, la capacidad de neutralizar los radicales libres, que son moléculas inestables que pueden dañar las células y contribuir al envejecimiento y al desarrollo de numerosas enfermedades. Dentro de esta familia, están las antocianinas, que son unos compuestos que brindan colores rosa-azul a las plantas que cuando las consumimos nos dan múltiples beneficios a la salud. Los colores de los cálices

dependen de qué antocianinas produjo en específico la planta, de tal manera que la planta de jamaica que da cálices blancos no produce antocianinas. Por otro lado, el agua de jamaica es rica en ácidos orgánicos, que son los compuestos responsables de su sabor ácido (Salem *et al.* 2021). Después de la decocción, los cálices generalmente se desechan como residuo. Pero, ¿quedan compuestos bioactivos en los cálices cocidos, es decir, en el residuo que queda después de la decocción?

El valor oculto del residuo del agua de jamaica, los compuestos que permanecen

Existen pocos estudios científicos que hayan propuesto el residuo del agua de jamaica como una fuente de compuestos bioactivos. Consideramos importante destacar que solo encontramos cuatro, todos desarrollados por investigadores mexicanos, que van desde el 2014 hasta el 2024. Sin embargo, la conceptualización de los residuos agroalimentarios como fuente de compuestos bioactivos viene de mucho más atrás.

En 1998, Saura-Calixto propuso el concepto de 'fibra dietaria antioxidante' para resaltar el alto valor del orujo de uva, que es el residuo generado durante el proceso de elaboración del vino. Este concepto se refiere a fuentes de alimentos, como residuos vegetales, que tienen un alto contenido de fibra dietaria y también contienen compuestos antioxidantes naturales. Esto fue revolucionario, ya que por décadas se hablaba de estos componentes por separado, tanto en áreas de nutrición como en la industria de los alimentos. Sin embargo, la fibra dietaria antioxidante los considera como uno solo.

La fibra dietaria es una parte de los alimentos que nuestro cuerpo no puede digerir completamente, pero es esencial porque actúa como una 'escoba' que ayuda a limpiar nuestro sistema digestivo y mantiene el intestino sano. Por otro lado, los antioxidantes son como pequeños 'escudos' que protegen

nuestras células del daño causado por los radicales libres, que son moléculas inestables que pueden afectar la salud de nuestras células, acelerando el envejecimiento y contribuyendo a enfermedades.

Lo interesante del concepto de fibra dietaria antioxidante es que junta dos beneficios: por un lado, la fibra ayuda a la digestión y, por otro, los antioxidantes actúan como escudos protectores de nuestras células.

Cuando comemos antioxidantes unidos a la fibra, nuestro cuerpo los procesa más lentamente, como si descompusiera los alimentos de forma gradual, lo que puede prolongar los beneficios en nuestra salud.

Este proceso de metabolización diferenciada es importante, ya que podría generar distintos efectos benéficos en la salud. Algunos estudios sugieren que, cuando los antioxidantes están unidos a la fibra, se liberan poco a poco en el sistema digestivo, como si fueran dosis



pequeñas y continuas, lo que puede hacer que sus efectos protectores duren más tiempo en nuestro cuerpo, como la protección contra el estrés oxidativo y la mejora en la salud cardiovascular (Angulo-López *et al.* 2022). Aunque este mecanismo aún está en investigación, los estudios actuales respaldan la hipótesis de que los compuestos bioactivos presentes en la fibra dietaria antioxidante ofrecen beneficios diferentes a los de los antioxidantes libres. Esto ha generado un interés creciente en la búsqueda de nuevas fuentes de fibra dietaria antioxidante a partir de residuos agroalimentarios.

Fue a partir de ese momento que se realizaron numerosas investigaciones científicas para buscar otras fuentes de fibra dietaria antioxidante, como residuos de frutas, vegetales, y subproductos de la industria alimentaria, incluyendo cáscaras, semillas y bagazos. En 2014, el grupo de científicos de Sáyago-Ayerdi *et al.*

propusieron el residuo de la jamaica como fuente de fibra dietaria antioxidante por primera vez. En este estudio, se resalta que durante el proceso de elaboración del agua de jamaica se extraen parcialmente los compuestos bioactivos del cáliz, pero la mayoría se retienen en el residuo. Se resalta que el residuo tiene un alto contenido de fibra dietaria (79%), pues solo los compuestos más afines al agua (hidrosolubles) y de bajo peso molecular se trasladan a la bebida.

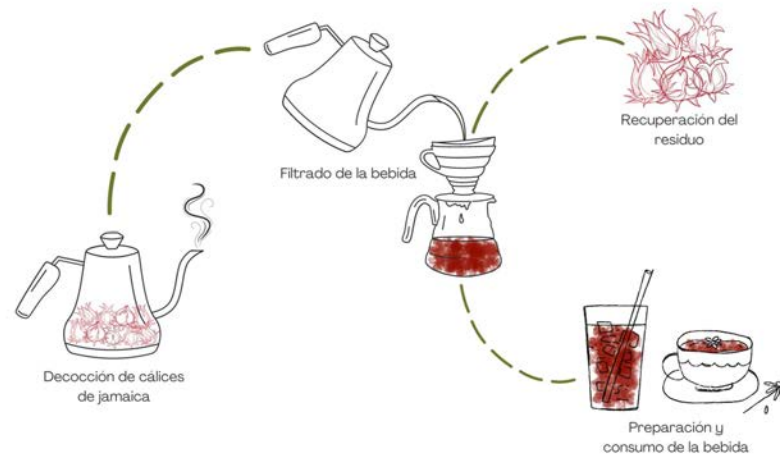


Figura 2. Diagrama del proceso de preparación del agua de jamaica, que incluye la decocción de los cáliz, el filtrado de la bebida y la recuperación del residuo.

Años después, Amaya-Cruz *et al.* (2018) hicieron un análisis más a detalle del residuo del agua de jamaica, encontrando que retenía el 56% de las antocianinas presentes en el cáliz. Esto tiene sentido, ya que si alguna vez has visto el residuo del agua de jamaica, recordarás que sigue siendo de un color rojo intenso como lo era antes de empezar el proceso de decocción (ver Figura 2). Si bien se pierden algunos polifenoles libres, el residuo queda enriquecido con polifenoles ligados a la fibra dietaria, que aportan capacidad antioxidante (ver figura 3). Los científicos que realizaron esta investigación también hicieron un análisis microscópico del residuo y encontraron que es más poroso que el cáliz antes de la decocción, lo que modifica sus propiedades tecnofuncionales, es decir, aquellas características que indican

si un material tiene la capacidad de retener agua o aceite, o qué tan viscoso puede ser. Estos datos son muy importantes en la industria de alimentos, ya que nos ayudan a saber qué usos le podemos dar a un ingrediente.

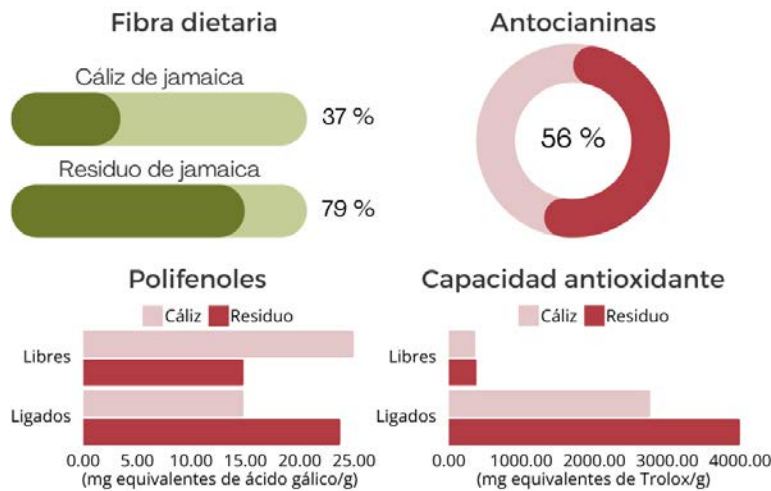


Figura 3. Comparación de la composición química entre el cáliz de jamaica y su residuo tras la decocción, resaltando que el residuo retiene una cantidad importante de compuestos bioactivos con potencial antioxidante.

En estudios más recientes, Esparza-Merino *et al.* (2019) demostraron que el residuo de jamaica es de particular interés para la extracción de pectina, un ingrediente alimentario que se utiliza comúnmente en la gelificación de alimentos como mermeladas, jaleas y frutas en conserva. Mientras que Serna-Tenorio *et al.* (2024) realizaron un análisis químico profundo del residuo del agua de jamaica, encontrando que además de la fibra dietaria y los polifenoles libres, también se retenían entre 1.26 y 2.72 veces más compuestos antioxidantes unidos a la fibra, incluyendo polifenoles y ácidos orgánicos.

El residuo del agua de jamaica contiene una variedad de compuestos bioactivos que podrían ser útiles en la prevención y el tratamiento complementario de diversas enfermedades.

Además de las antocianinas y los ácidos orgánicos, este residuo es rico en polifenoles, flavonoides, pectina, y otros

antioxidantes ligados a la fibra. Aunque hasta ahora solo se han realizado dos estudios científicos al respecto, se ha sugerido que estos compuestos podrían ser beneficiosos en la prevención de enfermedades crónicas, como enfermedades cardiovasculares, diabetes tipo 2 y algunos tipos de cáncer, debido a sus propiedades antioxidantes y antiinflamatorias.

En un estudio, se comparó el efecto del cáliz de jamaica secado al sol (antes de la decocción) y el residuo (después de la decocción) en ratas alimentadas con una dieta rica en grasa y fructosa, simulando una dieta occidental de cafetería que refleja la progresión de la obesidad observada en humanos. El residuo de jamaica ayudó a evitar el aumento de peso (obesidad), y también previno la resistencia a la insulina, que es cuando el cuerpo tiene problemas para usar el azúcar de los alimentos como energía, algo que puede llevar a la diabetes tipo 2. Además, el



residuo de jamaica protegió el hígado, evitando que se acumulara grasa de manera no saludable. De manera interesante, se observó que el residuo generado durante la decocción, que es rico en fibra dietaria y compuestos antioxidantes unidos a ella, mostró beneficios similares al cáliz antes de la decocción, que es rico en compuestos antioxidantes libres (Amaya-Cruz *et al.*, 2019).

En el otro estudio, se evaluó el efecto del residuo de jamaica en ratas inducidas a diabetes tipo 2, simulando el desarrollo de la enfermedad en humanos. Se encontró que el residuo ayudó a mantener los niveles saludables de glucosa, triglicéridos y colesterol en sangre, y fue más efectivo cuando se usó antes de que se desarrollara la diabetes (Amaya-Cruz *et al.* 2019). Estos hallazgos son prometedores, pero se necesitan más investigaciones científicas que evalúen su potencial en beneficio de la salud humana.

Y, ¿cómo se puede comer el residuo de jamaica?

La idea de aprovechar el residuo de jamaica en lugar de desecharlo es atractiva y tiene un gran potencial. Los estudios que han demostrado su efecto benéfico para la salud lo han preparado como un suplemento dietario, secando y moliendo el residuo. Sin embargo, esta estrategia puede no ser tan práctica para realizar en casa.

Ahmed y Abozed (2015) desarrollaron galletas saladas adicionadas con residuo de jamaica, con alto contenido de fibra y actividad antioxidante. Baigts-Allende *et al.* (2022) propusieron utilizar el residuo de jamaica para fortificar la pasta, aumentando su contenido de fibra dietaria, minerales, vitamina C y compuestos fenólicos, además de darle un color rojo atractivo. Por otro lado, Bermúdez *et al.* (2023) propusieron una alternativa un poco más extravagante, ellos desarrollando unos discos de carne de res, algo similar a los utilizados para hamburguesas, a los que le agregó el residuo de jamaica como sustituto de carne.

Esta práctica de sustitución existe desde algunos años, siendo los hongos el ingrediente más utilizado, y lo que se busca es mejorar la composición de nutrimentos de la carne, al mismo tiempo de disminuir el impacto ambiental de su producción.

Aunque los hongos son el ingrediente de sustitución más utilizado, en esta propuesta se diseñó un producto con residuo de jamaica con buenas propiedades antioxidantes que fue aceptado por los consumidores.

Fuera de los artículos científicos, en internet encontrarás una gran cantidad de opciones de recetas para aprovechar el residuo de jamaica. Por ejemplo, una receta muy utilizada por las personas vegetarianas es guisarla y comerla en tacos o tostadas.

Si consumes lácteos y productos cárnicos, puedes agregar el residuo de jamaica guisado a una quesadilla, o guisarla con carne de res, pollo, cerdo o pescado. El residuo de jamaica se puede usar como base para hacer salsas para carnes o para preparar

un chamoy, que es una salsa agridulce y picante típica de México, ideal para acompañar frutas o botanas, así como para elaborar salsas dulces para preparar un postre. En un chile relleno, en una ensalada combinada con una fruta ácida como la naranja o la guayaba, en un pastel de chocolate. Ya sea a través de recetas tradicionales o nuevas creaciones gastronómicas, el residuo de jamaica brindará un toque de sabor y nutrición a los alimentos, transformando un residuo en un ingrediente valioso.

Consideraciones finales y perspectivas

Aunque tradicionalmente se ha considerado como un subproducto de la preparación del agua de jamaica, este residuo contiene un alto contenido y una gran variedad de compuestos bioactivos entre los que destacan los antioxidantes. Los estudios científicos han demostrado los beneficios del consumo del residuo del agua de jamaica en modelos animales, encontrando resultados prometedores que abren la puerta a futuras investigaciones en humanos. En un mundo donde la salud y el medio ambiente son cada vez más importantes, el estudio y aprovechamiento del residuo del agua de jamaica representa un paso hacia adelante en la búsqueda de un futuro más saludable y sostenible para todos.

Agradecimientos

Al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías (CONAHCYT) por la beca otorgada a Evelyn Regalado-Rentería en el marco de la Convocatoria 2022(1) Estancias Posdoctorales por México en la modalidad académica. Al Fondo para el Desarrollo del Conocimiento (FONDEC-UAQ) 2022 (FQU-2022-08).

Literatura citada

- Ahmed, Z.S. y S.S. Abozed. 2015. *Functional and antioxidant properties of novel snack crackers incorporated with Hibiscus sabdariffa by-product*. Journal of Advanced Research 6(1): 79-87.
- Amaya-Cruz, D., I.F. Pérez-Ramírez, J. Pérez-Jiménez, G.M. Nava y R. Reynoso-Camacho. 2019. *Comparison of the bioactive potential of Roselle (Hibiscus sabdariffa L.) calyx and its by-product: Phenolic characterization by UPLC-QTOF MSE and their anti-obesity effect in vivo*. Food Research International 126: 108589.



- Angulo-López, J.E., A.C. Flores-Gallegos, J.A. Ascacio-Valdes, J.C. Contreras Esquivel, C. Torres-León, X. Rúelas-Chácon, C.N. Aguilar. 2022. *Antioxidant dietary fiber sourced from agroindustrial byproducts and its applications*. Foods 12(1): 159.
- Baigts-Allende, D.K., A. Pérez-Alva, J.C. Metri-Ojeda, C. Estrada-Beristain, M.A. Ramírez-Rodrigues, A. Arroyo-Silva M.M. Ramírez-Rodrigues. 2023. *Use of Hibiscus sabdariffa by-product to enhance the nutritional quality of pasta*. Waste and Biomass Valorization 14(4): 1267-1279.
- Banwo, K., A.O. Olojede, A.T. Adesulu-Dahunsi, D.K. Verma, M., Thakur, S. Tripathy, S. Singh, A.R. Patel, A.K. Gupta, C.N. Aguilar y G.L. Utama. 2021. *Functional importance of bioactive compounds of foods with potential health benefits: A review on recent trends*. Food Bioscience 43: 101320.
- Bermúdez, R., E. Rangel-Vargas, J.M. Lorenzo, J.A. Rodríguez, P.E. MuneKata, A. Teixeira, M. Pateiro, L. Romero, E.M. Santos. 2023. *Effect of partial meat replacement by Hibiscus sabdariffa by-product and Pleurotus djamor powder on the quality of beef patties*. Foods 12(2): 391.
- Cid-Ortega, S. y J.A. Guerrero-Beltrán. 2015. *Roselle calyces (Hibiscus sabdariffa), an alternative to the food and beverages industries: a review*. Journal of Food Science and Technology 52: 6859-6869.
- Esparza-Merino, R.M., M.E. Macías-Rodríguez, E. Cabrera-Díaz, A.J. Valencia-Botín y Y. Estrada-Girón. 2019. *Utilization of by-products of Hibiscus sabdariffa L. as alternative sources for the extraction of high-quality pectin*. Food Science and Biotechnology 28: 1003-1011.
- Salami, S. O. y A.J. Afolayan. 2020. *Suitability of Roselle-Hibiscus sabdariffa L. as raw material for soft drink production*. Journal of Food Quality 2020: 1-9.
- Salem, M.A., A. Zayed, M.E. Beshay, M.M. Abdel Mesih, R.F. Ben Khayal, F.A. George y S.M. Ezzat. 2022. *Hibiscus sabdariffa L.: phytoconstituents, nutritive, and pharmacological applications*. Advances in Traditional Medicine 22: 497-507.
- Saura-Calixto, F. 1998. *Antioxidant dietary fiber product: a new concept and a potential food ingredient*. Journal of Agricultural and Food Chemistry 46(10): 4303-4306.
- Sáyago-Ayerdi, S.G., C. Velázquez-López, E. Montalvo-González e I. Goñi. (2014). *By-product from decoction process of Hibiscus sabdariffa L. calyces as a source of polyphenols and dietary fiber*. Journal of the Science of Food and Agriculture, 94(5), 898-904.
- Serna Tenorio, J. E. 2023. *Efecto del subproducto de la decocción de jamaica (Hibiscus sabdariffa L.) sobre las alteraciones metabólicas en un modelo in vivo de diabetes mellitus tipo 2*. Maestría en Ciencias de la Nutrición Humana. Universidad Autónoma de Querétaro. México. 75 pp.
- Serna-Tenorio, J.E., A.M. Sotelo-González, R. Reynoso-Camacho, M.A. Anaya-Loyola, e I.F. Pérez-Ramírez. 2023. *Comprehensive characterization of the overlooked residue generated during roselle calyces brewing with potential use as functional ingredient*. Biotecnia 25(3): 208-220.

Cita

Regalado-Rentería E. y I.F. Pérez Ramírez. Mas allá de una bebida, revelando el valioso residuo del agua de jamaica. **Recursos Naturales y Sociedad, 2024. Vol. 10 (2): 107-117.** <https://doi.org/10.18846/renaysoc.2024.10.10.02.0009>

Sometido: 28 de mayo de 2024


Aceptado: 20 de septiembre de 2024

Editor asociado: Dra. Ana G. Reyes Alvarado

Editora ejecutiva: Dra. Crisalejandra Rivera Pérez

Diseño gráfico editorial: Lic. Gerardo Hernández

Foto portada: BackyardTaco_Taste-of-Jamaica_hibiscus-flowers; pexels-emma-bauso-1183828-3585812

An underwater photograph of a coral reef. In the foreground, there are large, healthy-looking coral structures with a pinkish-orange hue. In the middle ground, the reef appears to be eroded and covered in dark, greenish-brown algae or silt. In the background, a single yellow and white fish swims in the clear blue water. The overall scene illustrates the effects of ocean acidification on coral calcification.

La calcificación en los corales y los efectos de la acidificación de los océanos

Coral calcification and the
effects of ocean acidification.

Recursos Naturales y Sociedad, 2024. Vol. 10 (2): 119-132. <https://doi.org/10.18846/renaysoc.2024.10.10.02.0010>

Gema R. Cristóbal Mondragón¹, Angélica Méndez Reséndiz¹, Gisela E. Rangel Yescas¹, León D. Islas¹

¹Laboratorio de Biofísica Molecular de Canales Iónicos, Departamento de Fisiología, Facultad de Medicina, UNAM, Ciudad de México, CP 04510, México.



Resumen

Los corales escleractinios, conocidos como corales duros, son organismos marinos que poseen un exoesqueleto continuo de cristales de carbonato de calcio en forma de aragonita que les da soporte y protección. Algunas especies, llamadas hermatípicas, forman colonias que dan lugar a grandes estructuras tridimensionales conocidas como arrecifes coralinos, estos ecosistemas albergan una gran biodiversidad, dando refugio a una cuarta parte de las especies de peces e invertebrados marinos del planeta. Actualmente los arrecifes coralinos se encuentran en peligro debido a las actividades antropogénicas. El aumento de la temperatura del mar y la acidificación de los océanos, son factores que afectan directamente el esqueleto de carbonato de calcio, ya que estas interfieren en la capacidad de formación y regeneración de los arrecifes, causando cambios drásticos en la composición de las especies, lo que resulta en grandes pérdidas ecológicas y económicas. La comprensión de los mecanismos de formación del exoesqueleto de carbonato de calcio de los corales permitirá desarrollar nuevas estrategias para la conservación de los arrecifes coralinos y protección de la biodiversidad marina.

Palabras clave: corales, arrecifes coralinos, calcificación, carbonato de calcio, océano, acidificación.

Abstract

Scleractinian corals, also known as stony corals, are marine invertebrates with a continuous exoskeleton made of aragonite, a form of calcium carbonate that provides support and protection. Some species, known as hermatypic corals, build complex three-dimensional structures called coral reefs. These vibrant

ecosystems shelter a quarter of all marine fish and invertebrate species of the planet.

Unfortunately, anthropogenic activities causing rising ocean temperatures and acidification, directly impact the coral's calcium carbonate exoskeleton, hindering formation and regeneration of reefs. This disruption leads to a drastic loss in marine species diversity, ultimately resulting in ecological and economic losses. Understanding the mechanisms of formation of the coral calcium carbonate exoskeleton will contribute developing new strategies to preserve coral reefs and protect marine biodiversity.

Keywords: Coral reef, calcification, calcium carbonate, ocean, acidification.

¿Qué son los corales?

Uno de los ecosistemas más interesantes y complejos en el mundo son los llamados arrecifes coralinos. Estas son estructuras masivas que cubren menos del 1 % de la superficie de los océanos,

son hábitat de más del 25 % de especies marinas (Fisher et al., 2015). Los principales formadores de arrecifes coralinos son los corales escleractinios, constituidos por cientos de especies del orden Hexacorallia que son capaces de formar exoesqueletos masivos de carbonato de calcio (CaCO_3) en la forma cristalina de aragonita. Los corales son organismos coloniales que, a pesar de tener formas macroscópicas muy diversas, desde colonias masivas hasta colonias con ramificaciones muy delicadas (**Fig. 1**), poseen una anatomía común relativamente simple, conformada por pólipos individuales unidos entre sí por una extensión de tejido denominado cenosarco. Cada pólipo individual se asemeja a una medusa invertida, con su base anclada firmemente al exoesqueleto en porciones que tienen forma de copa, denominadas coralito. En el extremo superior, el pólipo posee una boca rodeada de tentáculos en números múltiplos de seis.

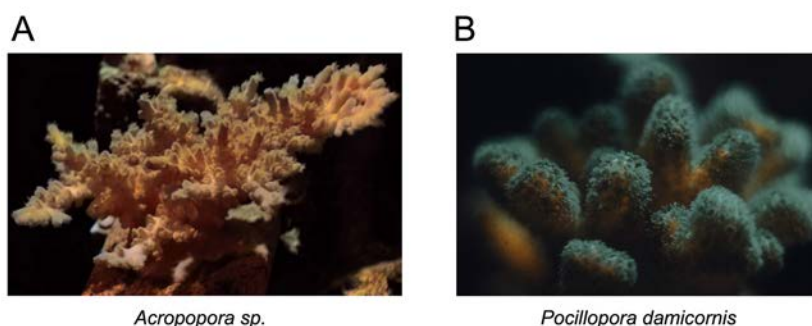


Figura 1. Fotografía de corales formadores de arrecifes. **A.** Colonia de *Acropora sp.* **B.** Colonia de *Pocillopora damicornis*. (Crédito: León Islas).

La boca provee acceso a una cavidad oral que tiene funciones digestivas (**Fig. 2**). Los pólipos y el cenosarco están constituidos por el tejido oral que interactúa con el agua de mar y por el tejido aboral que interactúa con el esqueleto. Ambos tejidos están compuestos por dos capas epiteliales, el endodermo y el ectodermo, separadas por tejido conectivo conocido como mesoglea, compuesto principalmente por colágeno. La región del ectodermo en contacto con el exoesqueleto es un

epitelio especializado en la calcificación y se denomina epitelio calicoblástico o calicoblasto (**Fig. 3**). Entre el calicoblasto y el esqueleto existe un compartimento extracelular llamado espacio subcalicoblasto, en este espacio se depositan los cristales de CaCO_3 que formarán el exoesqueleto del coral.

Los pólipos y el cenosarco contienen una cavidad interna llamada celenterón, el cual en el caso del pólipo se abre al agua de mar externa a través de la boca, esta cavidad separa al tejido oral y aboral. (**Fig. 3**) (Tresguerres et al., 2017). Las células del endodermo contienen algas endosimbióticas unicelulares de la familia Symbiodiniaceae, generalmente denominadas zooxantelas (**Fig. 3**). Estos endosimbiontes fotosintéticos primero son ingeridos y después retenidos en el interior de las células por mecanismos que aún no se entienden del todo. Los productos de la fotosíntesis generados por los endosimbiontes representan



la mayor fuente de energía para el hospedero. En condiciones de temperaturas elevadas, mayores a $\sim 27^\circ\text{C}$, las interacciones de la endosimbiosis se ven alteradas y el hospedero expulsa a los endosimbiontes.

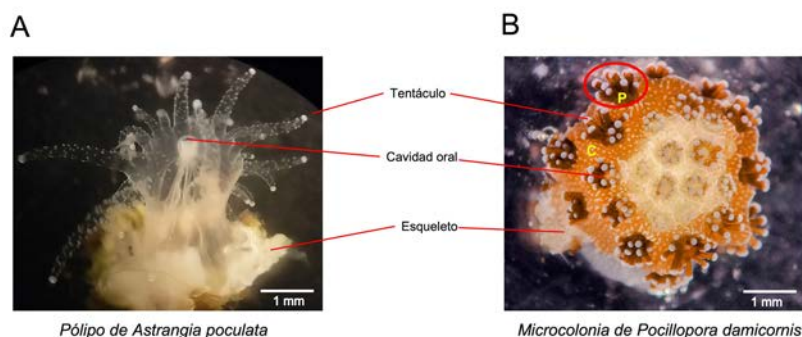


Figura 2. Anatomía macroscópica de los pólipos de corales. **A.** Pólipo aislado del coral *Astrangia poculata*. **B.** Fotografía de una microcolonia del coral *Pocillopora damicornis* cultivada en nuestro laboratorio durante 2 meses. Alrededor del esqueleto se observa el crecimiento de diferentes pólipos. Un pólipo individual se marca con un círculo y se indica con la letra P, mientras que el cenosarco se indica con una C (Crédito: Gema Cristóbal).

Esta condición es conocida como blanqueamiento y si las temperaturas elevadas persisten, llevan a la muerte de todo el coral (Lesser, 2011).

Otro factor que afecta a los corales es la acidificación del agua de mar causada por los altos niveles de CO_2 atmosférico. Esta acidificación causa efectos negativos en los organismos marinos que calcifican, como los corales, inhibiendo el crecimiento y la formación del esqueleto (Doney et al., 2009).

El mecanismo de la calcificación de los corales

Como resultado de la reproducción sexual, muchas especies de corales producen larvas. Cuando una larva se asienta en algún sustrato en el arrecife, se diferencia y forma un coral juvenil. Las células del calicoblasto aparecen en pocas horas o días y el coral juvenil empieza a depositar CaCO_3 (Drake et al., 2020).

Este proceso de deposición es esencial para la formación del esqueleto de CaCO_3 del coral y proporcionará soporte y protección al organismo. El proceso de calcificación está estrictamente

ligado al transporte de iones contenidos en el agua de mar al sitio de precipitación del CaCO_3 . Se han propuesto dos vías principales para el tránsito de iones necesarios para la formación del esqueleto: el transporte paracelular, en el que las moléculas y los iones que provienen del agua de mar se desplazan entre las células y el transporte transcelular, en el que atraviesan las células, ayudados por moléculas transportadoras especializadas.

Actualmente el proceso de transporte transcelular es del que se ha recabado mayor evidencia genética y fisiológica, y su comprensión a nivel molecular se encuentra en investigación activa (Drake et al., 2021; Levy et al., 2021). En este proceso se ha propuesto la participación de proteínas de membrana transportadoras que suministran y controlan la composición del medio calcificante en el espacio subcalicoblástico (**Fig. 4**).

A grandes rasgos, las proteínas de transporte de membrana se dividen en

canales iónicos, los cuales contienen un poro por el que se mueven las moléculas a transportar por difusión simple y transportadores y bombas, que no contienen un poro y mueven las moléculas transportadas utilizando energía. En la calcificación en los corales se han identificado transportadores del ion bicarbonato (HCO_3^-) proveniente del agua de mar al sitio de calcificación, ATPasas de Ca^{2+} membranales (PMCA), las cuales participan en la entrada de Ca^{2+} a cambio de la eliminación de protones (H^+) del espacio subcalicoblástico (Wang et al., 2021; Zoccola et al., 2004) y canales de calcio regulados por voltaje (VGCC), que promueven la entrada de calcio en las células calicoblásticas (Zoccola et al., 1999). Los factores fisicoquímicos que permiten la formación de aragonita son una alta concentración de calcio (Ca^{2+}), carbonatos, bicarbonato y especialmente, un pH elevado, es decir, una baja concentración de

iones de hidrógeno (H^+). El agua de mar tiene generalmente un pH alcalino entre 8-8.3 que no permite la precipitación espontánea de CaCO_3 . En cambio, el calicoblasto se encuentra en contacto con un volumen muy pequeño de solución entre él y el esqueleto, lo que le permite manipular su composición iónica de manera controlada. Así, las células del calicoblasto retiran H^+ del fluido calicoblástico, logrando elevar el pH hasta un valor cercano a 9. En estas condiciones, si la concentración de Ca^{2+} y carbonatos es elevada, se puede favorecer la precipitación de CaCO_3 (Fig. 4). A pesar de que la reacción de formación de CaCO_3 es espontánea, se ha descubierto que es necesaria la presencia de centros de nucleación para la formación de los primeros cristales de CaCO_3 que actúan como catalizadores de su precipitación. Recientemente se ha descrito que el calicoblasto secreta proteínas hacia el fluido calicoblástico, que se denominan galaxinas y proteínas ácidas de coral (CARPs), alrededor de las cuales se precipitan nano cristales de CaCO_3 y que presentan una superficie sobre la cual se inicia la calcificación (Allemand et al., 2011; Gavriel et al., 2018) (Fig. 4).

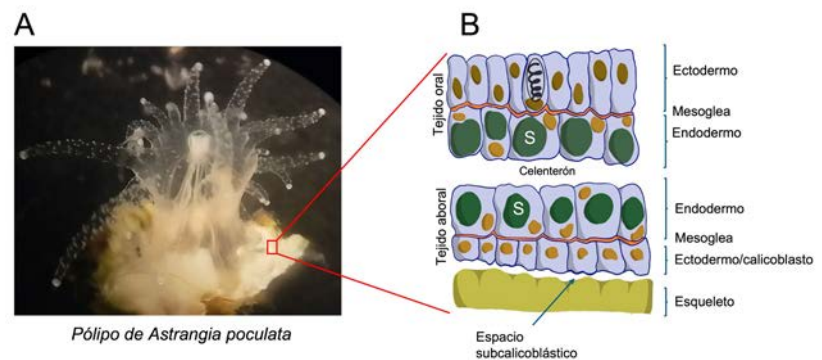


Figura 3. Anatomía de los tejidos de un pólipo individual. **A.** Fotografía de un pólipo individual de *Astrangia poculata*. **B.** Diagrama de la estructura transversal del tejido del pólipo de un coral. Se conforma de dos tipos de tejidos, el tejido oral que está en contacto con el agua y el aboral que está en contacto con el esqueleto. Cada tejido está compuesto de dos capas de células epiteliales, el ectodermo y el endodermo. Estas capas están separadas por tejido conectivo llamado mesoglea, indicado en naranja en la figura. La cavidad delimitada por el ectodermo oral es llamada celenterón y la interfaz entre el ectodermo aboral (epitelio calicoblástico) y el esqueleto es el espacio subcalicoblástico. En verde se ilustran los endosimbiontes, marcados con una S y los núcleos celulares en marrón. En el ectodermo existen células urticantes llamadas cnidocitos, marcadas con una C en la figura (Créditos: Fotografía, Gema Cristóbal; ilustración, Maia Islas).

Nuevas pistas sobre la calcificación de los corales

A lo largo de los años, se ha descubierto que las células calicoblásticas controlan de manera activa el transporte de iones. Esto permite modificar la composición iónica del espacio subcalicoblastico que rodea a los corales, un paso clave en la formación de sus esqueletos (Allemand et al., 2004).

Investigaciones más recientes, utilizando herramientas avanzadas como la genómica y transcriptómica (que estudian las secuencias del ADN y el ARN de los organismos), han revelado nuevos mecanismos que contribuyen al proceso de calcificación.

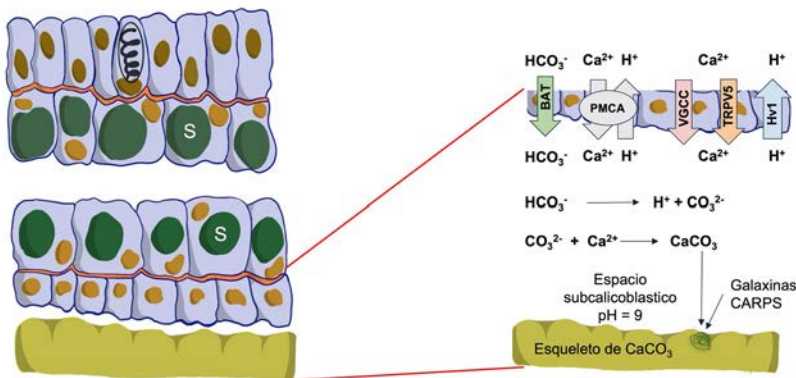


Figura 4. Esquema del mecanismo de calcificación en el compartimento subcalicoblástico. En el proceso de calcificación participan proteínas que controlan la composición de iones en el compartimento subcalicoblástico como por ejemplo los transportadores del anión bicarbonato (BAT), canales de Ca^{2+} regulados por voltaje (VGCC), el receptor de potencial transitorio de tipo vaniloide 5 (TRPV5), ATPasas de Ca^{2+} tipo P que permiten la entrada de Ca^{2+} en intercambio por H^+ y el canal de H^+ activado por voltaje (Hv1). También se indican proteínas que participan en la precipitación del $CaCO_3$ como las galaxias y proteínas ácidas de coral (CARPs, por sus siglas en inglés). Dentro del espacio subcalicoblástico el bicarbonato se disocia en H^+ y el ión carbonato (CO_3^{2-}). El CO_3^{2-} y el Ca^{2+} forman el $CaCO_3$ que luego será precipitado en cristales en forma de aragonita para formar el exoesqueleto del coral.

Uno de los parámetros más importantes en los que se ha centrado la investigación actual, es el papel que tiene el pH en la fisiología que impulsa la calcificación. Recientemente se identificó la presencia de transportadores de amonio (NH_4^+) en el coral *Tubastraea spp.*, y en las células calicoblásticas del coral *Stylophora pistillata*, los cuales tienen la función de amortiguar el

exceso de H^+ producidos por las reacciones químicas en el sitio de calcificación (Capasso et al., 2022). Otro hallazgo reciente identificó en el coral *Acropora yongei* una proteína conocida como ayRhp1, la cual favorece la simbiosis entre el coral y las algas a través de la difusión de NH_3 (amoníaco) y CO_2 , y que, al expresarse en la membrana adyacente al exoesqueleto del coral, permite la neutralización de H^+ y la difusión de CO_2 hacia el medio calcificante. Estos hallazgos aportan nuevos conocimientos para comprender más a fondo los mecanismos que favorecen la alcalinización del espacio subcalicoblástico (Thies et al., 2022).

Otro componente importante para la calcificación es el transporte de bicarbonato (HCO_3^-), el cual proviene inicialmente del CO_2 del agua de mar y de la fotosíntesis de las zooxantelas. El CO_2 disuelto forma ácido carbónico, el cual es convertido en HCO_3^- . En el interior celular, el CO_2 es convertido a

HCO₃⁻ a través de una serie de reacciones catalizadas enzimáticamente. Actualmente se han identificado proteínas conocidas como transportadores de bicarbonato (BAT, por sus siglas en inglés) en diferentes especies de corales escleractinios y a partir del uso de técnicas de edición genética sabemos que su función es indispensable para la deposición de CaCO₃ en el esqueleto de los corales (Tinoco et al., 2023).

Por otro lado, investigaciones recientes determinaron a partir de ensayos de genómica y transcriptómica en el coral *Stylophora pistillata* la participación de un transportador que intercambia sodio por protones (Na⁺/H⁺) (SLC9A1) y canales de H⁺ dependientes de voltaje (HvCN), los cuales estarían implicados en la salida de H⁺ del epitelio basal hacia la mesoglea (Capasso et al., 2021). Para entender más a fondo la participación fisiológica que desempeñan los

canales de H⁺ dependientes de voltaje, nuestro grupo de trabajo identificó por primera vez el canal iónico H_v1 del coral *Acropora millepora* y a través de ensayos electrofisiológicos determinamos que su activación es regulada por cambios en el gradiente de H⁺ (se activa cuando hay mayor concentración de H⁺ en el interior que en el exterior de las células) y que presenta una activación más rápida comparada con el canal H_v1 de mamíferos. Estas propiedades biofísicas le permitirían favorecer la salida de H⁺ de las células calicoblásticas y regular el pH intracelular (**Fig. 4**) (Rangel-Yescas et al., 2021).

También en nuestro laboratorio, nos enfocamos en estudiar la participación del canal denominado TRPV5, perteneciente a la familia de canales de potencial transitorio, en la regulación de Ca²⁺ intracelular en el coral del Pacífico mexicano, *Pocillopora damicornis*. A través de ensayos electrofisiológicos, identificamos que el canal TRPV5 de este coral permite el flujo de Ca²⁺ de forma más eficaz en comparación con el canal de mamíferos, lo cual sugiere que podría participar en el suministro de Ca²⁺ a través de la membrana del epitelio calicoblástico (**Fig. 4**). Adicionalmente, identificamos que esta proteína es sensible al mentol, mecanismo que podría estar implicado en el blanqueamiento del coral a través de la expulsión de los simbiontes por el bloqueo en el transporte de Ca²⁺ (Wang et al., 2012).

El estudio de los procesos de transporte para la regulación del equilibrio iónico a nivel intra y extracelular nos permitirá evaluar como la fisiología de estos organismos se adapta al estrés del medio ambiente. A la fecha, ensayos de secuenciación de ADN masiva han permitido identificar de forma más rápida algunos elementos clave de la maquinaria biológica relacionada con la calcificación y se empiezan a utilizar aproximaciones experimentales de fisiología molecular para delinear la participación de proteínas específicas (Drake et al., 2014).



Efectos de la acidificación y del incremento de la temperatura del mar sobre la calcificación

Como hemos visto, la fisiología de los corales, y de manera particular el proceso de calcificación, están regulados por factores ambientales como la temperatura y el nivel de pH de los océanos. Cada especie de coral tiene una temperatura óptima para calcificar, de manera general rondan entre los 22-26 °C. Las temperaturas fuera de este rango pueden afectar negativamente la tasa de calcificación (Jia et al., 2024). Por encima de los 27 °C aproximadamente, las tasas de calcificación pueden disminuir debido al estrés térmico. El aumento de la temperatura puede llevar al fenómeno del blanqueamiento, el cual no significa la muerte inmediata del coral, pero sí debilita su salud y lo puede llevar a la muerte si el estrés persiste. La pérdida de los endosimbiontes afecta la capacidad de los corales para obtener nutrientes a través de la fotosíntesis y puede resultar en una disminución de la tasa de calcificación (Roth et al., 2021). Lo anterior puede conducir a cambios en la morfología del esqueleto, alterando la densidad y el espesor del carbonato de calcio depositado, lo que afecta la resistencia y la integridad estructural del esqueleto coralino (Gori et al., 2016).

Sumado a lo anterior, la reproducción de los corales, particularmente la reproducción sexual, está estrechamente ligada a los cambios estacionales en la temperatura del agua y otros factores ambientales. Es importante mencionar que muchos corales liberan sus gametos (óvulos y espermatozoides) en respuesta a señales ambientales específicas, como cambios en la temperatura, la luz y la fase lunar. Esto a menudo ocurre durante eventos de desove masivo, donde los corales desovan al agua simultáneamente para aumentar las posibilidades de fertilización cruzada. Por lo anterior, no es de extrañar que las temperaturas del agua fuera de los rangos óptimos pueden afectar

negativamente la reproducción de los corales, ya que interfieren con la producción y liberación de gametos, lo que afecta la capacidad de los corales para reproducirse con éxito (Rossin et al., 2019). Todos estos eventos negativos tienen implicaciones importantes para la resiliencia a largo plazo de los arrecifes de coral frente al cambio climático y otros factores de estrés.

Otro de los factores ambientales que afectan el proceso de calcificación es el pH. Los corales suelen habitar en aguas con un pH que oscila entre 8 y 8.3, pero son sensibles a los cambios en el pH del agua, ya que pueden afectar su capacidad para construir esqueletos de carbonato de calcio y crecer de manera saludable (Chille et al., 2022; Foster et al., 2016; Marchini et al., 2021). La acidificación de los océanos debida al aumento de CO₂ en la atmósfera, representa una amenaza significativa para la salud y la supervivencia de los arrecifes de coral en todo el mundo

(Edmunds y Burgess, 2020). La acidificación de los océanos conduce a una disminución en la disponibilidad de iones de carbonato (CO_3^{2-}), los cuales como ya mencionamos, son esenciales para la formación de carbonato de calcio. Los corales utilizan estos iones para construir sus esqueletos, y una disminución en la disponibilidad de carbonato afecta negativamente la tasa de calcificación (**Fig. 5**). La acidificación del agua de mar también puede hacer que sea más difícil para los corales secretar y mantener sus esqueletos de carbonato de calcio (Manullang et al., 2020). Los iones de hidrógeno adicionales en el agua, producto de la disociación del ácido carbónico, pueden disminuir la velocidad de formación de iones de carbonato en el espacio calcoblástico, dificultando el proceso de calcificación. Otra de las alteraciones que se han observado es que, los corales bajo condiciones de acidificación a menudo tienen

esqueletos más delgados y menos densos, lo que puede afectar la protección que les brinda la resistencia e integridad estructural de los arrecifes de coral (Hoegh-Guldberg et al., 2011; Manullang et al., 2023).

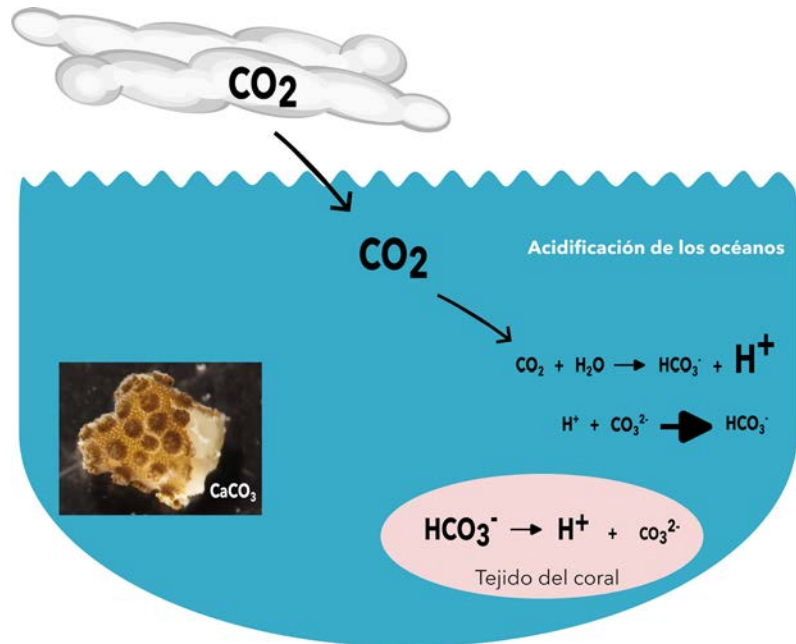


Figura 5. La acidificación de los océanos amenaza la supervivencia de los corales. El océano absorbe el CO_2 y este reacciona con el agua para formar iones bicarbonato (HCO_3^-) y un exceso de protones (H^+) que compiten por el ion carbonato (CO_3^{2-}) haciendo que disminuya su disponibilidad para formar el esqueleto de CaCO_3 y a la vez se produce más HCO_3^- . Los iones H^+ adicionales acidifican el agua, debilitando aún más los corales. En el lado izquierdo se observa el fragmento de *P. damicornis* con el esqueleto dañado. (Créditos: fotografía, Gema Cristóbal; ilustración, Maru Orozco).

Consideraciones finales y perspectivas

Al igual que los árboles en los bosques, los arrecifes coralinos son fundamentales para el ecosistema marino. Las grandes colonias que forman estos organismos son el hábitat para una gran diversidad de animales marinos y, además son productores primarios de nutrientes esenciales para la vida en el océano. Sin embargo, el cambio climático es una realidad que se hace cada vez más evidente. Entre sus efectos más preocupantes se encuentran el aumento de la temperatura y la acidificación del



océano. Estos factores están impactando gravemente a los corales, particularmente en la formación del esqueleto calcáreo, lo que pone en riesgo su supervivencia. Si no se toman medidas urgentes para reducir las emisiones de gases como el CO₂, las consecuencias no solo afectarán la vida de estos maravillosos animales, sino a todo el ecosistema marino que depende de ellos.

Nuestro conocimiento sobre la función de diversos genes y sus proteínas en la calcificación de los corales y de cómo estos responden a los efectos del cambio climático aún es limitado. Sin embargo, al comprender los mecanismos básicos de la biología del coral, especialmente el mecanismo de calcificación, podríamos predecir cómo estos organismos responderán a los cambios ambientales y proponer nuevas soluciones (Vidal-Dupiol y Mitta, 2011). El estudio de los corales en el laboratorio representa un gran desafío, ya que las herramientas metodológicas tradicionales no están diseñadas para organismos no modelo. Actualmente, se están adaptando herramientas de investigaciones biofísica y biomédica para estudiar la función de los genes en los corales (Cleves et al., 2020). Esto nos ofrece la posibilidad de comprender cómo el cambio climático impacta a los corales y de identificar potenciales repercusiones en la salud humana. Es fundamental invertir en investigación y desarrollar estrategias de conservación efectivas para proteger a los corales.

La salud de estos organismos está íntimamente relacionada con la salud de los océanos y por consecuencia, a la salud de nuestro planeta.

Agradecimientos

Este trabajo fue realizado gracias a una beca del Programa de Becas Posdoctorales en la UNAM (POSDOC) para Gema Cristóbal Mondragón, un Donativo CONAHCYT Ciencia de Frontera No. 513 y un donativo del Programa de Apoyo a Proyectos de Investigación e Innovación Tecnología-DGAPA-UNAM No. IN201824 para León D. Islas.

Bibliografía

- Allemand, D., C. Ferrier-Pagès, P. Furla, F. Houlbrèque, S. Puverel, S. Reynaud, É. Tambutté, S. Tambutté, y D. Zoccola. 2004. Biomineralisation in reef-building corals: from molecular mechanisms to environmental control. *Comptes Rendus Palevol*. 3:453–467. doi:10.1016/j.crpv.2004.07.011.
- Allemand, D., É. Tambutté, D. Zoccola, y S. Tambutté. 2011. Coral Calcification, Cells to Reefs. *In Coral Reefs: An Ecosystem in Transition*. Z. Dubinsky and N. Stambler, editors. Springer Netherlands, Dordrecht. 119–150.

- Capasso, L., P. Ganot, V. Planas-Bielsa, S. Tambutté, y D. Zoccola. 2021. Intracellular pH regulation: characterization and functional investigation of H⁺ transporters in *Stylophora pistillata*. *BMC Mol. Cell Biol.* 22:18. doi:10.1186/s12860-021-00353-x.
- Capasso, L., D. Zoccola, P. Ganot, M. Aranda, y S. Tambutté. 2022. SpiAMT1d: molecular characterization, localization, and potential role in coral calcification of an ammonium transporter in *Stylophora pistillata*. *Coral Reefs.* 41:1187–1198. doi:10.1007/s00338-022-02256-5.
- Chille, E.E., E.L. Strand, F. Scucchia, M. Neder, V. Schmidt, M.O. Sherman, T. Mass, y H.M. Putnam. 2022. Energetics, but not development, is impacted in coral embryos exposed to ocean acidification. *J. Exp. Biol.* 225:jeb243187. doi:10.1242/jeb.243187.
- Cleves, P.A., A.I. Tinoco, J. Bradford, D. Perrin, L.K. Bay, y J.R. Pringle. 2020. Reduced thermal tolerance in a coral carrying CRISPR-induced mutations in the gene for a heat-shock transcription factor. *Proc. Natl. Acad. Sci.* 117:28899–28905. doi:10.1073/pnas.1920779117.
- Drake, J.L., T. Mass, y P.G. Falkowski. 2014. The evolution and future of carbonate precipitation in marine invertebrates: Witnessing extinction or documenting resilience in the Anthropocene? *Elem. Sci. Anthr.* 2:000026. doi:10.12952/journal.elementa.000026.
- Drake, J.L., T. Mass, J. Stolarski, S. Von Euw, B. van de Schootbrugge, y P.G. Falkowski. 2020. How corals made rocks through the ages. *Glob. Change Biol.* 26:31–53. doi:10.1111/gcb.14912.
- Drake, J.L., N. Varsano, y T. Mass. 2021. Genetic basis of stony coral biomineralization: History, trends and future prospects. *J. Struct. Biol.* 213:107782. doi:10.1016/j.jsb.2021.107782.
- Doney, S. C., Fabry, V. J., Feely, R. A., & Kleypas, J. A. 2009. Ocean acidification: the other CO₂ problem. *Annual review of marine science*, 1(1), 169-192.
- Edmunds, P.J., y S.C. Burgess. 2020. Emergent properties of branching morphologies modulate the sensitivity of coral calcification to high P CO₂. *J. Exp. Biol.* jeb.217000. doi:10.1242/jeb.217000.
- Fisher, R., R.A. O'Leary, S. Low-Choy, K. Mengersen, N. Knowlton, R.E. Brainard, y M.J. Caley. 2015. Species Richness on Coral Reefs and the Pursuit of Convergent Global Estimates. *Curr. Biol.* 25:500–505. doi:10.1016/j.cub.2014.12.022.
- Foster, T., J.L. Falter, M.T. McCulloch, y P.L. Clode. 2016. Ocean acidification causes structural deformities in juvenile coral skeletons. *Sci. Adv.* 2:e1501130. doi:10.1126/sciadv.1501130.
- Gavriel, R., M. Nadav-Tsubery, Y. Glick, A. Yarmolenko, R. Kofman, K. Keinan-Adamsky, A. Berman, T. Mass, y G. Goobes. 2018. The Coral Protein CARP3 Acts from a Disordered Mineral Surface Film to Divert Aragonite Crystallization in Favor of Mg-Calcite. *Adv. Funct. Mater.* 28:1707321. doi:10.1002/adfm.201707321.



- Gori, A., C. Ferrier-Pagès, S.J. Hennige, F. Murray, C. Rottier, L.C. Wicks, y J.M. Roberts. 2016. Physiological response of the cold-water coral *Desmophyllum dianthus* to thermal stress and ocean acidification. *PeerJ*. 4:e1606. doi:10.7717/peerj.1606.
- Hoegh-Guldberg, O., S. Andréfouët, K.E. Fabricius, G. Diaz-Pulido, J.M. Lough, P.A. Marshall, y M.S. Pratchett. 2011. Vulnerability of coral reefs in the tropical Pacific to climate change.
- Jia, S., X. Geng, Z. Cai, Y. Wang, J. Shen, Y. Li, Z. Wu, S. Chen, y D. Wang. 2024. Comparison of physiological and transcriptome responses of corals to strong light and high temperature. *Ecotoxicol. Environ. Saf.* 273:116143. doi:10.1016/j.ecoenv.2024.116143.
- Lesser, M.P. 2011. Coral Bleaching: Causes y Mechanisms. In *Coral Reefs: An Ecosystem in Transition*. Z. Dubinsky and N. Stambler, editors. Springer Netherlands, Dordrecht. 405–419.
- Levy, S., A. Elek, X. Grau-Bové, S. Menéndez-Bravo, M. Iglesias, A. Tanay, T. Mass, y A. Sebé-Pedrós. 2021. A stony coral cell atlas illuminates the molecular and cellular basis of coral symbiosis, calcification, and immunity. *Cell*. 184:2973–2987.e18. doi:10.1016/j.cell.2021.04.005.
- Manullang, C., I.H. Millyaningrum, A. Iguchi, A. Miyagi, Y. Tanaka, Y. Nojiri, y K. Sakai. 2020. Responses of branching reef corals *Acropora digitifera* and *Montipora digitata* to elevated temperature and pCO₂. *PeerJ*. 8:e10562. doi:10.7717/peerj.10562.
- Manullang, C., T. Singh, K. Sakai, A. Miyagi, A. Iwasaki, Y. Nojiri, y A. Iguchi. 2023. Separate and combined effects of elevated pCO₂ and temperature on the branching reef corals *Acropora digitifera* and *Montipora digitata*. *Mar. Environ. Res.* 188:106030. doi:10.1016/j.marenvres.2023.106030.
- Marchini, C., F. Gizzi, T. Pondrelli, L. Moreddu, L. Marisaldi, F. Montori, V. Lazzari, V. Airi, E. Caroselli, F. Prada, G. Falini, Z. Dubinsky, y S. Goffredo. 2021. Decreasing pH impairs sexual reproduction in a Mediterranean coral transplanted at a CO₂ vent. *Limnol. Oceanogr.* 66:3990–4000. doi:10.1002/lno.11937.
- Rangel-Yescas, G., C. Cervantes, M.A. Cervantes-Rocha, E. Suárez-Delgado, A.T. Banaszak, E. Maldonado, I.S. Ramsey, T. Rosenbaum, y L.D. Islas. 2021. Discovery and characterization of Hv1-type proton channels in reef-building corals. *eLife*. 10:e69248. doi:10.7554/eLife.69248.
- Rossin, A.M., R.G. Waller, y R.P. Stone. 2019. The effects of in-vitro pH decrease on the gametogenesis of the red tree coral, *Primnoa pacifica*. *PLOS ONE*. 14:e0203976. doi:10.1371/journal.pone.0203976.

- Roth, F., N. RAecker, S. Carvalho, C.M. Duarte, V. Saderne, A. Anton, L. Silva, M.LL. Calleja, X.A.G. Morán, C.R. Voolstra, B. Kürten, B.H. Jones, y C. Wild. 2021. High summer temperatures amplify functional differences between coral-and algae-dominated reef communities. *Ecology*. 102:e03226. doi:10.1002/ecy.3226.
- Thies, A.B., A.R. Quijada-Rodriguez, H. Zhouyao, D. Weihrauch, y M. Tresguerres. 2022. A Rhesus channel in the coral symbiosome membrane suggests a novel mechanism to regulate NH₃ and CO₂ delivery to algal symbionts. *Sci. Adv.* 8:eabm0303. doi:10.1126/sciadv.abm0303.
- Tinoco, A.I., L.M.Y. Mitchison-Field, J. Bradford, C. Renicke, D. Perrin, L.K. Bay, J.R. Pringle, y P.A. Cleves. 2023. Role of the bicarbonate transporter SLC4γ in stony-coral skeleton formation and evolution. *Proc. Natl. Acad. Sci.* 120:e2216144120. doi:10.1073/pnas.2216144120.
- Tresguerres, M., K.L. Barott, M.E. Barron, D.D. Deheyn, D.I. Kline, y L.B. Linsmayer. 2017. Cell Biology of Reef-Building Corals: Ion Transport, Acid/Base Regulation, and Energy Metabolism. *In Acid-Base Balance and Nitrogen Excretion in Invertebrates*. D. Weihrauch and M. O'Donnell, editors. Springer International Publishing, Cham. 193–218.
- Vidal-Dupiol, J., y G. Mitta. 2011. Environmental stress in the scleractinian coral *Pocillopora damicornis*: from the experimental model to the identification of functional biomarkers of stress, Stress environnementaux chez le corail scléactiniaire *Pocillopora damicornis* : du modèle expérimental à l'identification de marqueurs fonctionnels du stress. Ecole pratique des hautes études - EPHE PARIS.
- Wang, J.-T., Y.-Y. Chen, K.S. Tew, P.-J. Meng, y C.A. Chen. 2012. Physiological and Biochemical Performances of Menthol-Induced Aposymbiotic Corals. *PLoS ONE*. 7:e46406. doi:10.1371/journal.pone.0046406.
- Wang, X., D. Zoccola, Y.J. Liew, E. Tambutte, G. Cui, D. Allemand, S. Tambutte, y M. Aranda. 2021. The Evolution of Calcification in Reef-Building Corals. *Mol. Biol. Evol.* 38:3543–3555. doi:10.1093/molbev/msab103.
- Zoccola, D., E. Tambutté, E. Kulhanek, S. Puverel, J.-C. Scimeca, D. Allemand, y S. Tambutté. 2004. Molecular cloning and localization of a PMCA P-type calcium ATPase from the coral *Stylophora pistillata*. *Biochim. Biophys. Acta BBA - Biomembr.* 1663:117–126. doi:10.1016/j.bbamem.2004.02.010.
- Zoccola, D., E. Tambutté, F. Sénégas-Balas, J.-F. Michiels, J.-P. Failla, J. Jaubert, y D. Allemand. 1999. Cloning of a calcium channel α1 subunit from the reef-building coral, *Stylophora pistillata*. *Gene*. 227:157–167. doi:10.1016/S0378-1119(98)00602-7.



Cita

Cristóbal Mondragón, G.R., A. Méndez Reséndiz, G.E. Rangel Yescas, L.D. Islas. La calcificación en los corales y los efectos de la acidificación de los océanos. **Recursos Naturales y Sociedad**, 2024. **Vol. 10 (2): 119-132**. <https://doi.org/10.18846/renaysoc.2024.10.10.02.0010>

Sometido: 15 de abril de 2024

Aceptado: 25 de septiembre de 2024

Editor asociado: Dr. Arturo Sánchez Paz

Editor ejecutivo: Dr. Arturo Sánchez Paz

Diseño gráfico editorial: Lic. Gerardo Hernández

Foto de portada: pexels-francesco-ungaro-18229777.jpg