



Biotechnológica[®] Magazine

La biotecnología al rescate del medio ambiente en México

*Lourdes Vital López, Manuel de Jesús Valenzuela Gurrola,
Mayra Judith García Robles**

Hongos filamentosos: arquitectos de los ecosistemas

*Rosario Yadira Avalos Barajas, Santos Zepeda Guzman,
David Gamaliel Valdivia Avalos, Gamaliel Valdivia
Rojas**

FILOSOFANDO

El calamar y la bacteria que cosechan luz de la luna

Arturo Sánchez Paz



BIOTECNOLÓGICA MAGAZINE® año 2026, Vol. 4, No. 4, julio-agosto, es una publicación de divulgación, bimestral, editada por: Dra. Norma Y. Hernández Saavedra. <http://biotmagazine.com>, biotecnologicamagazine@gmail.com. Blvd. Constituyentes 1975, L19 MzB 165, Fracc. Campestre, La Paz, Baja California Sur, C.P. 23090, México. Tel. (612) 12 40674. Reservas de Derechos al Uso Exclusivo: 04-2024-022911435400-102, ISSN: 2992-863X; ambos otorgados por el Instituto Nacional del Derecho de Autor. El contenido de los artículos y comunicaciones es responsabilidad exclusiva de los autores y no refleja de manera alguna el punto de vista del Editor ni del Consejo Editorial Fundador. Queda prohibida la reproducción total o parcial del contenido por cualquier medio sin la autorización expresa del Consejo Editorial Fundador.

Crédito Fotografía Portada: generada por IA.

Edición gráfica editorial y página web: Dra. Crisalejandra Rivera Pérez.

ORGANISMO RESPONSABLE

Biotechnológica Magazine

Editores en Jefe

Dra. Norma Y. Hernández Saavedra
Dr. Felipe Ascencio Valle

Consejo Editorial Fundador

Dra. Norma Y. Hernández Saavedra
Dr. Felipe Ascencio Valle
Dra. Crisalejandra Rivera Pérez

Editora Ejecutiva

Dra. Crisalejandra Rivera Pérez

Revista digital de divulgación científica.

Biotechnológica Magazine es la revista en línea de divulgación biotecnológica dirigida a empresas, investigadores, estudiantes y a todos los que sientan curiosidad por esta innovadora área científica y tecnológica.

Biotechnológica Magazine publica artículos en el campo de la biotecnología y ciencias afines. Publica editoriales (mensaje de el o los editores), artículos, notas cortas, fotografías, infografías, y noticias de actualidad en áreas gubernamentales, académicas, empresariales e investigaciones destacadas en el campo de la biotecnología, ciencias biológicas, ciencias de la vida, y ciencias ambientales, acuícolas, agropecuarias, veterinarias y ciencias médicas y biofarmacéuticas.

Índice

1

LA BIOTECNOLOGÍA AL RESCATE DEL MEDIO AMBIENTE EN MÉXICO

*Lourdes Vital López, Manuel de Jesús Valenzuela Gurrola, Mayra Judith García Robles**

10

CROSSFIT Y BIOTECNOLOGÍA: EL CUERPO HUMANO COMO LABORATORIO DEL RENDIMIENTO

*Jesús Corral García, Martha Judith Valdez Ortega, Diego Carlos Bouttier Figueroa**

17

VALORIZACIÓN DE LAS CONCHAS DE MOLUSCOS

*Crisalejandra Rivera-Pérez**

30

CARBOHIDRATOS: MÁS QUE ENERGÍA PARA LAS PLANTAS

*Amanda Ortiz Calderon, Ernesto García Pineda**



37

DEL DESECHO A LA SOLUCIÓN: CÓMO EL MANEJO ADECUADO DE LAS AGUAS RESIDUALES PUEDEN AYUDAR FRENTE AL CAMBIO CLIMÁTICO

Norma Y. Hernández Saavedra

46

HONGOS FILAMENTOSOS: ARQUITECTOS DE LOS ECOSISTEMAS

*Rosario Yadira Avalos Barajas, Santos Zepeda Guzman, David
Gamaliel Valdivia Avalos, Gamaliel Valdivia Rojas**

54

EL CALAMAR Y LA BACTERIA QUE COSECHAN LUZ DE LA LUNA

Arturo Sánchez Paz

59

TAURINA

Marco Antonio Hernández de Dios*, Yvonne Caro Martínez,
Minerva Concepción Maldonado García



Notas del Editor

La biotecnología nos ofrece nuevas formas de comprender la vida, pero también herramientas para responder a algunos de los grandes desafíos de nuestro tiempo. En este nuevo número de Biotecnológica Magazine reunimos artículos que muestran su presencia en ámbitos tan diversos como la protección ambiental, la actividad física, la nutrición, la agricultura y el aprovechamiento sostenible de los recursos naturales.

Iniciamos con “La biotecnología al rescate del medio ambiente en México”, un recorrido por las alternativas biotecnológicas que contribuyen a enfrentar problemas ambientales y a construir soluciones más sostenibles. Esta perspectiva se complementa con “Del desecho a la solución: cómo el manejo adecuado de las aguas residuales puede ayudar frente al cambio climático”, que nos invita a reconsiderar las aguas

La biotecnología nos ofrece nuevas formas de comprender la vida, pero también herramientas para responder a algunos de los grandes desafíos de nuestro tiempo. En este nuevo número de Biotecnológica Magazine reunimos artículos que muestran su presencia en ámbitos tan diversos como la protección ambiental, la actividad física, la nutrición, la agricultura y el aprovechamiento sostenible de los recursos naturales.

Iniciamos con “La biotecnología al rescate del medio ambiente en México”, un recorrido por las alternativas biotecnológicas que contribuyen a enfrentar problemas ambientales y a construir soluciones más sostenibles. Esta perspectiva se complementa con “Del desecho a la solución: cómo el manejo adecuado de las aguas residuales puede ayudar frente al cambio climático”, que nos invita a reconsiderar las aguas residuales no solo como un problema, sino como una fuente de recursos y oportunidades.

La economía circular también está presente en “Valorización de las conchas de moluscos”, donde se exploran distintos usos para estos residuos y su potencial en sectores como la



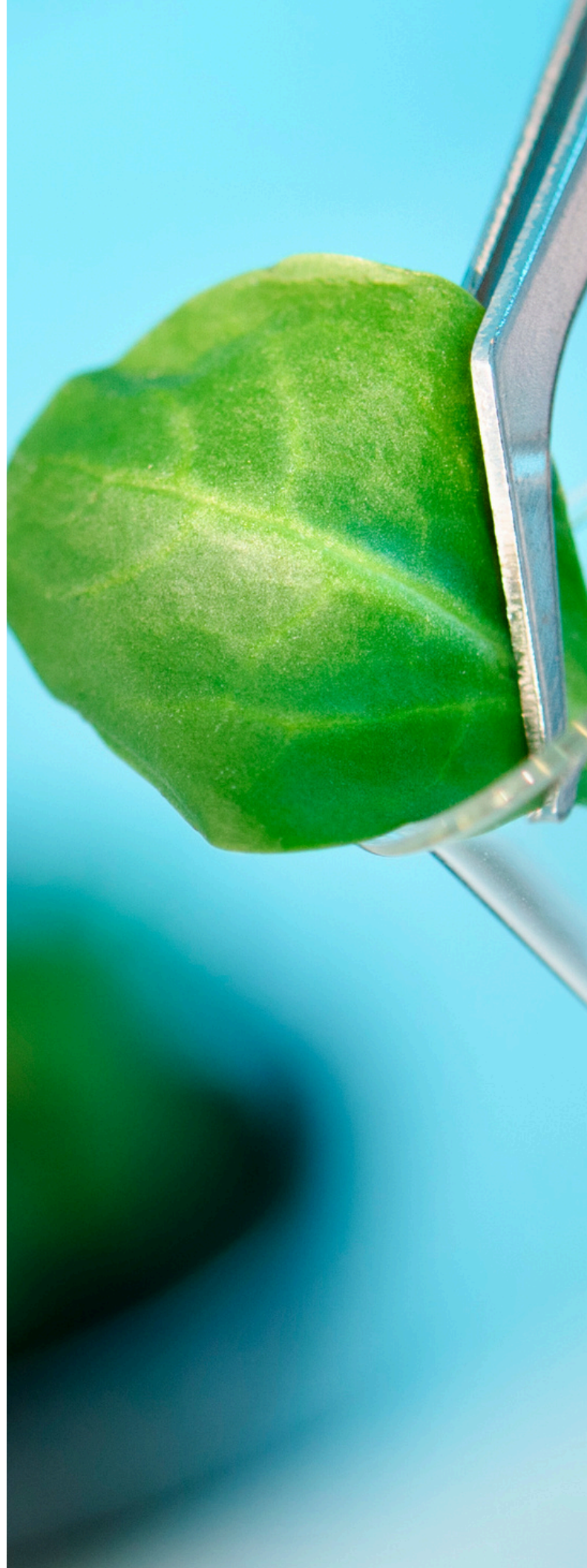
agricultura, la construcción y la remediación ambiental. Por su parte, “Hongos filamentosos: arquitectos de los ecosistemas” nos acerca a organismos fundamentales para el reciclaje de nutrientes, las asociaciones con las plantas, el control biológico y la biorremediación.

En este número también dirigimos la mirada hacia nuestro propio organismo. “CrossFit y biotecnología: el cuerpo humano como laboratorio del rendimiento” aborda la manera en que el conocimiento científico permite analizar y mejorar la respuesta del cuerpo ante el ejercicio. Los artículos “Carbohidratos: más que energía para las plantas” y “Taurina” nos recuerdan que las moléculas cumplen funciones mucho más complejas de lo que sugieren las definiciones tradicionales, y que estudiarlas resulta esencial para comprender los procesos biológicos.

Finalmente, en nuestra sección Filosofando, “El calamar y la bacteria que cosechan luz de la luna” nos conduce hacia una fascinante relación simbiótica y nos invita a reflexionar sobre la incertidumbre, el temor a lo desconocido y la capacidad de la ciencia para transformar aquello que no comprendemos en una oportunidad de descubrimiento.

Esperamos que estas páginas despierten su curiosidad y los animen a mirar la biotecnología no como una disciplina distante, sino como una ciencia presente en nuestra vida cotidiana, en los ecosistemas y en las soluciones que necesitamos construir para el futuro.

Les damos la bienvenida al volumen 4, número 4, de Biotecnológica Magazine.





La biotecnología al rescate del medio ambiente en México

Lourdes Vital López¹, Manuel de Jesús Valenzuela Gurrola², Mayra Judith García Robles² *

1. Unidad Académica Multidisciplinaria Río Bravo, Universidad Autónoma de Tamaulipas (UAT), Av. República Mexicana No. 1000, Fracc. Villa Hermosa, CP 89367, Río Bravo, Tamaulipas, México.

2. Universidad Politécnica de Zacatecas, Plan del Pardillo s/n. Col. Parque Industrial CP 99059, Fresnillo, Zacatecas.

Tema

En el presente artículo se muestra como la biotecnología es una herramienta eficaz y sostenible para enfrentar los problemas ambientales de México. Mediante el uso de organismos microscópicos, plantas y procesos biotecnológicos, se desarrollan soluciones innovadoras, para reducir la contaminación de nuestros recursos naturales.

Introducción

La biotecnología es una rama de la ciencia que usa organismos microscópicos como bacterias, hongos e incluso plantas, para crear productos o procesos diseñados para resolver situaciones específicas de la sociedad. En nuestra vida diaria hacemos uso de estos productos, ya sea como alimentos, medicamentos, vacunas, entre otros, los cuales son obtenidos gracias a la biotecnología.

Un ejemplo clásico de un proceso biotecnológico, es la fermentación; la cual se refiere a una reacción química natural, donde diminutos organismos como las levaduras o

ciertas bacterias, transforman los azúcares presentes en frutos, cereales u otros alimentos, y generan sustancias como el alcohol. Todo este proceso ocurre en ausencia de oxígeno (Nkhata et al., 2018). Entonces, el alcohol producido puede servir para generar bebidas como el vino o la cerveza, y también para producir biocombustibles, como alternativas a los combustibles tradicionales.

¿Sabías que actualmente México enfrenta serios problemas ambientales?

A continuación, vamos a presentar una visión general sobre las situaciones ambientales más preocupantes y como el uso de la biotecnología, contribuye a crear soluciones innovadoras para reparar o reducir el daño ocasionado por la contaminación, y prevenir futuros daños ambientales.



Figura 1. Contaminación ambiental en tres áreas.

Contaminación del aire.

La atmósfera es una capa invisible que envuelve a nuestro planeta. Sin ella, la vida no sería posible. Actúa como un escudo protector contra los rayos solares, ayuda a mantener una temperatura y clima ideal para los seres vivos, y funciona como un contenedor de gases que son indispensables para respirar, como el oxígeno y el nitrógeno (Semarnat, 2016).

El problema es que todos los días se generan y liberan una gran cantidad de sustancias que son dañinas para la atmósfera e incluso para los seres vivos (Figura 1). Un ejemplo es el humo negro que sale de los autobuses viejos, ¿has intentado respirarlo? ¿qué sientes? Este exceso de emisiones ha provocado que la atmósfera ya no sea tan eficiente en sus funciones; ¿Has notado que las temperaturas son más extremas que antes?

Frente a este deterioro de la calidad del aire, resulta evidente que es necesario reducir las emisiones contaminantes y buscar alternativas que permitan satisfacer las necesidades de transporte y energía sin

seguir dañando el ambiente (Conagua, 2022; Semarnat, 2016). Para lograrlo, es fundamental recurrir a soluciones que aprovechen procesos naturales y sean más responsables con el entorno.

Ante este desafío, la biotecnología ha impulsado el desarrollo de biocombustibles como el bioetanol y el biodiesel. El bioetanol se obtiene por fermentación de azúcares presentes en cultivos como caña de azúcar o maíz, y se usa como aditivo o sustituto de la gasolina en vehículos, reduciendo emisiones de gases contaminantes (Anderson, 2015; Finco & Doppler, 2010). Por otro lado, el biodiesel, se elabora a partir de aceites vegetales y grasas animales, y puede usarse en motores diésel en mezclas con diésel convencional o puros, disminuyendo también las emisiones nocivas (Finco & Doppler, 2010; Kumar et al., 2025). En comparación con los combustibles fósiles, estos productos representan alternativas más amigables con el medio ambiente (Figura 2).



Figura 2. La biotecnología al rescate del medio ambiente.

En México se han desarrollado proyectos enfocados en el uso de biorreactores biológicos para capturar y aprovechar emisiones contaminantes, es decir, sustancias dañinas como gases y partículas que se liberan al ambiente principalmente por actividades industriales y la quema de combustibles. Entre estas sustancias se encuentran el dióxido de carbono (CO₂), los compuestos orgánicos volátiles (COV) y otros gases de efecto invernadero (GEI).

Pero, ¿qué es un biorreactor? Se trata de un equipo utilizado en biotecnología que funciona como un ambiente controlado donde el crecimiento de microorganismos, células o plantas, crecen y realizar procesos biológicos de interés, como la producción de compuestos útiles o la eliminación de contaminantes. En estos sistemas se regulan condiciones como la temperatura, el oxígeno, la agitación y el pH, lo que favorece la eficiencia de los procesos biológicos (Zhong, 2011). De esta manera, los biorreactores utilizan microalgas, bacterias y hongos, capaces de transformar los contaminantes en productos útiles, entre ellos biocombustibles, biomasa y compuestos bioactivos.

Actualmente, estas herramientas biotecnológicas ya se utilizan en proyectos enfocados en disminuir la contaminación ambiental. Por ejemplo, en México, investigadores desarrollaron un sistema basado en fotobiorreactores tipo airlift y la microalga *Scenedesmus dimorphus* para reducir emisiones contaminantes generadas por calderas industriales. Las microalgas aprovecharon su capacidad natural para capturar dióxido de carbono (CO₂) y otros gases contaminantes, logrando remover más del 64 % del CO₂ emitido. Además, la biomasa obtenida puede emplearse para producir biocombustibles y otros productos de valor agregado, demostrando el potencial de la biotecnología como una alternativa sustentable para disminuir la contaminación atmosférica (Arroyo et al., 2019).

Degradación de suelos

¿Sabías que el suelo es un recurso natural vivo? No solo funciona como una superficie para caminar; de hecho, en él habitan millones de organismos microscópicos, que promueven el crecimiento de los cultivos. El suelo actúa como un filtro natural del agua de lluvia o riego, además

de transformar la materia orgánica en descomposición, en nutrientes que ayudan al crecimiento de plantas y a mantener la fertilidad del suelo.

En este contexto, los microorganismos del suelo tienen un papel importante en los procesos claves del ecosistema. La función principal de estos procesos es que afectan el ciclo, disponibilidad de los nutrientes, la agregación del suelo, la descomposición de la materia orgánica y el rendimiento en los cultivos. Entre los principales procesos mediados por los microorganismos se encuentran la mineralización, inmovilización, fijación de nitrógeno, nitrificación, desnitrificación y las asociación micorrícicas (Ayiti & Babalola, 2022; Heděnec et al., 2023; Idowu, 2023). Estos mecanismos contribuyen al equilibrio del ciclo de nutrientes y al mantenimiento de la fertilidad del suelo (Tabla 1).

Quizás hayas observado terrenos secos, agrietados o con poca vegetación; estas son algunas señales visibles de un suelo degradado, y cuando ocurre, significa que perdió la capacidad de retener agua, nutrientes y ya no es fértil (Figura 1).

La degradación es consecuencia del aumento de la población y actividades como la deforestación, contaminación, actividades agrícolas e industriales inadecuadas. ¿Conoces algún suelo con estas características?

Ante la pérdida de funciones tan importantes, resulta necesario buscar alternativas que permitan conservar y recuperar la calidad del suelo sin seguir afectando el equilibrio natural (Pete Smith, 2024; Semarnat, 2021). Para ello, es fundamental aprovechar los procesos biológicos que ocurren de manera natural en el propio suelo y que pueden ser fortalecidos mediante la ciencia (Figura 2).

Con este propósito, se han desarrollado productos biotecnológicos como los biofertilizantes y biopesticidas, elaborados a partir de bacterias y hongos benéficos. Estos productos ayudan a mejorar la fertilidad del suelo, disminuir el uso de químicos sintéticos y favorecer una agricultura más sostenible (Miguel A. Altieri, 2019; Pete Smith, 2024).

Tabla 1. Principales procesos biológicos del suelo y su importancia

Proceso biológico	¿En qué consiste?	Importancia en el suelo
Mineralización	Los microorganismos descomponen la materia orgánica y liberan nutrientes que pueden ser aprovechados por las plantas.	Favorece la fertilidad y disponibilidad de nutrientes.
Inmovilización	Los microorganismos absorben nutrientes, especialmente nitrógeno, para su propio crecimiento.	Regula temporalmente la disponibilidad de nutrientes en el suelo.
Fijación de nitrógeno	Algunas bacterias convierten el nitrógeno atmosférico en formas utilizables por las plantas.	Contribuye al crecimiento vegetal y reduce la dependencia de fertilizantes químicos.
Nitrificación	Proceso aeróbico donde el amonio se transforma primero en nitrito y después en nitrato mediante la acción microbiana.	Forma parte del ciclo del nitrógeno y facilita la absorción de este nutriente por las plantas.
Desnitrificación	Los microorganismos transforman nitratos y nitritos en gases nitrogenados que regresan a la atmósfera.	Ayuda a regular el exceso de nitrógeno en el suelo.
Asociaciones micorrícicas	Relación simbiótica entre hongos y raíces vegetales que mejora la absorción de agua y nutrientes	Incrementa la resistencia y nutrición de las plantas, además de influir en la dinámica microbiana del suelo.

De manera similar, la biotecnología también ha permitido desarrollar estrategias para recuperar ambientes contaminados. Una de ellas es la biorremediación, que utiliza organismos vivos, como bacterias, hongos y plantas, para reducir o eliminar contaminantes presentes en el suelo, el agua y el aire. Esta herramienta biotecnológica aprovecha la capacidad natural de algunos organismos para degradar, transformar o absorber sustancias tóxicas y convertirlas en compuestos menos dañinos para el ambiente. Gracias a estos procesos biológicos, es posible contribuir a la recuperación de ecosistemas afectados por la contaminación de una forma más sostenible y amigable con el medio ambiente (Azubuike et al., 2016; Biswas et al., 2015; Martínez-Espinosa, 2024).

Durante este proceso, algunos contaminantes pueden degradarse completamente hasta convertirse en sustancias más simples e inofensivas. En otros casos, pueden transformarse en compuestos diferentes mediante procesos biológicos. Sin embargo, existen sustancias llamadas recalcitrantes, que son resistentes a la degradación y pueden permanecer en el ambiente durante largos periodos de tiempo (Berhanu et al., 2023; Giovannella et al., 2020; Kulkarni & Chaudhari, 2007). Otro ejemplo de la aplicación de estas estrategias se observó en Tabasco, México, donde investigadores lograron aislar hongos capaces de crecer en suelos contaminados con petróleo. Entre ellos destacaron *Exophiala sp.* y *Rhodotorula sp.*, microorganismos que demostraron la capacidad de degradar sustancias tóxicas presentes en el petróleo, lo que resalta su potencial uso en la recuperación ambiental mediante a través de la biorremediación (Ide-Pérez et al., 2020).

Estos hallazgos muestran cómo algunos microorganismos pueden convertirse en aliados naturales para limpiar ambientes contaminados y cómo la biotecnología puede contribuir a la recuperación de suelos de una manera más sostenible y amigable con el medio ambiente.

Contaminación del agua

Naturalmente, el agua tiene su propio ciclo vital, el cual es impulsado por la energía solar, y es muy importante para los ecosistemas y los seres vivos que habitan ahí. ¿Te has preguntado el impacto que tiene sobre ríos, lagos y acuíferos, el crecimiento acelerado de las ciudades, el consumo desmedido de agua de las personas, industria y actividades agrícolas? El problema no solo es la mayor demanda del agua, sino también el aumento de aguas residuales que se vierten en los cuerpos de aguas superficiales, provocando su contaminación y la afectación de ecosistemas naturales y su biodiversidad (Figura 1).

Ante este escenario, se vuelve indispensable implementar acciones que permitan reducir la contaminación del agua y asegurar su disponibilidad para las generaciones presentes y futuras (Conagua, 2022; Oms, 2021). Para lograrlo, es necesario recurrir a alternativas que aprovechen procesos naturales y contribuyan a la recuperación de los cuerpos de agua sin causar daños adicionales al ambiente. En este sentido, la biotecnología ha permitido desarrollar sistemas capaces de limpiar el agua de contaminantes antes de devolverla al ambiente. Un ejemplo son las Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR), instalaciones donde se aplican diferentes procesos físicos, químicos y biológicos para eliminar contaminantes presentes en el agua usada. En estas plantas, microorganismos como bacterias y microalgas desempeñan un papel fundamental, ya que ayudan a descomponer la materia orgánica y otras sustancias contaminantes (Oms, 2021; Semarnat, 2016). Gracias a ello, es posible mejorar la calidad del agua y contribuir a la protección de los ecosistemas acuáticos (Figura 2).

De manera similar, algunos estudios han explorado el uso de residuos agrícolas como herramientas para descontaminar cuerpos de agua. Por ejemplo, científicos de la Universidad Autónoma del Estado de Morelos (UAEM)

estudiaron el uso de materiales como la paja de maíz y otras fibras vegetales como soporte para bacterias y algas capaces de degradar pesticidas presentes en ambientes acuáticos. Los resultados mostraron que estos materiales pueden favorecer la eliminación de contaminantes tanto en estudios de laboratorio como en pruebas piloto (Arias-Castro et al., 2025). Estos resultados muestran cómo los residuos agrícolas pueden aprovecharse en estrategias sustentables de biorremediación, contribuyendo a la descontaminación del agua y al cuidado del medio ambiente. Sumado a ello, en México la contaminación por metales pesados representa un problema ambiental asociado principalmente a actividades mineras, industriales y agrícolas. Elementos como plomo, arsénico, cadmio y mercurio pueden acumularse en suelos y cuerpos de agua, afectando la fertilidad del suelo, la calidad del agua y la salud de los ecosistemas y de la población (Figura 3).

Ante esta problemática, en México se han desarrollado diversas estrategias biotecnológicas para reducir el impacto de estos contaminantes, entre las que destaca la fitorremediación, una técnica que utiliza plantas para absorber, acumular o estabilizar contaminantes presentes en el suelo y el agua. Asimismo, se ha estudiado el uso de bacterias y hongos que favorecen la tolerancia y remoción de metales pesados. Investigadores mexicanos han identificado microorganismos de géneros como *Pseudomonas*, *Rhizobium* y *Glomus* con potencial para contribuir a los procesos de recuperación ambiental (Covarrubias & Peña Cabriales, 2017).

La verdad es que el panorama ambiental en México (y en el mundo) es preocupante y no puede ignorarse. La contaminación del aire, la degradación de los suelos y la contaminación del agua son problemas que se han acumulado con el paso del tiempo y que afectan directamente la calidad de vida de las personas y el -

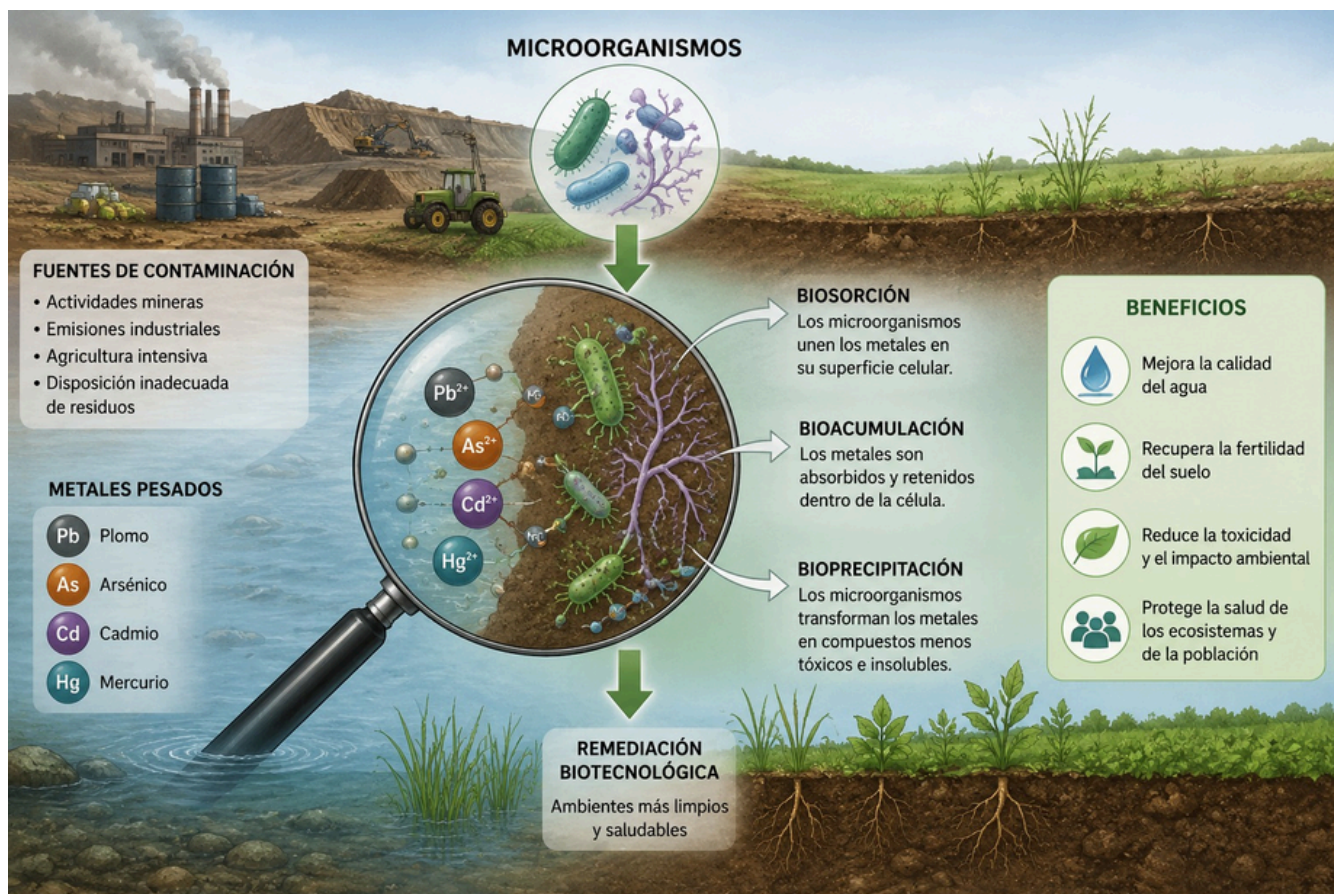


Figura 3. Remediación biotecnológica de suelo y su importancia.

equilibrio de los ecosistemas.

Gran parte de esta problemática está relacionada con las actividades humanas y el uso excesivo de los recursos naturales. Ante estos desafíos, queda claro que es el momento de actuar y de buscar soluciones que permitan reducir los daños ya ocasionados y prevenir problemas futuros.

La biotecnología se presenta como una herramienta clave, ya que aprovecha el potencial de la naturaleza para desarrollar productos y procesos capaces de restaurar ecosistemas, mejorar la calidad del aire, del agua y del suelo, y promover un desarrollo más sostenible. Al integrar la ciencia con el respeto por el medio ambiente, se abre el camino hacia un futuro más saludable y responsable para las generaciones presentes y futuras.

Referencias

Anderson, L. G. (2015). Effects of using renewable fuels on vehicle emissions. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 47, 162-172.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.03.011>

Arias-Castro, E., Castrejón-Godínez, M. L., Mussali-Galante, P., Tovar-Sánchez, E., & Rodríguez, A. (2025). Pesticides Degradation Through Microorganisms Immobilized on Agro-Industrial Waste: A Promising Approach for Their Elimination from Aquatic Environments. 13(4), 1073.
<https://www.mdpi.com/2227-9717/13/4/1073>

Arroyo, C. A., Contreras, J. L., Zeifert, B., & Ramírez C., C. (2019). CO2 Capture of the Gas Emission, Using a Catalytic Converter and Airlift Bioreactors with the Microalga *Scenedesmus dimorphus*. 9(16), 3212.
<https://www.mdpi.com/2076-3417/9/16/3212>

Ayiti, O. E., & Babalola, O. O. (2022). Factors Influencing Soil Nitrification Process and the Effect on Environment and Health [Review]. *Volume 6 - 2022*.
<https://doi.org/10.3389/fsufs.2022.821994>

Azubuike, C. C., Chikere, C. B., & Okpokwasili, G. C. (2016). Bioremediation techniques—classification based on site of application: principles, advantages, limitations and prospects. *World Journal of Microbiology and*

Biotechnology, 32(11), 180.
<https://doi.org/10.1007/s11274-016-2137-x>

Berhanu, A., Mutanda, I., Taolin, J., Qaria, M. A., Yang, B., & Zhu, D. (2023). A review of microbial degradation of per- and polyfluoroalkyl substances (PFAS): Biotransformation routes and enzymes. *Science of The Total Environment*, 859, 160010.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.160010>

Biswas, K., Paul, D., & Sinha, S. (2015). Biological Agents of Bioremediation: A Concise Review. *Frontiers in Environmental Microbiology*, 1, 39-43.
<https://doi.org/10.11648/j.fem.20150103.11>

CONAGUA. (2022). *Estadísticas del Agua en México 2021*. Comisión Nacional del Agua.
<https://files.conagua.gob.mx/conagua/publicaciones/Publicaciones/EAM%202021.pdf>

Covarrubias, S. A., & Peña Cabriales, J. J. (2017). Contaminación ambiental por metales pesados en México: problemática y estrategias de fitorremediación. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 33, 7-21.
<https://doi.org/10.20937/RICA.2017.33.esp01.01>

Finco, M. V. A., & Doppler, W. (2010). Bioenergy and sustainable development: The dilemma of food security and climate change in the Brazilian savannah. *Energy for Sustainable Development*, 14(3), 194-199.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.esd.2010.04.006>

Giovanella, P., Vieira, G. A. L., Ramos Otero, I. V., Pais Pellizzer, E., de Jesus Fontes, B., & Sette, L. D. (2020). Metal and organic pollutants bioremediation by extremophile microorganisms. *Journal of Hazardous Materials*, 382, 121024.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2019.121024>

Heděnc, P., Zheng, H., Pessanha Siqueira, D., Lin, Q., Peng, Y., Kappel Schmidt, I., . . . Vesterdal, L. (2023). Tree species traits and mycorrhizal association shape soil microbial communities via litter quality and species mediated soil properties. *Forest Ecology and Management*, 527, 120608.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.foreco.2022.120608>

- Ide-Pérez, M. R., Fernández-López, M. G., Sánchez-Reyes, A., Leija, A., Batista-García, R. A., Folch-Mallol, J. L., & Sánchez-Carbente, M. d. R. (2020). Aromatic Hydrocarbon Removal by Novel Extremotolerant *Exophiala* and *Rhodotorula* Spp. from an Oil Polluted Site in Mexico. 6(3), 135. <https://www.mdpi.com/2309-608X/6/3/135>
- Idowu, J., Pietrasiak, N., & Hoellrich, M. (2023). Soil Biological Processes C. a. E. S. College of Agricultural. <https://pubs.nmsu.edu/a/A153/index.html>
- Kulkarni, M., & Chaudhari, A. (2007). Microbial remediation of nitro-aromatic compounds: An overview. *Journal of Environmental Management*, 85(2), 496-512. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2007.06.009>
- Kumar, D., Pratap, S., Gupta, N., Tyagi, P., Kumar, P., Prajapati, R. K., ... Ayanie, A. G. (2025). Transesterification-derived biodiesel: a comprehensive assessment of feedstock diversity, engine performance, and pathways to sustainable transportation. *Discover Sustainability*, 6(1), 1447. <https://doi.org/10.1007/s43621-025-02449-2>
- Martínez-Espinosa, R. M. (2024). Halophilic archaea as tools for bioremediation technologies. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 108(1), 401. <https://doi.org/10.1007/s00253-024-13241-z>
- Nkhata, S. G., Ayua, E., Kamau, E. H., & Shingiro, J. B. (2018). Fermentation and germination improve nutritional value of cereals and legumes through activation of endogenous enzymes. *Food Sci Nutr*, 6(8), 2446-2458. <https://doi.org/10.1002/fsn3.846>
- OMS, O.-H. (2021). Progreso en el tratamiento de las aguas residuales: Estado mundial y necesidades de aceleración del indicador 6.3.1 de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS). Retrieved 15 de enero de 2026 from https://unhabitat.org/sites/default/files/2021/10/sdg6_indicator_report_631_progress-on-wastewater-treatment_2021_es.pdf
- Pete Smith, R. M. P., David A. Lobb, Ranjan Bhattacharyya, Ghiath Alloush, Gaius D. Eudoxie, Lúcia HC Anjos, Michael Castellano, Georges M. Ndzana, Claire Chenu, Ravi Naidu, Jeyanny Vijayanathan, Adele M. Muscolo, Guillermo A. Studdert, Natalia Rodriguez Eugenio, M. Costanza Calzolari, Nyambilila Amuri, Paul Hallett (2024). Estado de los suelos del mundo. *Revisión anual Medio ambiente y recursos*, 49, 73-104. <https://doi.org/10.1146/annurev-environ-030323-075629>
- SEMARNAT. (2016). Resumen Ejecutivo. Informe de la Situación del Medio Ambiente en México. Compendio de Estadísticas Ambientales. Indicadores Clave, de Desempeño Ambiental y de Crecimiento Verde. . Semarnat. https://apps1.semarnat.gob.mx:8443/dgeia/informe15/tema/pdf/Resumen15_ejecutivo.pdf
- SEMARNAT. (2021). Informe de la situación del medio ambiente en México 2021: Compendio de estadísticas ambientales, indicadores clave, de desempeño ambiental y de crecimiento verde. Sistema Nacional de Información Ambiental y de Recursos Naturales. Retrieved 25 de noviembre de 2025 from <https://apps1.semarnat.gob.mx:8443/dgeia/informe18/index.html>
- Zhong, J. J. (2011). 2.14 - Bioreactor Engineering. In M. Moo-Young (Ed.), *Comprehensive Biotechnology* (Second Edition) (pp. 165-177). Academic Press. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-08-088504-9.00097-0>

Sobre los autores

Dra. en C. Lourdes Vital López

Docente de la carrera de Ingeniería en Mantenimiento Industrial de la Universidad Autónoma de Tamaulipas Unidad Académica Multidisciplinaria Río Bravo, Tamaulipas. Actualmente es miembro del SNI nivel 1 en el área de VII: Ciencias de Agricultura, Agropecuarias, Forestales y de Ecosistemas con especialidad en Biotecnología Vegetal.

M. en C. Manuel de Jesús Valenzuela Gurrola

Docente de la carrera de Ingeniería en Biotecnología de la Universidad Politécnica de Zacatecas. Sus líneas de trabajo son la Biotecnología Ambiental y Biotecnología en Alimentos.

Dra. en C. Mayra Judith García Robles

Docente-investigador de la carrera de Ingeniería en Biotecnología de la Universidad Politécnica de Zacatecas.

Es miembro activo del SNI-1 en el área de Biología y Química. Su línea de investigación se enfoca en la aplicación de la biotecnología en la investigación biomédica y microbiológica.

Cita

Vital López, L., Valenzuela Gurrola, M. de J., & García Robles, M. J. (2026). La biotecnología al rescate del medio ambiente en México. *Biotecnológica Magazine*, 4(4), 1-9.
<https://doi.org/10.5281/zenodo.22216669>

CrossFit y biotecnología: el cuerpo humano como laboratorio del rendimiento

Jesús Corral García¹, Martha Judith Valdez Ortega², Diego Carlos Bouttier Figueroa^{2*}

¹Departamento de Ciencias del Deporte y de la Actividad Física, Universidad de Sonora, Calle Rosales y Blvd. Luis Encinas S/N, Col. Centro. C.P. 83000, Hermosillo, Sonora, México.

²Departamento de Ciencias Químico-Biológicas, Universidad de Sonora, Calle Rosales y Blvd. Luis Encinas S/N, Col. Centro. C.P. 83000, Hermosillo, Sonora, México.

*Autor para correspondencia: Diego Carlos Bouttier Figueroa.

e-mail: diego.bouttier@unison.mx

Foto: alexroz a través de canva

Tema

¿Qué hace que un entrenamiento de CrossFit sea también un laboratorio biológico? Este artículo utiliza esta disciplina para explicar cómo la fisiología, las ciencias del deporte y la biotecnología estudian el ejercicio de alta intensidad. A partir de situaciones propias de un WOD, se presentan los sistemas energéticos, los biomarcadores, los biosensores, la nutrición y los materiales avanzados como aproximaciones complementarias al esfuerzo físico.

1. Un solo entrenamiento, múltiples respuestas fisiológicas

El cronómetro se detiene antes de los diez minutos, pero el corazón continúa acelerado, la respiración es intensa y los músculos están fatigados. ¿Cómo puede un esfuerzo tan breve provocar tantos cambios al mismo tiempo?. Algunos WOD (Workout of the Day, o entrenamiento del día) pueden completarse en menos de diez minutos y, aun así, provocar simultáneamente cambios cardiovasculares, respiratorios, musculares y metabólicos. En pocos segun-

dos aumentan la frecuencia cardíaca y la ventilación, los músculos demandan más ATP y se eleva la temperatura corporal. Esta coordinación convierte a las sesiones breves de alta intensidad en un contexto útil para observar la respuesta humana al esfuerzo.

Cada WOD combina ejercicios de fuerza, movimientos gimnásticos y actividades cardiovasculares. Las variaciones en duración, carga y velocidad modifican la participación relativa de los sistemas energéticos y la magnitud de las demandas cardiorrespiratorias y musculares.

Para el atleta, el WOD representa un desafío físico; para la investigación, ofrece un escenario de observación. A lo largo del artículo, el CrossFit servirá como hilo conductor para relacionar lo que sucede en cada fase con las herramientas utilizadas para registrarlo e interpretarlo.



2. Anatomía de una clase de CrossFit

Cuando se habla de CrossFit, muchas personas piensan únicamente en el WOD, por ser la parte más intensa. Sin embargo, una clase completa incluye activación, trabajo de fuerza, WOD, ejercicios accesorios y, en algunas sesiones, un acondicionamiento final. Cada etapa cumple una función distinta dentro de la sesión.

La sesión comienza con una activación destinada a aumentar gradualmente la temperatura corporal y preparar los músculos y las articulaciones. Después se realiza un trabajo de fuerza orientado al desarrollo técnico y de capacidades físicas. A continuación, llega el WOD, en el que se combinan ejercicios de alta intensidad, como peso muerto (deadlift), subidas a una caja (step-up) o abdominales (sit-ups). Los ejercicios accesorios se enfocan en grupos musculares específicos. En algunas sesiones también se añade un trabajo final de acondicionamiento, conocido en inglés como finisher. Esta etapa prolonga brevemente el esfuerzo e incrementa la fatiga antes de concluir la actividad física.

Como muestra la Figura 1, el WOD representa solo una parte de la sesión. La intensidad y el tipo de demanda cambian entre las distintas etapas, por lo que en cada una predominan respuestas fisiológicas y metabólicas diferentes.

Estudiar un WOD requiere la participación de varias personas y un protocolo previamente acordado. El entrenador supervisa la técnica y controla las cargas; los atletas realizan los ejercicios y comunican sus sensaciones; el equipo de investigación calibra los instrumentos, registra los tiempos y obtiene las muestras antes o después del esfuerzo. Repetir las mediciones y comparar los resultados entre participantes ayuda a identificar patrones y distinguirlos de las diferencias individuales. Así, los hallazgos surgen de la colaboración y de una planificación cuidadosa, no solamente del uso de dispositivos.

El interés científico no reside en la secuencia por sí misma, sino en registrar cómo cambian las respuestas entre sus etapas. Los biosensores captan variables como frecuencia cardíaca, temperatura y movimiento, mientras que los análisis de sangre o sudor describen aspectos del metabolismo y el estrés fisiológico. La lectura conjunta de estas mediciones facilita comparar la carga y la fatiga producidas por los distintos componentes.



Figura 1. Etapas de una sesión de CrossFit y principales respuestas fisiológicas y metabólicas asociadas con cada una, junto con herramientas biotecnológicas que pueden emplearse para su medición y análisis. ATP: adenosín trifosfato; CK: creatina quinasa. Imagen generada usando IA.

3. La energía detrás de cada WOD

Cada etapa de una clase de CrossFit plantea una demanda energética diferente. Para responder a ella, el organismo necesita disponer continuamente de ATP (adenosín trifosfato), conocido como la “moneda energética” de las células. Debido a que sus reservas son muy pequeñas, el ATP debe resintetizarse constantemente durante un WOD.

Como se muestra en la Figura 2, el organismo utiliza distintos sistemas para producir ATP. La participación relativa de cada uno cambia según la intensidad y la duración del esfuerzo.

Los movimientos explosivos, como un deadlift (peso muerto) o un thruster (sentadilla con empuje de la barra), dependen principalmente de la fosfocreatina, una reserva que permite regenerar ATP de manera inmediata. Conforme el esfuerzo continúa, aumenta la participación de la glucólisis anaeróbica, que produce ATP rápidamente sin utilizar oxígeno de manera directa; en estas condiciones, aumenta la producción de lactato. Cuando el ejercicio se prolonga, el metabolismo aeróbico adquiere mayor importancia al producir ATP mediante reacciones que dependen del oxígeno.

Los sistemas energéticos no se activan y desactivan como interruptores, sino que funcionan simultáneamente, aunque su contri-



Figura 2. Participación coordinada de los sistemas de fosfágenos, glucolítico y oxidativo en la producción de ATP durante el ejercicio. Los tres sistemas funcionan simultáneamente, aunque su contribución cambia según la intensidad, la duración, el tipo de esfuerzo y la condición física de la persona. ATP: adenosín trifosfato; PCr: fosfocreatina. Imagen generada usando IA.

bución relativa cambia según el tipo de movimiento y la intensidad del esfuerzo. La combinación de ejercicios explosivos y esfuerzos sostenidos dentro de un WOD ofrece un contexto útil para observar estas variaciones. Herramientas como los analizadores portátiles de gases respiratorios, los sensores de frecuencia cardíaca y los biosensores enzimáticos de lactato permiten estudiar el consumo de oxígeno, la demanda cardiorrespiratoria y los cambios en la concentración de lactato. El análisis conjunto de estas mediciones ayuda a caracterizar el perfil energético de cada WOD y a fundamentar decisiones sobre su intensidad y los tiempos de recuperación.

4. Después del último esfuerzo: recuperación y adaptación

Cuando el cronómetro se detiene, el esfuerzo concluye, pero sus efectos continúan. Durante las horas y los días siguientes, la recuperación incluye la reposición de las reservas energéticas, la reparación y remodelación del tejido muscular y la consolidación de las adaptaciones inducidas por el ejercicio.

Para estudiar este proceso, los científicos pueden medir diferentes biomarcadores en distintos momentos antes y después del ejercicio. La concentración de lactato aporta información sobre la respuesta metabólica al esfuerzo y su eliminación posterior, pero no refleja por sí sola la intensidad del entrenamiento. La creatina quinasa (CK) se utiliza como un indicador indirecto del estrés o daño muscular

inducido por el ejercicio, aunque sus valores pueden variar considerablemente entre personas. El cortisol, por su parte, proporciona información sobre la respuesta hormonal del organismo ante el estrés físico.

Por su parte, la inflamación no es un biomarcador, sino un proceso fisiológico que participa en la eliminación de componentes celulares dañados y en la activación de señales relacionadas con la reparación y remodelación del tejido muscular. Algunos mediadores de este proceso pueden medirse para estudiar la respuesta inflamatoria provocada por el ejercicio.

Ningún biomarcador aislado basta para determinar si una persona está preparada para una nueva sesión. Sus valores deben contrastarse con la percepción de fatiga, la carga previa, el desempeño y el tiempo transcurrido desde el ejercicio. Esta interpretación conjunta aporta elementos para decidir si conviene mantener la intensidad o prolongar el descanso.

5. Biosensores: el entrenamiento convertido en datos

Los biosensores pueden resultar útiles para atletas, entrenadores, profesionales del deporte e investigadores antes, durante y después de un WOD. Estos dispositivos registran señales biológicas de manera rápida y, en muchos casos, continua o en tiempo real. Sus mediciones complementan la observación directa y la percepción personal del esfuerzo.

Muchos se encuentran integrados en relojes inteligentes (smartwatches) y otros dispositivos portátiles. Durante la sesión registran cambios inmediatos; en las horas posteriores permiten observar cómo algunas variables fisiológicas regresan gradualmente a sus niveles habituales de reposo. Como muestra la Figura 3, sus resultados requieren una lectura acorde con el contexto y las características de cada persona.



Figura 3. Los biosensores y dispositivos portátiles pueden registrar distintas señales biológicas durante el ejercicio, en reposo o durante la recuperación. Los sensores experimentales de sudor buscan detectar metabolitos y electrolitos; sus resultados deben interpretarse junto con otros datos del entrenamiento y de la persona. Imagen generada usando IA.

Algunos dispositivos también analizan la variabilidad de la frecuencia cardíaca (HRV, por sus siglas en inglés). Su evolución, medida a lo largo del tiempo y en condiciones comparables, puede ofrecer indicios sobre el estado fisiológico. Otros biosensores experimentales examinan el sudor para detectar lactato, glucosa y electrolitos, entre ellos sodio y potasio.

Los programas informáticos organizan estos registros e identifican tendencias que pueden orientar la individualización. No obstante, su interpretación también debe considerar la carga de trabajo, el desempeño, la percepción de fatiga y, cuando corresponda, la valoración profesional. Los dispositivos portátiles complementan, pero no sustituyen, la evaluación integral del atleta.

6. Nutrición y microbiota al servicio del rendimiento

Tras el esfuerzo, la alimentación aporta nutrientes y compuestos para reponer reservas y favorecer la reparación del tejido muscular. Las proteínas de la dieta proporcionan los aminoácidos necesarios para la reparación y remodelación. La creatina, en cambio, se sintetiza de manera endógena y también se obtiene de alimentos como carne y pescado o mediante suplementos. En el músculo, una parte se almacena como fosfocreatina, que interviene en la rápida resíntesis de ATP durante acciones intensas y breves. Por tanto, ambas cumplen funciones diferentes dentro de la nutrición deportiva.

La fermentación es un proceso biotecnológico en el que microorganismos transforman los componentes de una materia prima. Se utiliza desde hace siglos para elaborar alimentos como yogur y kéfir. En la actualidad, la selección de cepas y el control del proceso ayudan a caracterizar los productos obtenidos. Algunos contienen microorganismos con potencial probiótico, cuyos posibles efectos sobre la salud intestinal y la adaptación al ejercicio continúan en investigación.

La microbiota intestinal es la comunidad de microorganismos que habita en el intestino. Su composi-

ción y actividad se relacionan con la digestión, el aprovechamiento de nutrientes y diversas funciones metabólicas e inmunológicas; su vínculo con la adaptación al ejercicio aún está en estudio. El cultivo, la secuenciación y el análisis de metabolitos ayudan a investigar esta relación. La alimentación adecuada y el descanso siguen siendo fundamentales, mientras estas técnicas revelan los procesos implicados.

7. Nanotecnología en textiles deportivos: del laboratorio al gimnasio

La nanotecnología tiene aplicaciones potenciales en materiales deportivos, particularmente en textiles especializados, pero su uso no puede generalizarse a todos los productos empleados en CrossFit. Características como ligereza, elasticidad, control de la humedad, resistencia al desgaste y agarre dependen principalmente del tipo de fibras, la estructura del tejido, los recubrimientos convencionales y el diseño de cada producto.

Una línea de investigación estudia la incorporación de nanopartículas de óxido de zinc (ZnO) en fibras o recubrimientos textiles. Estos nanomateriales pueden proporcionar propiedades antimicrobianas y protección frente a la radiación ultravioleta; sin embargo, su efecto y permanencia dependen de factores como la concentración, el método de incorporación y la resistencia al lavado. Estos desarrollos corresponden principalmente a textiles especializados y no implican que todas las camisetas, rodilleras, muñequeras o grips contengan nanomateriales.

Otra línea de desarrollo son los textiles inteligentes, que pueden integrar sensores flexibles o materiales conductores para registrar variables como movimiento, temperatura, frecuencia cardíaca o componentes del sudor. Su principal potencial consiste en mejorar la funcionalidad, la comodidad y el monitoreo durante el ejercicio, no en aumentar directamente el rendimiento físico. Muchos de estos materiales todavía se encuentran en etapas de diseño, validación o desarrollo de prototipos.

8. Datos biológicos e individualización del entrenamiento

La individualización ya considera factores como condición física, experiencia, objetivos y respuesta a las cargas de trabajo. La biotecnología aporta métodos y biosensores para medir señales biológicas o biomarcadores. Los dispositivos portátiles registran variables fisiológicas, mientras que la inteligencia artificial integra grandes volúmenes de registros y detecta patrones. Aunque pueden trabajar en conjunto, la inteligencia artificial es una herramienta computacional y no una rama biotecnológica.

La novedad radica en el detalle y la continuidad de los registros disponibles. Al combinar relojes inteligentes, biosensores y resultados de ejecución, los algoritmos podrían identificar tendencias y sugerir ajustes en la carga o el descanso. Tales sugerencias también deben ponderar los objetivos, la percepción de fatiga, el estado de salud y el juicio del entrenador u otros profesionales. La figura 4 presenta la convergencia de mediciones biológicas, sensores, análisis computacional, nutrición y tecnologías de materiales.

Algunas herramientas ya se utilizan y otras continúan en investigación o validación. Su desarrollo reúne especialistas de las ciencias del deporte, la ingeniería, la informática, la salud y las ciencias biológicas. Su función es apoyar, no sustituir, el criterio del atleta y del entrenador.

9. Conclusión

Un WOD constituye un desafío fisiológico dinámico cuyos efectos no terminan cuando se detiene el cronómetro. Durante el esfuerzo predominan respuestas fisiológicas y metabólicas destinadas a sostener la actividad; después adquieren mayor relevancia la reposición de las reservas energéticas, la reparación y remodelación del tejido muscular y la adaptación. Ningún sensor, biomarcador o algoritmo puede representar por sí solo la complejidad de estos procesos: las mediciones adquieren significado cuando se interpretan de acuerdo con la carga de trabajo, las sensaciones, los objetivos y el contexto de cada persona.

Figura 4. Integración interdisciplinaria del estudio del metabolismo, los biomarcadores, los biosensores, la nutrición, la microbiota, la nanotecnología y el análisis de datos aplicados al CrossFit. Estas herramientas permiten estudiar la respuesta al ejercicio y pueden apoyar la individualización del entrenamiento sin sustituir la valoración profesional. Imagen generada usando IA.



El CrossFit ofrece un ejemplo cercano de cómo pueden colaborar la fisiología, las ciencias del deporte, la nutrición, la biotecnología, la ingeniería y el análisis de datos. La lección central no es que la tecnología deba indicar cómo entrenar, sino que la evidencia científica puede complementar la experiencia de atletas y entrenadores y favorecer decisiones más informadas. De esta manera, el gimnasio también puede convertirse en un espacio de observación científica, donde cada sesión genera observaciones y preguntas que requieren una interpretación crítica.

10. Referencias

- Árok, P., & Szabo, A. (2025). What makes CrossFit exercise unique? Addiction, passion, or motivation? *Sport Sciences for Health*, 21, 2167–2183. <https://doi.org/10.1007/s11332-025-01403-z>
- Gastin, P. B., & Suppiah, H. T. (2026). Anaerobic and aerobic energy system contribution during maximal exercise: A systematic review. *Sports Medicine* <https://doi.org/10.1007/s40279-026-02414-7>
- Naselli, F., Cardinale, P. S., Vasto, S., Proia, P., Baldassano, S., & Caradonna, F. (2024). Challenges and future perspectives of sustainable supplements, functional foods, and nutrigenomics in athletic performance. *Human Movement*, 25(4), 1–15. <https://doi.org/10.5114/hm/193084>
- Nath, S., & Dutta, A. (2024). Application of nanotechnology in textile industry: A review. *Journal of the Textile Association*, 85(1), 40–47. <https://doi.org/10.5281/zenodo.11562073>
- Yang, G., Hong, J., & Park, S. B. (2024). Wearable device for continuous sweat lactate monitoring in sports: A narrative review. *Frontiers in Physiology*, 15, 1376801. <https://doi.org/10.3389/fphys.2024.1376801>

Agradecimientos

D. C. Bouttier-Figueroa agradece a SECIHTI por beca de la posición postdoctoral en la Universidad de Sonora.

Sobre los autores

Jesús Corral García es entrenador y atleta de CrossFit en Hermosillo, con formación en Cultura Física y Deporte. Compite en eventos oficiales y difunde contenidos sobre entrenamiento y rendimiento a través de su cuenta de Instagram.

Martha Judith Valdez Ortega es académica de la Universidad de Sonora, donde participa en la formación de estudiantes en el área de análisis clínicos. Sus intereses se centran en el estudio bioquímico de enfermedades y en el uso de compuestos naturales con potencial biológico.

Diego Carlos Bouttier Figueroa es posdoctorante SECIHTI en Universidad de Sonora investigando sobre biotecnología y materiales avanzados. Su trabajo busca acercar la ciencia a problemas reales, explorando desde nanopartículas hasta aplicaciones en salud, ambiente y tecnología

Cita:

Corral García, J., Valdez Ortega, M. J., & Bouttier Figueroa, D. C. (2026). CrossFit y biotecnología: el cuerpo humano como laboratorio del rendimiento. *Biotecnológica Magazine*, 4(4), 10–16. <https://doi.org/10.5281/zenodo.22216730>



Valorización de las conchas de moluscos

Crisalejandra Rivera-Pérez*

Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste, S. C., La Paz, B.C.S., 23090, México;

crivera@cibnor.mx, <https://orcid.org/0000-0002-9746-3225>

Foto: MrGajowxy2 a través de canva

Tema

Las conchas de moluscos representan uno de los principales residuos generados por la acuicultura, la pesca, el procesamiento y el consumo de bivalvos. Aunque comúnmente se consideran desechos, su composición rica en carbonato de calcio y la presencia de matrices orgánicas e inorgánicas les confieren un alto potencial de valorización. Este artículo revisa, desde una perspectiva de divulgación, las principales alternativas para transformar las conchas en recursos útiles dentro de esquemas de economía circular. Entre sus aplicaciones destacan su uso en agricultura como fuente de calcio y fosfatos, en remediación ambiental para la remoción de metales pesados y fósforo, en construcción como sustituto parcial de agregados y materiales cementantes, en restauración ecológica como sustrato y hábitat, así como en actividades antimicrobianas y biocidas. Así mismo, se discuten los principales retos para su aprovechamiento, como la recolección, limpieza, procesamiento, trazabilidad y

regulación. En México, la producción de ostiones, almejas y otros bivalvos abre oportunidades para desarrollar estrategias regionales que conviertan estos residuos en materiales de valor agregado, contribuyendo a una acuicultura más limpia, sostenible y circular.

1.Introducción

Los moluscos es un producto dominante en la industria acuícola. La producción de moluscos a nivel mundial en 2025 produjo 38 millones de toneladas de animales acuáticos, el cual fue dominado por moluscos (53%) (FAO, 2026). En México, la producción nacional de moluscos bivalvos, principalmente ostiones y almejas, representa una actividad pesquera y acuícola de importancia económica, alimentaria y social, especialmente en zonas costeras del Pacífico, Golfo de México y noroeste del país. De acuerdo con datos de CONAPESCA (2021), la producción mostró variaciones importantes en la última década: alcanzó



Figura 1. Conchas de ostión. Fotografía: Lucy Ryan a través de Canva.

83,654 toneladas en 2018, pero disminuyó a 48,401 toneladas en 2019 y a 13,189 toneladas en 2020, reflejando una caída considerable en el volumen registrado. Entre las principales especies producidas se encuentran la almeja blanca, almeja catarina, almeja chocolata, almeja prieta, almeja voladora, ostión del Pacífico, ostión japonés, ostión de placer y ostión del este; además, México cuenta con cultivos en cuerpos de agua clasificados y certificados, lo que favorece su comercialización y exportación a mercados como Estados Unidos y China. Más recientemente, CONAPESCA reportó que en 2023 la producción preliminar de ostión alcanzó 20,237.68 toneladas por captura y 7,783.21 toneladas por acuicultura, lo que confirma que este grupo continúa siendo uno de los bivalvos más relevantes para el sector.

Los moluscos generan un gran volumen de residuos pre y posconsumo, principalmente conchas, las cuales suelen representar alrededor del 65 al 90 % del peso vivo, dependiendo de la especie (Fig. 1). Solo en el caso de los bivalvos, cada año se producen más de 10 millones de toneladas de conchas, las cuales generalmente se desechan

en campos abiertos o en vertederos (Khan et al., 2020). Aunque los cultivos de moluscos pueden proporcionar diversos beneficios ecosistémicos, como el control del CO₂ antropogénico, la protección natural de las costas y el mantenimiento de la biodiversidad, la principal barrera para su desarrollo sostenible es precisamente el manejo de los residuos de conchas, tanto en las etapas de cosecha y depuración como después del consumo (Morris et al., 2019). El manejo de las conchas generadas por el consumo y producción de moluscos representa un reto ambiental y económico para productores, comercializadores y consumidores. En muchas regiones, estos residuos se acumulan al aire libre o se disponen sin una regulación adecuada, lo que puede provocar malos olores, contaminación del sitio por la descomposición de restos orgánicos y un impacto visual negativo en las zonas costeras (Jung et al., 2012). Aunque la acuicultura de moluscos suele considerarse una actividad alimentaria de bajo impacto ambiental, su sostenibilidad también depende de atender lo que ocurre después de la cosecha y el consumo.



Figura 2. Composición orgánica e inorgánica de la concha de moluscos. Imagen generada con IA.

Por ello, resulta fundamental incorporar estrategias que reduzcan, aprovechen o transformen estos residuos, de manera que las conchas dejen de verse como un desecho y se conviertan en un recurso con valor potencial. Este enfoque puede contribuir a fortalecer la sostenibilidad del sector acuícola y apoyar la seguridad alimentaria en los próximos años (Morris et al., 2019). Las conchas, al ser el principal subproducto del cultivo y consumo de moluscos, pueden integrarse de manera útil en esquemas de aprovechamiento y economía circular. Su destino depende en gran medida de quién genera el residuo: productores acuícolas,

empresas procesadoras, restaurantes o consumidores. Por ejemplo, en Europa es común que mejillones, almejas y vieiras se comercialicen y sirvan con concha, o bien que se procesen para su venta enlatada o congelada sin ella; en el caso de los ostiones, suelen llegar completos a los restaurantes y consumirse en media concha. En contraste, en varios países de Asia los moluscos se procesan con mayor frecuencia desde el sitio de cosecha, por lo que una parte considerable de las conchas se retira tempranamente y suele desecharse en el mar o acumularse en zonas costeras (Morris et al., 2019).

Hasta ahora se han documentado diversas alternativas para aprovechar los residuos de conchas de moluscos y transformarlos en materiales de valor. En los últimos años, este tema ha despertado un interés creciente, reflejado en la publicación de varias revisiones científicas enfocadas en su valorización. Algunos trabajos han señalado que las conchas marinas pueden emplearse como sustitutos parciales de la caliza natural, reduciendo así la presión sobre este recurso, y han comparado usos tradicionales y actuales en áreas como el mejoramiento de suelos, la biorremediación, la catálisis y



la elaboración de materiales de construcción (Jović et al., 2019). Otros estudios han destacado que estos residuos pueden considerarse

biomateriales con relevancia ambiental y económica, especialmente porque su manejo sigue siendo uno de los principales retos para el desarrollo sostenible de la acuicultura de moluscos (Morris et al., 2019).

El aprovechamiento de las conchas también se ha estudiado dentro del marco de los servicios ecosistémicos que aporta la acuicultura de bivalvos, reconociendo que su reutilización puede generar beneficios no alimentarios adicionales (Olivier et al., 2018). En años recientes, diversas revisiones han propuesto incorporar estas alternativas en modelos de economía circular y acuicultura responsable, en los que los subproductos dejan de considerarse residuos y se reincorporan a nuevas cadenas de valor (Zhan y Wang, 2021; Alonso et al., 2020). En regiones con alta producción acuícola, la valorización de estos residuos se ha planteado como una estrategia para fortalecer la bioeconomía circular local (Fraga-Corral et al., 2021). En este contexto, las aplicaciones de las conchas de

moluscos se han diversificado hacia distintos sectores. La literatura publicada desde el año 2000 señala que pueden emplearse en la agricultura, como acondicionadores de suelo o suplementos para alimentación animal; en procesos de remediación ambiental, para el tratamiento de suelos, agua y aguas residuales; y en la industria de la construcción, como sustitutos del carbonato de calcio extraído de fuentes minerales en morteros y concretos. Asimismo, se han evaluado como materiales para catálisis heterogénea en la producción de biodiésel y como biofiltros (Summa et al., 2022). Además de estas aplicaciones principales, se han propuesto usos más especializados y de menor escala en áreas como la cosmética, la biomedicina y la remoción de metales pesados presentes en agua y aire (Jović et al., 2019).

1.1 ¿De qué están hechas las conchas?

Aunque muchas veces se consideran basura, las conchas de moluscos son materiales biológicos altamente organizados. Las conchas de moluscos marinos están formadas por matrices inorgánicas y orgánicas (Fig. 2). El carbonato de calcio es el componente inorgánico predominante (99%) (Lowenstam y Weiner, 1989), acompañado de otras sales inorgánicas, como óxido de sodio, dióxido de silicio, óxido de magnesio y óxido de aluminio, así como de diversos elementos minerales (Wu et al., 2024). Entre los elementos principales

presentes en estas conchas se encuentran calcio (Ca), magnesio (Mg), sodio (Na), cloro (Cl), azufre (S), fósforo (P) y potasio (K). También contienen elementos traza como hierro (Fe), cobre (Cu), zinc (Zn), cromo (Cr), níquel (Ni), estroncio (Sr), manganeso (Mn), vanadio (V), bromo (Br), molibdeno (Mo), selenio (Se) y cobalto (Co). Algunos de estos elementos traza son esenciales para el metabolismo humano y la función inmunológica; sin embargo, la presencia de elementos potencialmente dañinos, como plomo (Pb), cadmio (Cd), arsénico (As) y mercurio (Hg), plantea preocupaciones de seguridad en sus aplicaciones prácticas (Si et al., 2014).

Aunque la composición mineral exacta varía considerablemente entre especies, los estudios publicados ofrecen rangos aproximados para los elementos mayores y traza. El magnesio suele representar entre 0.2 y 1.2 % del peso seco de la concha, el sodio entre 0.1 y 0.8 %, y el fósforo entre 0.05 y 0.3 %.

Por su parte, elementos traza como hierro, cobre, zinc, estroncio y manganeso generalmente se encuentran en concentraciones inferiores al 0.01–0.1 % del peso seco. Estos valores pueden variar ampliamente según la especie, el origen geográfico, las condiciones ambientales y los métodos analíticos utilizados. Mientras que los elementos traza esenciales contribuyen al funcionamiento fisiológico normal, los elementos potencialmente tóxicos pueden encontrarse en niveles que van de microgramos por kilogramo a miligramos por kilogramo, lo que subraya la necesidad de realizar evaluaciones rigurosas de seguridad. La matriz orgánica está compuesta por una mezcla compleja de proteínas, polisacáridos, lípidos y pigmentos. Aunque todavía existe poca información cuantitativa completa, los estudios disponibles indican que las proteínas constituyen aproximadamente entre 0.1 y 2 % del peso seco de la concha (Lowenstam y Weiner, 1989), mientras que la quitina y otros polisacáridos representan en conjunto entre 0.1 y 1 %, dependiendo de la especie y del tipo de capa de la concha (Wu et al., 2024). Los lípidos y pigmentos se encuentran únicamente en cantidades traza.

Debido a la baja abundancia de los componentes orgánicos y a la dificultad de separar las proteínas solubles e insolubles de la matriz, que están fuertemente unidas a otros componentes, la cuantificación y caracterización sistemática entre especies sigue siendo limitada.

Las proteínas de la matriz de la concha, esenciales para dirigir y regular la biomineralización, suelen clasificarse en proteínas solubles e insolubles. Las proteínas insolubles están estrechamente unidas a la quitina, lo que dificulta su estudio; en cambio, las proteínas solubles pueden aislarse e identificarse mediante estudios de proteómica, genómica y transcriptómica (Song et al., 2019). Los polisacáridos, particularmente la quitina, forman una parte importante de la matriz orgánica y están ampliamente presentes en las conchas (Rajan et al., 2024). También se ha confirmado la presencia de lípidos en conchas de moluscos marinos mediante espectroscopía infrarroja, con variaciones notables entre especies (Farre y Dauphin, 2009). Asimismo,



Figura 3. Aplicaciones de las conchas de moluscos. Imagen generada con IA.

pigmentos como carotenoides, melaninas y tetrapirroles, incluidas porfirinas y pigmentos biliares, han sido identificados como los principales pigmentos presentes en estas conchas (Williams, 2017). Esta combinación de minerales y compuestos orgánicos hace que las conchas sean resistentes, abundantes y potencialmente útiles para diferentes aplicaciones (Fig. 3).

2. Aplicaciones en agricultura

En agricultura, una de las aplicaciones más prometedoras de las conchas de moluscos se relaciona con su uso como fuente natural de carbonato de calcio, compuesto que puede contribuir al mejoramiento de ciertos tipos de suelo. Al ser pulverizadas, las conchas pueden funcionar como un material mineral capaz de modificar propiedades físicas y químicas del suelo, especialmente en aquellos con problemas de acidez, baja estabilidad o comportamiento expansivo. Estudios recientes han señalado que las conchas marinas contienen altas proporciones de compuestos derivados del calcio, por lo que pueden emplearse como aditivos para mejorar la resistencia, reducir la expansión y aumentar la estabilidad de suelos problemáticos. En un estudio realizado en Panamá, la adición de residuos de concha marina pulverizada, combinada con cemento, permitió mejorar notablemente la capacidad de carga de un suelo expansivo, lo que evidencia el potencial de estos residuos como materiales estabilizantes y como alternativa para reducir el uso de recursos minerales convencionales (Montenegro et al., 2024). Aunque su aplicación agrícola requiere evaluaciones específicas de inocuidad, granulometría, composición química y efecto sobre el pH, los estudios realizados con residuos de conchas de moluscos indican que estos materiales pueden actuar como enmiendas calcáreas, elevar el pH de suelos ácidos y mejorar la disponibilidad de algunos nutrientes (Lee et al., 2008; Topić Popović et al., 2023; Lolas et al., 2024). Por ello, podrían integrarse en estrategias de manejo sostenible de suelos basadas en la economía circular y el aprovechamiento de residuos pesqueros y acuícolas.

Otra alternativa para aprovechar los residuos de conchas de moluscos molidos es convertirlos en fosfatos de calcio de valor agrícola. Tradicionalmente, las rocas fosfóricas se han utilizado como fuente de fósforo para producir ácido fosfórico (Merkel y Hoyer, 2012) y fertilizantes (Zohuri, 2020); sin embargo, su baja solubilidad en la humedad del suelo provoca una liberación lenta del fósforo, lo cual limita su utilidad en sistemas agrícolas modernos que requieren nutrientes de disponibilidad más rápida (Nasri et al., 2014). En este contexto, los fosfatos de calcio obtenidos a partir de conchas de moluscos, como el superfosfato triple, el fosfato monocálcico y el fosfato dicálcico, representan una opción prometedora, ya que son materiales ricos en fósforo, de alta pureza y con potencial aplicación como fertilizantes o suplementos minerales para alimentación animal (Laohavisuti et al., 2025). Además, su producción mediante procesos simples, económicos y ambientalmente amigables permite reducir la acumulación de residuos de conchas y convertirlos en productos de valor agregado, contribuyendo a estrategias de manejo sustentable y economía circular.

Algunos desarrollos más modernos emplean las conchas como materia prima para producir nanopartículas de óxido de calcio (CaO), como una alternativa sustentable para el control del gorgojo del frijol (*Callosobruchus maculatus*), una plaga que afecta semillas almacenadas (Madesh et al., 2025). Estas nanopartículas pueden adherirse a la superficie del insecto, provocando daño físico, deshidratación y muerte. En la dosis más alta evaluada (400 mg/100g), se observó una mortalidad del 100% al tercer día. Además de su efecto insecticida, las semillas de frijol mungo tratadas con nanopartículas de CaO mostraron mejoras en la germinación, longitud de raíz y brote, vigor de las plántulas y otros rasgos asociados al crecimiento (Madesh et al., 2025).

3. Conchas para remediación ambiental

Las conchas de moluscos representan una alternativa prometedora para la biorremediación de aguas contaminadas, especialmente por su abundancia como residuo biológico, bajo costo y composición rica en carbonato de calcio. Diversos estudios han demostrado que estos materiales pueden actuar como biosorbentes, es decir, como superficies capaces de retener o inmovilizar contaminantes presentes en el agua, incluyendo metales pesados y nutrientes en exceso.

Un ejemplo es el uso de conchas del bivalvo *Meretrix lusoria* para remover iones tóxicos de cadmio (Cd^{2+}) y plomo (Pb^{2+}) en agua contaminada. En este estudio, las conchas fueron evaluadas bajo diferentes condiciones de pH, tiempo de contacto, concentración inicial de metales, dosis del biosorbente y temperatura. Los mejores resultados se obtuvieron a pH 6.0, con un tiempo de contacto de 90 minutos y una dosis de 1 g de concha por cada 100 mL de solución. Bajo estas condiciones, se logró remover 90.6% de Cd^{2+} y 91.5% de Pb^{2+} (Al-Mur et al., 2024).

Otras especies que se han probado son las conchas de almeja *Mercenaria mercenaria* y de ostión *Crassostrea virginica* pueden inmovilizar rápidamente altas concentraciones de plomo. En comparación con carbonatos de calcio de origen geológico, los materiales de concha biomineralizada han mostrado una capacidad mucho más rápida para secuestrar iones metálicos. Por ejemplo, una solución con 10,000 mg/L de Pb puede reducirse a menos de 0.5 mg/L en solo cinco minutos usando concha triturada de *M. mercenaria*. A concentraciones iniciales más altas, las conchas de almeja y ostión pueden extraer casi el doble de su propio peso en plomo, esto es posible debido al intercambio de calcio por plomo dentro de la fracción inorgánica de la concha, además de la influencia de la matriz orgánica y la superficie disponible del material (Tudor et al., 2006).

Otro caso relevante es el polvo de concha del mejillón de agua dulce *Lamellidens marginalis*, evaluado para remover cadmio en sistemas acuáticos. Este residuo mostró una capacidad de bioadsorción de 18.18 mg/g a pH 6.0. Además del cadmio, también presentó capacidad para adsorber zinc y plomo, con valores máximos de 10.64 mg/g para Zn y 8.06 mg/g para Pb. La remoción de metales podría estar relacionada con procesos de intercambio iónico con elementos como Fe, Al, Si, Co y Ca, así como con la participación de grupos funcionales presentes en la superficie del material $-\text{OH}$, $-\text{C}=\text{O}$, $-\text{C}=\text{C}$ y $-\text{C}-\text{C}$ (Hossain et al., 2015).

Además de su uso en la remoción de metales pesados, las conchas de moluscos también pueden aplicarse para retirar nutrientes en exceso, como el fósforo, de aguas salinas. En sistemas de recirculación acuícola en agua de mar, se ha evaluado la eficiencia de conchas de ostión naturales y calcinadas para remover fósforo. Las conchas naturales lograron remover más del 56% del fósforo, mientras que las conchas calcinadas han mostrado remociones superiores al 98%. En las conchas naturales, el mecanismo principal fue la adsorción, mientras que en las conchas calcinadas también participó la precipitación (Martins et al., 2017).

Estos estudios muestran que las conchas de moluscos pueden dejar de ser consideradas un residuo y convertirse en materiales funcionales para el tratamiento de aguas contaminadas. Su capacidad para remover cadmio, plomo, zinc y fósforo evidencia su potencial dentro de estrategias de biorremediación, economía circular y manejo sustentable de residuos de origen marino y dulceacuícola.

4. Uso en construcción y materiales

Las conchas de moluscos también han despertado interés como materia prima alternativa para el sector de la construcción. Este enfoque se basa en los principios de reducir, reutilizar y reciclar residuos biogénicos, especialmente aquellos generados por la acuicultura, la pesca y la industria alimentaria. Debido a su composición rica en carbonato de calcio, las conchas pueden emplearse como sustitutos parciales de agregados, arenas, rellenos minerales o incluso como componentes en mezclas cementantes, lo que permitiría disminuir el uso de materias primas vírgenes y reducir el impacto ambiental asociado a la producción de cemento y concreto.

En un estudio realizado en Panamá, la adición de residuos de concha marina pulverizada, combinada con cemento, permitió mejorar notablemente la capacidad de carga de un suelo expansivo, lo que evidencia el potencial de estos residuos como materiales estabilizantes y como alternativa para reducir el uso de recursos minerales convencionales (Montenegro et al., 2024).

Las conchas y sus cenizas pueden emplearse como reemplazo parcial o total del agregado grueso y del cemento Portland ordinario, respectivamente. Cuando las conchas son calcinadas a 800 °C, sus cenizas presentan constituyentes químicos comparables con los de materiales puzolánicos, los cuales son materiales naturales derivados de la ceniza volcánica y contienen sílice, lo que le confiere propiedades cementosas (Santamaria, 1963). Además, las propiedades físicas y la distribución de tamaño de las conchas permiten su uso como agregado grueso para producir concretos ligeros sin comprometer de manera importante la resistencia. El concreto elaborado con agregados de concha mantiene su durabilidad hasta temperaturas máximas de 300 °C, mientras que los concretos con cemento mezclado con ceniza de concha presentan menor pérdida de resistencia a la compresión bajo ataque por sulfatos (Adeyewi et al., 2015).

Otra de las aplicaciones en la industria de la construcción es su uso como agregados reciclados en morteros y concretos, mejor conocido como morteros biocompuestos verdes, estos se han estudiado utilizando conchas de

mejillón provenientes de la industria conservera de pescado como sustituto total de la arena tradicional. La fabricación se realiza en condiciones ambientales de 20 °C y 65 % de humedad relativa, mediante pasos simples y reproducibles en una obra real. Aunque la sustitución total reduce la resistencia mecánica hasta 60% en flexión y 50% en compresión (Giosuè et al., 2025). Para conchas de mejillón empleadas como sustituto de arena en morteros, se han probado porcentajes de 25, 50 y 75 %, observándose que el reemplazo de 25% es el más adecuado para recubrimientos cementicios (Naik et al., 2024). Además, estos materiales presentan una densidad aparente hasta 30% menor y un comportamiento energético mejorado hasta 40%, lo que los vuelve atractivos para usos relacionados con eficiencia energética. El reciclaje de estas conchas también podría reducir aproximadamente a la mitad el costo de los materiales y disminuir los gastos asociados a la disposición de residuos de la industria pesquera (Leone et al., 2023).

Estas iniciativas, también se han probado a escala de edificación. En un edificio sustentable, las conchas de mejillón, subproducto de la industria conservera, se incorporaron en prácticamente todos los elementos constructivos. Se utilizaron como agregado en la cimentación de concreto, como componente de morteros para recubrimientos exteriores e interiores, y como material suelto de relleno para el aislamiento de piso, muros y techo. Las pruebas de laboratorio y el proceso constructivo mostraron un edificio de bajo consumo energético, con un consumo de energía primaria de 86 kWh/m² por año, valor 28.3% menor al límite establecido por Passive House (Martínez-García et al., 2021). Por lo anterior, su uso resulta especialmente prometedor en aplicaciones no estructurales, recubrimientos, divisiones ligeras, concretos de baja densidad, materiales aislantes y edificaciones con criterios de sustentabilidad y economía circular.

5. Restauración ambiental

Las conchas de moluscos no solo son residuos con potencial de aprovechamiento industrial; también cumplen funciones ecológicas importantes en los ecosistemas acuáticos. En ambientes marinos y dulceacuícolas, las conchas son estructuras físicas abundantes, persistentes y ampliamente distribuidas que pueden modificar el hábitat y favorecer la presencia de otros organismos. Desde la perspectiva de la ingeniería ecosistémica, las conchas producidas por moluscos actúan como sustratos para la fijación de epibiontes, es decir, organismos que viven adheridos a otras superficies; además, proporcionan refugio contra depredadores, reducen el estrés físico o fisiológico y pueden influir en el transporte de partículas y solutos en el fondo acuático (Gutiérrez et al., 2003).

La presencia de conchas puede aumentar la complejidad del hábitat y generar microambientes que no estarían disponibles en fondos arenosos o lodosos. La colonización de estos espacios depende de características como el tamaño, forma, rugosidad y disposición espacial de las conchas. Cuando estas estructuras ofrecen recursos nuevos y existen especies capaces de aprovecharlos, pueden contribuir al aumento de la riqueza de especies a escala del paisaje. Por esta razón, los organismos productores de conchas y los bancos naturales de conchas no deben considerarse únicamente como recursos pesqueros, sino también como elementos clave para la conservación, restauración y manejo de hábitats acuáticos (Gutiérrez et al., 2003). En años recientes, esta función ecológica ha inspirado propuestas para reutilizar residuos de conchas en proyectos de restauración marina. La acuicultura de moluscos es considerada una actividad relativamente sustentable; sin embargo, el consumo de bivalvos genera grandes cantidades de conchas que con frecuencia terminan en vertederos o sitios de disposición poco adecuados. Esta situación representa un reto ambiental, pero también una oportunidad para transitar hacia una economía circular, donde los residuos de la industria pesquera y acuícola puedan reincorporarse a soluciones de restauración ambiental y economía azul (Corbau et al., 2023).

Un ejemplo innovador es el uso de conchas de almeja provenientes de residuos de la industria pesquera para fabricar bioarrecifes ecológicos mediante impresión 3D de gran formato. Courbau y cols. (2023), desarrollaron tres bioarrecifes diseñados para estabilizar el fondo marino y favorecer el incremento de la biodiversidad. Antes de ser colocados en el mar, estos arrecifes fueron colonizados con ostiones, con el objetivo de promover procesos de repoblamiento y facilitar el establecimiento de comunidades bentónicas. Esta estrategia combina reciclaje de residuos de conchas, innovación tecnológica y restauración marina, mostrando cómo un desecho puede transformarse en una estructura útil para recuperar hábitats y fortalecer la biodiversidad. Su uso en restauración representa una alternativa alineada con la economía circular, la economía azul y el manejo sustentable de ecosistemas costeros y acuáticos.

6. Actividades antimicrobianas y biocidas

Durante las últimas dos décadas, diversos estudios han documentado las propiedades antimicrobianas y antifúngicas del polvo de concha de ostión. Oikawa et al. (2000) observaron que el polvo de conchas calcinadas presentaba actividad antimicrobiana, retrasando el crecimiento de bacterias aerobias e inhibiendo el desarrollo de *Escherichia coli*. Este mismo efecto fue observado en la aplicación de 0.05% de polvo de concha de ostión en kimchi durante su almacenamiento, donde se observó una reducción de bacterias aerobias y favorecía el mantenimiento de bacterias lácticas (Choi et al. 2006). Este efecto antimicrobiano ha permitido incrementar la vida útil de diferentes productos tales como tofu, mediante la adición de 0.05-0.2% de polvo de concha de ostión (Kim et al., 2007), gat kimchi hasta por 80 días a 5 °C (Jung et al. 2010) e incluso jamón de puerco (Choi et al., 2014). De manera interesante esta propiedad antimicrobiana se ha observado solamente mediante la calcinación de conchas de ostión, almejas e incluso erizo de mar, con un efecto en microorganismos de interés alimenticio, tales como *Staphylococcus aureus*, *Listeria monocytogenes*, *Salmonella typhimurium*, *Enterobacter*

aerogenes y *Proteus vulgaris*, pero no mediante la adición de polvo de concha sin calcinar (Chen et al., 2015).

En cuanto a la actividad antifúngica, se ha demostrado que las conchas de ostión calcinadas, tratadas térmicamente a 1,050 °C y compuestas principalmente por CaO, poseen una fuerte actividad biocida contra *Physalospora piricola* y *Rhizoctonia solani* (Xing et al., 2013). Estos hallazgos han permitido estudios de combinaciones de matrices poliméricas como películas de propileno con conchas de ostión calcinadas para prolongar la vida útil de alimentos sin generar citotoxicidad (Tsou et al. 2019).

En años recientes también se han propuesto usos más especializados para las conchas de moluscos. Algunas investigaciones han explorado su potencial en cosmética, biomedicina, desarrollo de biomateriales, remoción de contaminantes y fabricación de productos de mayor valor agregado, los cuales no son revisado en esta revisión. Estas aplicaciones suelen requerir procesos más avanzados de transformación, purificación o modificación del material.

7.Retos para aprovechar las conchas

A pesar de su potencial, la valorización de conchas enfrenta varios desafíos. El primero es la recolección. Las conchas se generan en distintos puntos: granjas acuícolas, zonas de cosecha, plantas procesadoras, restaurantes, mercados y hogares. Esto dificulta su acopio ordenado y eleva los costos de transporte.

Otro reto importante es la limpieza. Las conchas suelen estar mezcladas con restos orgánicos, lo que puede generar malos olores, proliferación de microorganismos y problemas sanitarios. Por ello, antes de utilizarlas es necesario lavarlas, secarlas, triturarlas o someterlas a tratamientos específicos. Además, cada aplicación requiere diferentes niveles de procesamiento y control de calidad.

También existen retos normativos y económicos. Para que las conchas puedan integrarse a nuevas cadenas de valor se necesitan reglas claras, esquemas de trazabilidad, infraestructura de acopio y alianzas entre productores, empresas, autoridades, academia y consumidores. Sin estos elementos, el residuo puede seguir acumulándose aun cuando tenga potencial de aprovechamiento.

8.Oportunidades para México

México cuenta con regiones costeras donde la producción de ostiones, almejas y otros bivalvos forma parte de la economía local. Esto abre la posibilidad de diseñar estrategias regionales para aprovechar las conchas generadas por la acuicultura, la pesca y el consumo. Las cooperativas, restaurantes, plantas procesadoras y centros de investigación podrían participar en esquemas de acopio, transformación y uso de estos residuos.

En el contexto mexicano, algunas oportunidades incluyen el uso de conchas trituradas en agricultura, su evaluación como material para remediación ambiental, su incorporación controlada en materiales de construcción y su posible empleo en proyectos de restauración costera. Estas alternativas podrían generar beneficios ambientales, reducir residuos y crear nuevas oportunidades productivas en comunidades costeras.

Aprovechar las conchas no significa resolver todos los retos de la acuicultura, pero sí representa un paso importante hacia modelos más sostenibles. Cuando se gestionan adecuadamente, estos residuos pueden dejar de ser un problema y convertirse en una fuente de innovación, valor económico y soluciones ambientales.

9.Conclusión

Las conchas de moluscos muestran que algunos residuos solo son basura cuando no existe una estrategia para aprovecharlos. Su valorización permite mirar la acuicultura desde una perspectiva más completa: no solo como una fuente de alimento, sino también como una actividad capaz de generar materiales útiles para la agricultura, la construcción, la remediación ambiental, la restauración ecológica y la innovación tecnológica. En un

mundo que busca producir más alimentos con menor impacto, transformar las conchas en recursos puede ser una oportunidad para avanzar hacia una acuicultura más circular, limpia y sostenible.

10. Referencias

- Adeuwuyi, A.P., Shodolapo, O. F., & Ibrahim, K. A. (2015). Utilization of mollusc shells for concrete production for sustainable environment. *International Journal of Scientific & Engineering Research*, 6(9), 201–208.
- Al-Mur, B. A. (2024). Application of marine mollusk shells (*Meretrix lusoria*) as low-cost biosorbent for removing Cd^{2+} and Pb^{2+} ions from aqueous solution: Kinetic and equilibrium study. *Water*, 16, 2615.
- Alonso, A., Álvarez-Salgado, X., & Antelo, L. (2020). Assessing the impact of bivalve aquaculture on the carbon circular economy. *Journal of Cleaner Production*, 279, 123873.
- Chen, Y.-C., Lin, C.-L., Li, C.-T., & Hwang, D.-F. (2015). Structural transformation of oyster, hard clam, and sea urchin shells after calcination and their antibacterial activity against foodborne microorganisms. *Fisheries Science*, 81(4), 787–794.
- Choi, J.-S., Lee, H.-J., Jin, S.-K., Lee, H.-J., & Choi, Y.-I. (2014). Effect of oyster shell calcium powder on the quality of restructured pork ham. *Korean Journal for Food Science of Animal Resources*, 34, 372–377.
- Choi, Y. M., Whang, J. H., Kim, J. M., & Suh, H. J. (2006). The effect of oyster shell powder on the extension of the shelf-life of kimchi. *Food Control*, 17, 695–699.
- Comisión Nacional de Acuicultura y Pesca. (2021). Estado actual de la producción de moluscos bivalvos en México. CONAPESCA, Gobierno de México.
- Corbau, C., Nardin, W., Vaccaro, C., Vona, I., & Simeoni, U. (2023). Experimental design and field deployment of an artificial bio-reef produced by mollusk shell recycling. *Marine Environmental Research*, 183, 105833.
- Farre, B., & Dauphin, Y. (2009). Lipids from the nacreous and prismatic layers of two pteriomorpha mollusc shells. *Comparative Biochemistry and Physiology Part B: Biochemistry and Molecular Biology*, 152, 103–109.
- FAO. 2026. The State of World Fisheries and Aquaculture 2026 – Blue Transformation: turning vision into impact. Rome. <https://doi.org/10.4060/cd8357en>
- Fraga-Corral, M., Ronza, P., Garcia-Oliveira, P., Pereira, A., Losada, A., Prieto, M., Quiroga, M., & Simal-Gandara, J. (2021). Aquaculture as a circular bio-economy model with Galicia as a study case: How to transform waste into revalorized by-products. *Trends in Food Science & Technology*, 119, 23–35.
- Giosuè, C., Jbr, R., González-Camejo, J., Andreola, C., Ruello, M. L., Eusebi, A. L., Fatone, F., & Corinaldesi, V. (2025). Supplementary cementitious material from food industry: Closing the loop using mollusk seashell waste. *Construction and Building Materials*, 492, 143013.
- Gutiérrez, J. L., Jones, C. G., Strayer, D. L., & Iribarne, O. O. (2003). Mollusks as ecosystem engineers: The role of shell production in aquatic habitats. *Oikos*, 101, 79–90.
- Hossain, A., Bhattacharyya, S. R., & Aditya, G. (2015). Biosorption of cadmium by waste shell dust of freshwater mussel *Lamellidens marginalis*: Implications for metal bioremediation. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 3(1), 1–8.
- Jović, M., Mandić, M., Šljivić-Ivanović, M., & Smičiklas, I. (2019). Recent trends in application of shell waste from mariculture. *Studia Marina*, 32, 47–62.
- Jung, B. M., Jung, S. J., & Kim, E. S. (2010). Quality characteristics and storage properties of gat kimchi added with oyster shell powder and *Salicornia herbacea* powder. *Korean Journal of Food and Cookery Science*, 26, 188–197.
- Jung, J., Lee, J.-J., Lee, G., Yoo, K., & Sho, B.-H. (2012). Reuse of waste shells as a SO_2/NO_x removal sorbent. *En Material recycling—Trends and perspectives* (Vol. 13, pp. 301–322). InTech.
- Khan, M. D., Chottitupawong, T., Vu, H. H. T., Ahn, J. W., & Kim, G. M. (2020). Removal of phosphorus from an aqueous solution by nanocalcium hydroxide derived from waste bivalve seashells: Mechanism and kinetics. *ACS Omega*, 5, 12290–12301.
- Kim, Y. S., Choi, Y. M., Noh, D. O., Cho, S. Y., & Suh, H. J. (2007). The effect of oyster shell powder on the extension of the shelf life of tofu. *Food Chemistry*, 103, 155–160.

- Laohavisuti, N., Seangarun, C., Boonchom, B., Rungrorchaipon, P., Boonmee, W., & Seesanong, S. (2025). Upcycling bivalve mollusk shell wastes into triple super-, mono- and di-calcium phosphates for fertilizers and mineral animal feed. *Environmental Technology & Innovation*, 37, 103988.
- Lee, C. H., Lee, D. K., Ali, M. A., & Kim, P. J. (2008). Effects of oyster shell on soil chemical and biological properties and cabbage productivity as a liming material. *Waste Management*, 28(12), 2702–2708.
- Leone, R., Calà, A., Capela, M. N., Colajanni, S., Campisi, T., & Saeli, M. (2023). Recycling mussel shells as secondary sources in green construction materials: A preliminary assessment. *Sustainability*, 15, 3547.
- Lolas, A., Molla, K., Georgiou, K., Apostologamvrou, C., Petrotou, A., Skordas, K., & Vafidis, D. (2024). Evaluating the liming potential of *Mytilus galloprovincialis* shell waste on acidic soils. *Conservation*, 4(4), 778–791.
- Lowenstam, H. A., & Weiner, S. (1989). *On biomineralization*. Oxford University Press.
- Madesh, K., Kannan, M., Inbaraj, S., Dineshkumar, S., Govindaraju, K., Soundarajan, R. P., Senthilkumar, M., & Boopathi, N. M. (2025). Exploiting freshwater mollusk shell-based CaO nanoparticles: Preparation, characterization, insecticidal activity, antioxidant potential, and germination enhancement in greengram. *ACS Agricultural Science & Technology*, 5(4), 613–629.
- Martínez-García, C., González-Fontebao, B., Carro-López, D., & Pérez-Ordóñez, J. L. (2021). Assessment of mussel shells building solutions: A real-scale application. *Journal of Building Engineering*, 44.
- Martins, M. C., Santos, E. B. H., & Marques, C. R. (2017). First study on oyster-shell-based phosphorous removal in saltwater—A proxy to effluent bioremediation of marine aquaculture. *Science of the Total Environment*, 574, 605–615.
- Merkel, B., & Hoyer, M. (2012). Remediation of sites contaminated by radionuclides. En *Radionuclide behaviour in the natural environment* (pp. 601–645). <https://doi.org/10.1533/9780857097194.3.601>
- Montenegro, V., Hernández, D., Domínguez, A., Vergara, D., Arrocha, J. & González-Valoys, A. (2024). Estabilización de suelos expansivos en Panamá con mezclas de residuos de concha de mar. *Revista Politécnica*, 54, 45-52.
- Morris, J. P., Backeljau, T., & Chapelle, G. (2019). Shells from aquaculture: A valuable biomaterial, not a nuisance waste product. *Reviews in Aquaculture*, 11, 42–57.
- Naik, B., Paul, S., Choudhury, S. K., Sarangi, P. P., Mustakim, S. M., Swar, S. N., Jeet, S., & Jethy, B. (2024). A comprehensive study on utilization of shell wastes in construction industry. *Materials Today: Proceedings*, 115, 110–114.
- Nasri, K., Chtara, C., Hassen, C., Fiallo, M., Sharrock, P., Nzihou, A., & El Feki, H. (2014). Recrystallization of industrial triple super phosphate powder. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 53.
- Oikawa, K., Asada, T., Yamamoto, K., Wakabayashi, H., Sasaki, M., Sato, M., et al. (2000). Antibacterial activity of calcined shell calcium prepared from wild surf clam. *Journal of Health Science*, 46, 98–103.
- Olivier, A. V. D. S., Jones, L., Le Vay, L., Christie, M., Wilson, J., & Malham, S. K. (2018). A global review of the ecosystem services provided by bivalve aquaculture. *Reviews in Aquaculture*, 12, 3–25.
- Rajan, D.K., Mohan, K., Rajarajeswaran, J., Divya, D., Kumar, R., Kandasamy, S., Zhang, S. & Ganesa, A.R. (2024). B-Chitin and chitosán from waste shells of edible mollusks as a functional ingredients. *Food Frontiers*, 5, 46-72.
- Santamaria, F. S. (1963). Puzolanas y cementos puzolánicos. *Materiales de Construcción*, 13(111), 47–60.
- Si, W., A, R. N., Li, S. R., Zhang, J. X., Wu, W. Y., & Cui, Y. J. (2014). Comparative analysis of seven marine biological source of mineral drugs. *China Journal of Chinese Materia Medica*, 39, 3321–3325.
- Song, X., Liu, Z., Wang, L., & Song, L. (2019). Recent advances of shell matrix proteins and cellular orchestration in marine molluscan shell biomineralization. *Frontiers in Marine Science*, 6, 41.
- Summa, D., Lanzoni, M., Castaldelli, G., Fano, E. A., & Tamburini, E. (2022). Trends and opportunities of bivalve shells' waste valorization in a prospect of circular blue bioeconomy. *Resources*, 11, 48. <https://doi.org/10.3390/resources1105004>

Topić Popović, N., Lorencin, V., Strunjak-Perović, I., & Čož-Rakovac, R. (2023). Shell waste management and utilization: Mitigating organic pollution and enhancing sustainability. *Applied Sciences*, 13(1), 623.

Tsou, C.-H., Wu, C.-S., Hung, W.-S., De Guzman, M. R., Gao, C., Wang, R.-Y., et al. (2019). Rendering polypropylene biocomposites antibacterial through modification with oyster shell powder. *Polymer*, 160, 265–271. <https://doi.org/10.1016/j.polymer.2018.11.048>

Tudor, H. E. A., Gryte, C. C., & Harris, C. C. (2006). Seashells: Detoxifying agents for metal-contaminated waters. *Water, Air, & Soil Pollution*, 173, 209–242. <https://doi.org/10.1007/s11270-005-9060-3>

Williams, S. T. (2017). Molluscan shell colour. *Biological Reviews*, 92, 1039–1058.

Wu, L. Z., Guo, R., Zhu, Y. Y., Liu, X., Li, W. D., Cai, B. C., & Qin, K. M. (2024). Research progress on chemical composition and calcination mechanism of marine shellfish traditional Chinese medicine. *Journal of Chinese Medicinal Materials*, 3, 774–778.

Xing, R., Qin, Y., Guan, X., Liu, S., Yu, H., & Li, P. (2013). Comparison of antifungal activities of scallop shell, oyster shell and their pyrolyzed products. *Egyptian Journal of Aquatic Research*, 39, 83–90.

Zhan, J., Lu, J., & Wang, D. (2021). Review of shell waste reutilization to promote sustainable shellfish aquaculture. *Reviews in Aquaculture*, 14, 477–488.

Zohuri, B. (2020). Nuclear fuel cycle and decommissioning. En *Nuclear reactor technology development and utilization* (pp. 61–120).

Cita:

Rivera-Perez, C. (2026). Valorización de las conchas de moluscos. *Biotechnológica Magazine*, 4(4), 17–29. <https://doi.org/10.5281/zenodo.22216787>.



Sobre el autor

Investigador Titular A del Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste S.C. Responsable Académico del Laboratorio de Bioquímica, sus líneas de investigación incluyen el estudio de la biomineralización de moluscos y el aprovechamiento de recursos marinos.



Carbohidratos: más que energía para las plantas

Amanda Ortiz Calderon, Ernesto García Pineda*

Instituto de Investigaciones Químico-Biológicas, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Ciudad Universitaria, Morelia, Michoacán, C.P. 58030. 1426014g@umich.mx.

*Instituto de Investigaciones Químico-Biológicas, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Ciudad Universitaria, Morelia, Michoacán, C.P. 58030. egpineda@umich.mx.

Foto: Leung Cho Pan

Tema

El texto se centra en analizar la relevancia multidimensional de los carbohidratos en los diversos aspectos de la vida vegetal. Su enfoque principal radica en describir que los carbohidratos, como la sacarosa y el almidón, trascienden su función tradicional como fuentes de energía y almacenamiento para actuar como reguladores clave del crecimiento, el desarrollo y los mecanismos de defensa de las plantas. A través de un recorrido que abarca desde la producción fotosintética hasta su transporte a órganos no fotosintéticos, el texto describe cómo estas biomoléculas operan como indicadores del estado energético, de señales para determinar el destino celular y componentes estructurales de la pared celular. Finalmente, el escrito vincula estos conocimientos con un panorama futuro orientado a la biotecnología y la ingeniería metabólica, buscando optimizar la productividad agrícola y la seguridad alimentaria ante retos ambientales como el cambio climático.

1.Introducción

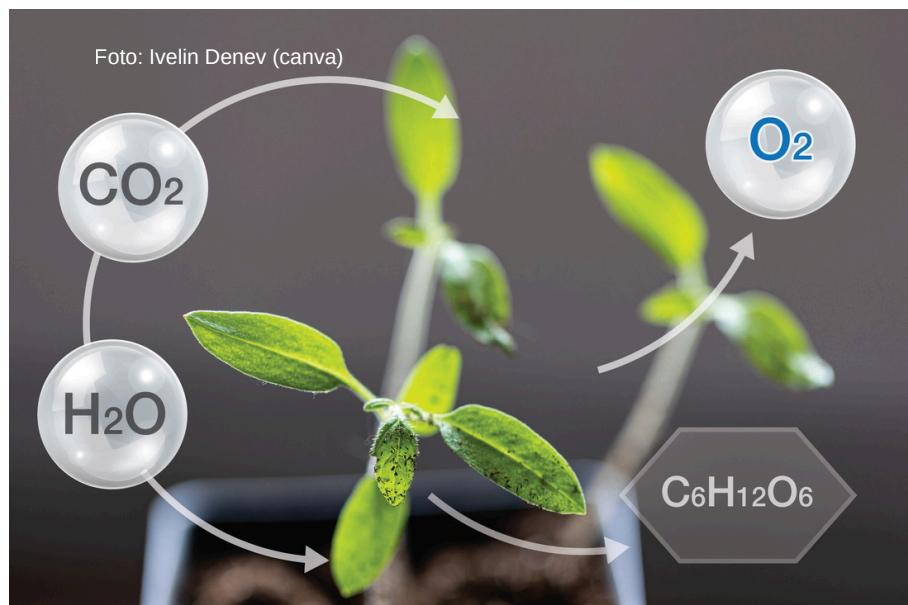
Seguramente habrás escuchado hablar de las moléculas que nos proporcionan energía, ¿verdad?. Estas moléculas las consumimos en grandes cantidades en alimentos de origen vegetal, y se conocen comúnmente como carbohidratos. También las conocemos como glúcidos, hidratos de carbono, sacáridos o comúnmente como azúcares. Se componen químicamente de carbono, hidrógeno y oxígeno. Por lo general, sus átomos de carbono forman una cadena que sería algo parecido al esqueleto, donde cada uno puede unirse a oxígenos e hidrógenos, ya sea de manera individual o conjunta, lo que genera la gran variedad de azúcares que podemos encontrar en la naturaleza. Los carbohidratos son moléculas asombrosas y aunque una de sus funciones bien conocidas es la de proporcionar energía a las células, en las plantas cumplen además otras funciones biológicas igualmente importantes. De manera particular, en este

espacio comentaremos cómo estas moléculas pueden contribuir a diversos aspectos en el metabolismo y defensa de las plantas.

2.Desde su producción hasta su destino final: los órganos no fotosintéticos

Si bien todos los organismos necesitamos carbohidratos para obtener la energía necesaria para crecer y cubrir nuestros requerimientos metabólicos, las plantas y los animales los obtienen de manera diferente. Mientras que los animales obtienen carbohidratos de su alimentación y regulan sus concentraciones mediante dieta y el ejercicio, por su parte, las plantas tienen que realizar procesos químicamente más complejos para su obtención, la regulación de sus niveles, y su almacenamiento. Estos procesos son más complejos en las plantas al tratarse de organismos que no pueden moverse y, por lo tanto, están altamente influenciados por las condiciones de su entorno.

En este sentido, la fotosíntesis es un proceso bioquímico que realizan las plantas y algunas algas para obtener los carbohidratos que necesitan. Para ello, utilizan estructuras que se asemejan a los paneles solares, ya que se encargan de transformar la energía del sol en energía química. Estas estructuras se conocen como cloroplastos y se encuentran en los órganos fotosintéticos, como las hojas. Los carbohidratos producidos durante la fotosíntesis se utilizan como combustible, y en una amplia variedad de procesos como el crecimiento, el desarrollo, la defensa y como moléculas que transmiten señales en las plantas.



Durante la fotosíntesis, las plantas toman dióxido de carbono (CO_2) y la luz solar del entorno y son transformados en azúcares sencillos como las triosas fosfato, un tipo de azúcar que puede ser utilizado para formar azúcares más complejos como el almidón. El almidón es importante porque es el principal carbohidrato de almacenamiento de energía en las plantas. Suele almacenarse a largo plazo en estructuras especializadas como la raíz y las semillas, y se le conoce como almidón de reserva. Existe también el almidón de uso rápido, el cual se produce en las hojas y se le conoce como almidón transitorio. El almidón transitorio se metaboliza por la noche para obtener azúcares más simples, como la glucosa y la maltosa.

Lo interesante de las triosas fosfato producidas en la fotosíntesis, es que también pueden usarse para la obtención de otros azúcares. Por ejemplo, al ser enviadas al caldo acuoso de la célula, que se llama citosol, se usan para formar azúcares complejos como la sacarosa. La sacarosa es el carbohidrato que conocemos como azúcar de mesa y que consumimos en abundancia. Está formada a su vez por dos carbohidratos más sencillos, la glucosa y la fructosa. La sacarosa es el principal azúcar producido durante la fotosíntesis y se transporta a todas las estructuras de las plantas. Así, las plantas utilizan a la sacarosa como la principal forma de transporte de carbohidratos en las plantas. Esto es porque es un carbohidrato poco reactivo químicamente, y debido a esta característica se le conoce como un azúcar no reductor (no reacciona fácilmente con otras

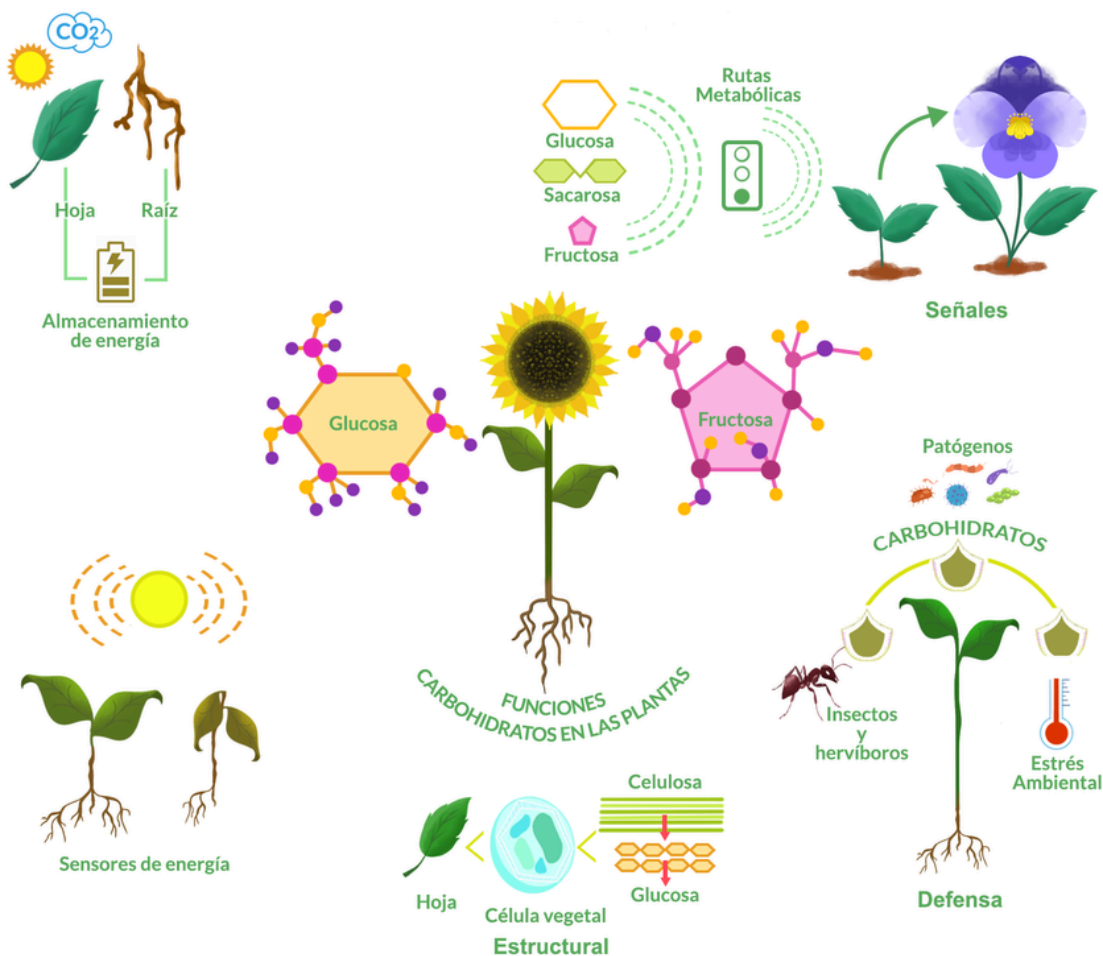


Figura 1. Durante el día, las hojas de las plantas funcionan como fábricas solares que, mediante la fotosíntesis, transforman la luz del sol y el dióxido de carbono (CO_2) en carbohidratos simples. A partir de estas moléculas se sintetiza la glucosa, la cual sirve como punto de partida para fabricar almidón, la reserva de energía de la planta, y sacarosa, la forma de transporte de los carbohidratos en la planta. La sacarosa viaja a través del floema (la red de autopistas internas de la planta) para alimentar a todos los órganos que no pueden hacer fotosíntesis, como las raíces, los frutos o las flores.

moléculas), y por lo tanto, no sufre modificaciones durante su traslado. La sacarosa se transporta a los órganos, incluyendo los no fotosintéticos, como la raíz, las flores o los frutos, ya que estos requieren una alta demanda de azúcares y no pueden producirlos por sí mismos.

El transporte de la sacarosa se realiza a través de estructuras vegetales especializadas llamadas tejidos vasculares, como el floema, que es parte de lo que podríamos imaginarnos como el sistema circulatorio de una planta. De igual manera, se necesita de

moléculas transportadoras especializadas que funcionan como un taxi y que le permiten salir de unas células vegetales y entrar en otras, en los diferentes tejidos de la planta. Esto parece fácil, pero el sistema de transporte de los carbohidratos es más complejo de lo que parece. Existen transportadores de carbohidratos que únicamente movilizan a la sacarosa y no otros azúcares, y hay los que solo permiten su ingreso al interior de la célula, otros solo su salida, o los que realizan ambos movimientos (Fig. 1).

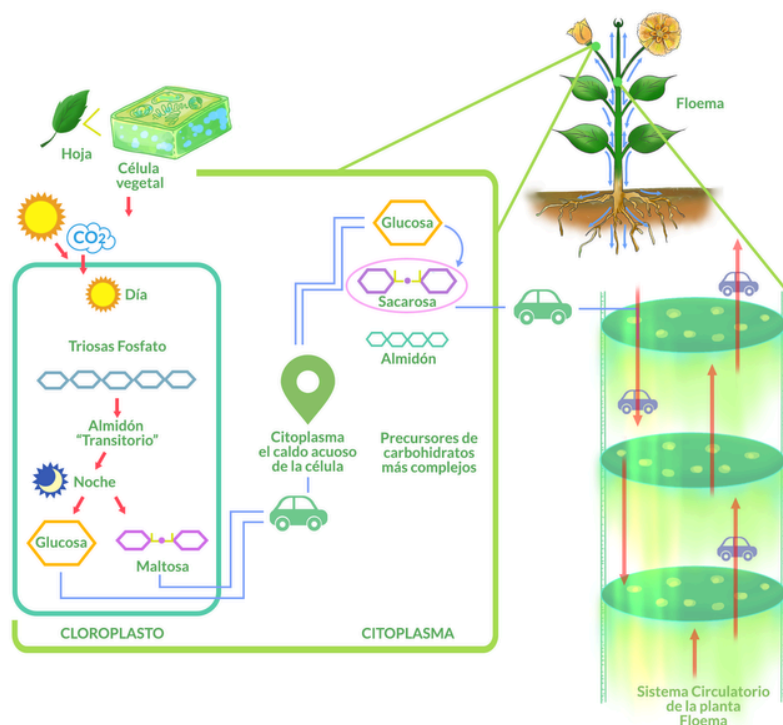


Figura 2. No todas las partes de una planta pueden elaborar su propio alimento. Órganos como las semillas, las raíces, las flores y los frutos no tienen la capacidad de realizar la fotosíntesis, por lo que dependen enteramente del azúcar que producen las hojas. Funcionan como centros de consumo que demandan energía constantemente para poder germinar, crecer, florecer y madurar.

Una vez en los tejidos no fotosintéticos, la sacarosa puede ser utilizada como fuente de energía de inmediato, ser almacenada en compartimentos celulares especializados como la vacuola, o también ser utilizada por proteínas llamadas enzimas que se encargan de dividir esta molécula para obtener azúcares más sencillos como la glucosa o la fructosa, que son la base para construir una amplia gama de carbohidratos más complejos. Los procesos que en conjunto permiten que los carbohidratos lleguen desde las hojas (conocidos como órganos fuente porque ahí se producen) hasta sus órganos de destino, conocidos como consumidores, suelen ser muy complejos y altamente regulados (Fig. 2). Ahora bien, algo interesante es ¿Para qué utilizan los carbohidratos las plantas?

3. Funciones de los carbohidratos en las plantas

3.1 Fuente de energía

La función que sabemos de los azúcares es la de proveer energía, pero ¿cómo es que las plantas transforman estas moléculas y las utilizan para su crecimiento y desarrollo?

Pues bien, una vez que los azúcares están disponibles y las células necesitan consumirlos, se utilizan de acuerdo con los requerimientos energéticos en los diferentes órganos de la planta. Esto puede estar determinado en gran medida por la edad, la etapa de desarrollo, o el entorno. Cuando la célula crece o se divide, los carbohidratos son introducidos en la célula donde comienzan a ser degradados, y junto al oxígeno que se toma del entorno, continúan su degradación en las mitocondrias, que funcionan como la central eléctrica de la célula. Estas se encargan de producir la molécula que utiliza la célula para almacenar y transportar energía llamada adenosina trifosfato (ATP), la cual es la principal moneda de energía en la célula. Esto sucede en un proceso llamado respiración celular, y se realiza en todas las células de la planta.

Sin embargo, esta no es la única función de los azúcares en las plantas. Los carbohidratos son tan maravillosos que sus funciones, además de proporcionar energía, van desde brindar soporte y estructura a los tejidos hasta funciones de defensa o estar relacionadas con hormonas vegetales. A continuación, mencionaremos otras funciones de estas moléculas en las plantas.

3.2 Indicadores del estado energético en la planta

El estado energético de la planta, considerado como el nivel de carbohidratos en sus tejidos, determina su comportamiento ante su entorno. Una alta acumulación de almidón en los órganos de reserva indica un superávit energético ideal para etapas exigentes como la floración o el rebrote. Si disminuye su acumulación, esto representa una alerta que se percibe como un estado de inanición, el cual puede ser provocado por estrés o falta de luz. En estas condiciones, el almidón se convierte en azúcares solubles para funcionar como un mecanismo de defensa en contra de la deshidratación; además, hay proteínas en la célula que detectan de forma continua estas concentraciones de azúcares para regular genéticamente si la planta debe invertir sus recursos en crecer y reproducirse o frenar el desarrollo para priorizar su supervivencia.

3.3 Estructural

Los carbohidratos cumplen una función estructural indispensable en las plantas al formar una estructura rígida llamada pared celular, la cual proporciona soporte mecánico, forma y protección a cada célula vegetal. El principal componente es la celulosa, una molécula formada por una gran cantidad de unidades de glucosa que forman microfibras que rodean a la célula. Son estructuras altamente resistentes y permiten a los tejidos soportar la presión ejercida por el agua en su interior (presión de turgencia) y mantener la estructura de la planta. En la pared celular además de la celulosa se encuentra la pectina, un polisacárido soluble que funciona como un agente gelificante y cementante entre las paredes celulares de las células. Es especialmente abundante en las cáscaras de frutas como manzanas y cítricos, y es la que le proporciona la consistencia que conocemos a las mermeladas.

3.4 Defensa contra estrés y patógenos

Los carbohidratos operan como mediadores centrales de la inmunidad vegetal funcionando como señales de alarma. Ante la invasión de un patógeno o una herida, la planta moviliza rápidamente la síntesis de un carbohidrato llamado calosa, formada por unidades de glucosa, para crear tapones entre las células, y reforzar la pared celular en el sitio de infección, aislando físicamente la amenaza. Además, cuando las enzimas de los patógenos degradan la pared vegetal para invadir el tejido, se liberan fragmentos de pectina denominados oligogalacturonidos que son reconocidos por receptores de la membrana de la misma célula vegetal, desencadenando una potente cascada de señalización que induce la acumulación de especies reactivas de oxígeno (ERO), la síntesis de fitoalexinas (antimicrobianos naturales) y la activación de respuestas a través de la producción de hormonas vegetales clave como el ácido salicílico y el ácido jasmónico. Asimismo, un alto nivel de azúcares solubles (como fructosa y glucosa) en el tejido infectado reprime los genes fotosintéticos y estimula la respiración celular, garantizando la producción de energía metabólica para sostener estas costosas respuestas inmunitarias.

3.5 Los carbohidratos funcionan como señales

Es una de las funciones menos conocidas, pero la más compleja por todo lo que involucra y/o pueden desencadenar. Los carbohidratos actúan como señales que regulan el desarrollo en las plantas al funcionar como mediadores que determinan el destino celular, la transición de fases del ciclo de vida y la arquitectura (forma) de la planta, en estrecha interacción con las hormonas vegetales. Así, en etapas tempranas de la vida de las plantas, la glucosa promueve la división celular y la diferenciación del meristemo de la raíz y de la parte aérea. El meristemo es el tejido vegetal responsable del crecimiento de la planta porque ahí se originan todos los demás tejidos

y órganos a lo largo de su vida. Durante la transición del crecimiento a la etapa reproductiva (formación de los frutos), la sacarosa actúa como la señal metabólica clave que informa al meristemo apical de la disponibilidad de reservas energéticas para inducir la floración. Asimismo, los gradientes de sacarosa regulan la formación de las ramas laterales en conjunto con las hormonas llamadas auxinas, mientras que, en la fase de formación de los frutos, los azúcares modulan la expresión de genes que desencadena el llenado y la senescencia de los frutos, demostrando que la disponibilidad de carbono no solo alimenta el desarrollo, sino que lo dirige activamente (Fig. 3).

4. Panorama a futuro

Uno de los retos que persisten a lo largo de los años es mejorar el crecimiento de las plantas de interés económico. Para ello, se realiza investigación sobre herramientas biotecnológicas que permitan mejorar la síntesis, el transporte y el almacenamiento de carbohidratos en las plantas. El futuro del estudio de los carbohidratos en las plantas se encamina hacia la agrotecnología de precisión y la ingeniería metabólica para garantizar la seguridad alimentaria frente al cambio climático.

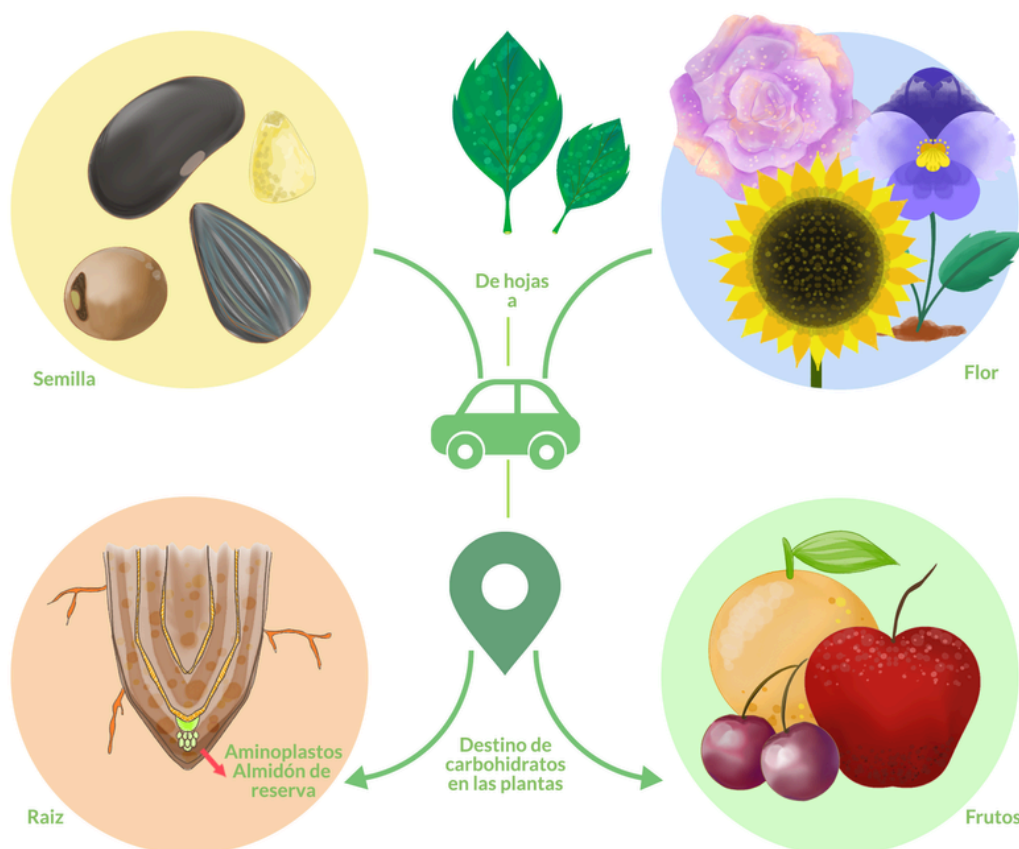


Figura 3. Los azúcares en las plantas funcionan como su fuente de poder, su sistema de defensa y su centro de mando. Además de ser la principal batería energética, tanto para el uso diario como para reservas a largo plazo, actúan como sensores que le indican a la planta cuánta energía le queda. Por si fuera poco, refuerzan su infraestructura física, crean un escudo protector contra plagas y climas extremos (como heladas o sequías), y trabajan como interruptores maestros capaces de encender o apagar rutas metabólicas para regular directamente desde el crecimiento hasta la floración.

Las investigaciones de vanguardia se centran en el rediseño genético para desacoplar el crecimiento de las plantas del estrés ambiental, el cual reprime el crecimiento, la edición genómica de transportadores de carbohidratos para cortar la fuente de alimento, a través de la exudación de carbohidratos por las raíces de la plantas, a patógenos sin comprometer el cultivo. Asimismo, la inteligencia artificial facilitará el diagnóstico no destructivo de las reservas de almidón en campo abierto para optimizar insumos de forma preventiva. Finalmente, el rediseño estructural de las paredes celulares permitirá optimizar la captura prolongada de carbono atmosférico y potenciar la producción de bioenergía sostenible.

Una opción prometedora para mejorar el contenido de carbohidratos en las plantas es el uso de microorganismos como bioinoculantes, los cuales generan efectos positivos en las plantas. Sin embargo, la manera de garantizar la permanencia de los microorganismos en campo para mejorar el crecimiento y desarrollo de las plantas requiere de investigación adicional.

Glosario de términos

ATP Adenosina trifosfato

CO₂ Dióxido de carbono

ERO Especies reactivas de oxígeno

5. Referencias

Gautam, T., Dutta, M., Jaiswal, V., Zinta, G., Gahlaut, V., & Kumar, S. (2022). Emerging roles of SWEET Sugar Transporters in plant development and abiotic stress responses. *Cells*, 11(8), 1303.

<https://doi.org/10.3390/cells11081303>

Hernández-Bernal, A. F., Gregorio-Jorge, J., & León, P. (2022). El papel de los azúcares como moléculas de señalización en las plantas. *TIP Rev Esp Cienc Quím Biol*. 25(1):1-20.

<https://doi.org/10.22201/fesz.23958723e.2022.519enta.2010.09.014>.

Ruan Y. L. (2014). Sucrose metabolism: gateway to diverse carbon use and sugar signaling. *Annual review of plant biology*, 65, 33–67. <https://doi.org/10.1146/annurev-arplant-050213-040251>

Huber, S. C., & Huber, J. L. (1996). Role and regulation of SUCROSE-PHOSPHATE SYNTHASE in higher plants. *Annual review of plant physiology and plant molecular biology*, 47, 431–444. <https://doi.org/10.1146/annurev.arplant.47.1.431>

Jeandet, P., Formela-Luboińska, M., Labudda, M., & Morkunas, I. (2022). The Role of sugars in plant responses to stress and their regulatory function during development. *International journal of molecular sciences*, 23(9), 5161. <https://doi.org/10.3390/ijms23095161>

MacNeill, G. J., Mehrpouyan, S., Minow, M. A. A., Patterson, J. A., Tetlow, I. J., & Emes, M. J. (2017). Starch as a source, starch as a sink: the bifunctional role of starch in carbon allocation. *Journal of experimental botany*, 68(16), 4433–4453. <https://doi.org/10.1093/jxb/erx291>

Nookaraju, A., Chandrama, P. U., Shashank, K. P., Ko, E. Y., Se, J. H., Suk, K. P., & Se, W. P. (2010). Molecular approaches for enhancing sweetness in fruits and vegetables. *Scientia Horticulturae*, 127, 1–15. <https://doi.org/10.1016/j.sci>

Sobre los autores

AOC es estudiante del programa de Doctorado en Ciencias en Biología Experimental del Instituto de Investigaciones Químico Biológicas de UMSNH.

EGP es Doctor en Ciencias en Biotecnología de Plantas por el Departamento de Ingeniería Genética del Plantas del CINVESTAV-IPN, Unidad Irapuato. Actualmente es Profesor e Investigador Titular en el Instituto de Investigaciones Químico Biológicas de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.

Cita

Ortíz Calderón, A., & García Pineda, E. (2026). Carbohidratos: más que energía para las plantas. *Biotechnológica Magazine*, 4(4), 30–36. <https://doi.org/10.5281/zenodo.22259628>



Del desecho a la solución: cómo el manejo adecuado de las aguas residuales pueden ayudar frente al cambio climático

Dra. Norma Y. Hernández Saavedra

Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste, S.C.

Tema

El agua sostiene la vida, la salud y el desarrollo humano, pero hoy enfrenta una presión sin precedentes. El cambio climático altera su disponibilidad, mientras que la contaminación agrava una crisis que ya afecta a millones de personas. En este escenario, las aguas residuales ya no pueden verse solo como un desecho: también representan un desafío ambiental, una fuente de emisiones y, al mismo tiempo, una oportunidad para recuperar recursos valiosos.

A lo largo de este artículo se explora esa relación entre agua y clima, con especial atención al papel de las aguas residuales. Lejos de ser un problema secundario, su tratamiento y aprovechamiento pueden ayudar a reducir emisiones, reutilizar agua, recuperar energía y fortalecer la resiliencia hídrica. También se presentan tecnologías emergentes que están cambiando la manera en que entendemos y gestionamos este reto.

Introducción

Aunque solemos pensar en el agua como un recurso abundante, la realidad es muy distinta. De toda el agua del planeta, la gran mayoría es salada (Fig. 1A) o está atrapada en glaciares y capas de hielo. Solo una fracción mínima está disponible en ríos, lagos y otras fuentes superficiales que sostienen la vida cotidiana. Esa pequeña porción es la que bebemos, la que usamos para producir alimentos y la que mantiene en funcionamiento los ecosistemas (Kirkland, 2023).

La mayor parte del agua del planeta no está disponible de manera inmediata para nosotros. Se encuentra en los océanos, bajo tierra o congelada en glaciares, y se mueve muy lentamente. La que circula con rapidez y sostiene la vida diaria es la que está en la superficie, en la atmósfera y en los ríos (Fig. 1B). Ese movimiento constante —el ciclo del agua— hace posible la producción de alimentos, la

generación de energía y el equilibrio de muchos ecosistemas. También cumple una función clave en la regulación del clima (Huerga, 2024; Fig. 2).

Por eso, cuando el clima cambia, el agua también cambia. Sequías más intensas, inundaciones más frecuentes, glaciares en retroceso e incendios forestales son distintas caras de una misma crisis hídrica. Pero el agua no solo está en el centro del problema: también puede ser parte de la solución. Gestionarla mejor significa proteger ecosistemas, reducir emisiones y aumentar la capacidad de adaptación de comunidades enteras.

2. ¿Cuál es la conexión?

La relación entre agua y cambio climático es directa y cada vez más evidente. Cuando aumentan las temperaturas y se alteran los patrones de lluvia, aparecen sequías más severas, inundaciones más destructivas, incendios forestales y daños a la infraestructura hídrica (Fig. 3). Todo esto pone en riesgo el acceso al agua potable, la producción de alimentos, la biodiversidad y la salud de los ecosistemas (ONU, 2026). Por eso, hablar de adaptación climática también significa hablar de una mejor gestión del

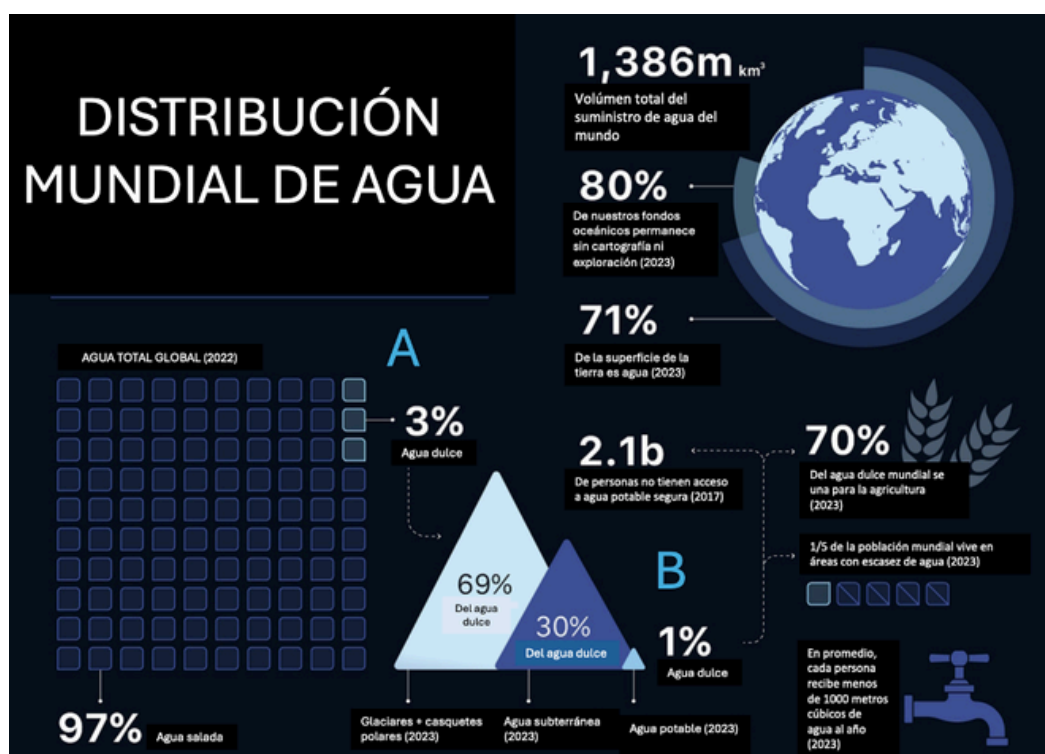
agua: proteger humedales, captar lluvia, reutilizar aguas residuales y diseñar sistemas más resilientes ya no es opcional, sino una necesidad.

3. ¿Qué es la gestión del agua?

Hablar de gestión sostenible del agua es hablar de usar este recurso con responsabilidad, inteligencia y visión de largo plazo. No se trata solo de tener suficiente agua hoy, sino de asegurar que también la haya mañana. Esto implica cuidar su calidad, evitar el desperdicio, proteger los ecosistemas y promover su reutilización. No es casual que este tema esté en el centro del ODS 6 de la ONU, dedicado al agua limpia y al saneamiento (Pacto Mundial, 2026).

La gestión integral del agua va un paso más allá. Propone mirar todo el ciclo del agua como un sistema conectado: desde la captación y el almacenamiento hasta la distribución, el uso, el tratamiento y la reutilización. En lugar de resolver cada problema por separado, busca coordinar decisiones para reducir contaminación, aprovechar mejor el recurso y responder a necesidades muy distintas, como el consumo humano, la agricultura, la industria y la conservación ambiental (TNA, 2024). Su fuerza

Figura 1. Representación gráfica de la distribución, tipos y uso del agua en el planeta. A, Proporción de agua total global: agua salada 97% y agua dulce 3%. B, Distribución del 3% de agua dulce del planeta: agua congelada 69%, agua subterránea 30% y agua potable 1% (tomado y traducido de Kirkland, 2023).



está en que reúne a comunidades, gobiernos, especialistas y sectores productivos en una misma conversación.

3.1 Huella hídrica

La huella hídrica permite entender cuánta agua usamos realmente, incluso la que no vemos. No solo cuenta el agua que sale del grifo, sino también la que se consume para producir alimentos, bienes y servicios. Se divide en tres componentes: verde, azul y gris. En este artículo nos interesa especialmente la huella hídrica gris (Fig. 4) (IMTA, 2019; AQUAE, 2026), porque remite al volumen de agua necesario para diluir contaminantes y, en la práctica, nos lleva al tema de las aguas residuales. Estas no solo concentran sustancias de desecho: también pueden liberar metano (CH_4) y óxido nitroso (N_2O), dos gases de efecto invernadero que intensifican el cambio climático.

3.2 Huella hídrica gris y/o aguas residuales

Hoy se sabe que el sector de las aguas residuales tiene un peso climático mayor del que durante años se creyó. Buena parte del problema está en las emisiones de metano (CH_4) y óxido nitroso (N_2O) (Fig. 5A), dos gases que muchas veces no se miden de forma completa. Los inventarios nacionales suelen subestimar estas



Figura 2. Ciclo del agua. Proceso biogeoquímico complejo que implica procesos de evaporación, condensación, precipitación, escorrentía, infiltración, transpiración, interacción con el suelo y las rocas y el almacenamiento de agua en reservorios. Este ciclo es esencial para mantener la vida en la Tierra y es influenciado por una variedad de factores biológicos, geológicos, químicos y físicos (tomado de Bordino, 2025).

emisiones porque los sistemas son complejos, las metodologías no siempre coinciden y existen grandes variaciones entre regiones y estaciones del año (Fig. 5B y C). Estudios recientes advierten que esta omisión deja fuera millones de toneladas de emisiones equivalentes de CO_2 cada año (Song et al., 2026). En otras palabras, una parte importante del impacto climático de las aguas residuales todavía permanece fuera del radar, y reconocerlo es el primer paso para reducirlo.

Este panorama lleva directamente a revisar el papel de las plantas de tratamiento, ya no solo como

infraestructura de saneamiento, sino como instalaciones con potencial para recuperar recursos y reducir impactos climáticos.

3.2.1 Situación actual de las plantas de tratamiento de agua

Las plantas de tratamiento de aguas residuales están dejando atrás su papel tradicional. Durante mucho tiempo se entendieron como instalaciones destinadas únicamente a limpiar el agua antes de devolverla al ambiente (Fig. 5A).

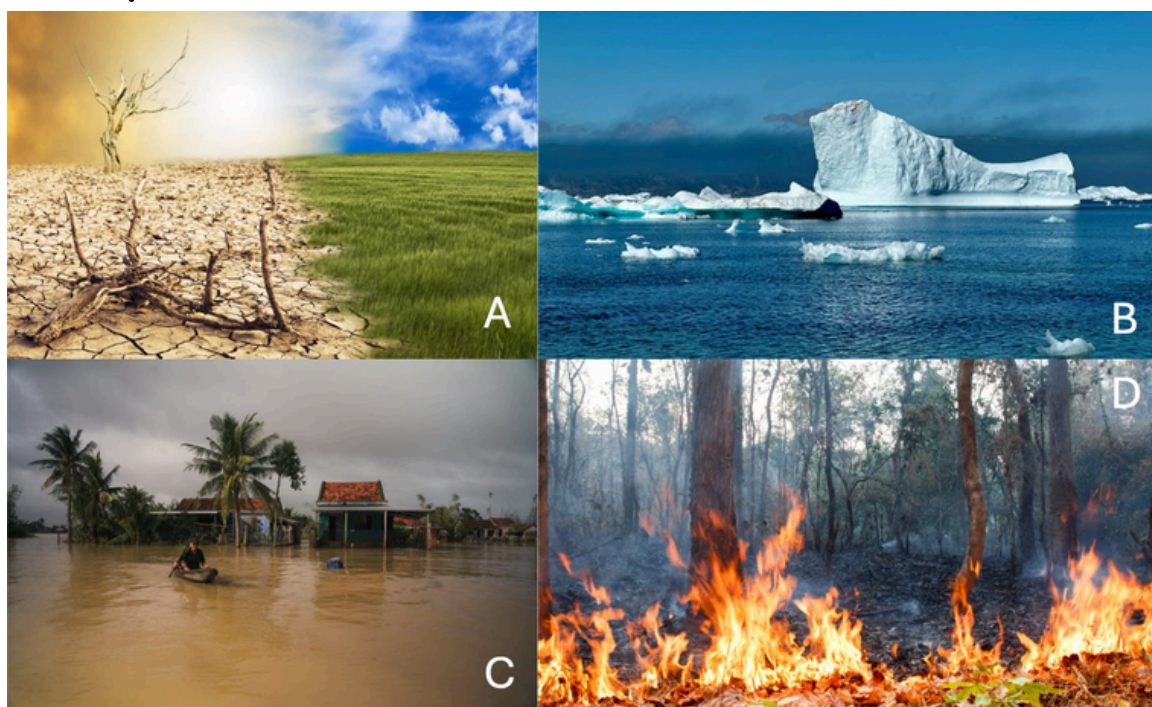


Figura 3. Efectos del cambio climático. Aumento de fenómenos meteorológicos extremos como las sequías (A), el aumento de temperaturas globales, derretimiento de glaciares y elevación del nivel del mar (B), fenómenos meteorológicos como inundaciones (C), además del incremento en la frecuencia y extensión de incendios forestales (D) (Canva).

Hoy, en cambio, se conciben cada vez más como centros capaces de recuperar recursos: agua reutilizable, nutrientes como fósforo y nitrógeno, e incluso energía renovable a partir de los residuos orgánicos (Fig. 6). Este cambio de enfoque es importante porque también permite mirar un problema poco visible: las emisiones de metano y óxido nitroso generadas durante el tratamiento del agua residual. Ambos gases tienen un impacto climá-

tico mucho mayor que el dióxido de carbono. Reducirlos no solo ayuda a frenar el calentamiento global, sino también a disminuir daños sobre ríos, lagos y otros ecosistemas acuáticos. En 2024, un estudio de la Universidad de Radboud reveló que los ríos que reciben descargas de aguas residuales tratadas emiten hasta un 40% más de metano que los cuerpos de agua no influenciados (UNIA, 2026). Estas



Figura 4. Tipos de huella hídrica: verde, azul y gris (Canva).

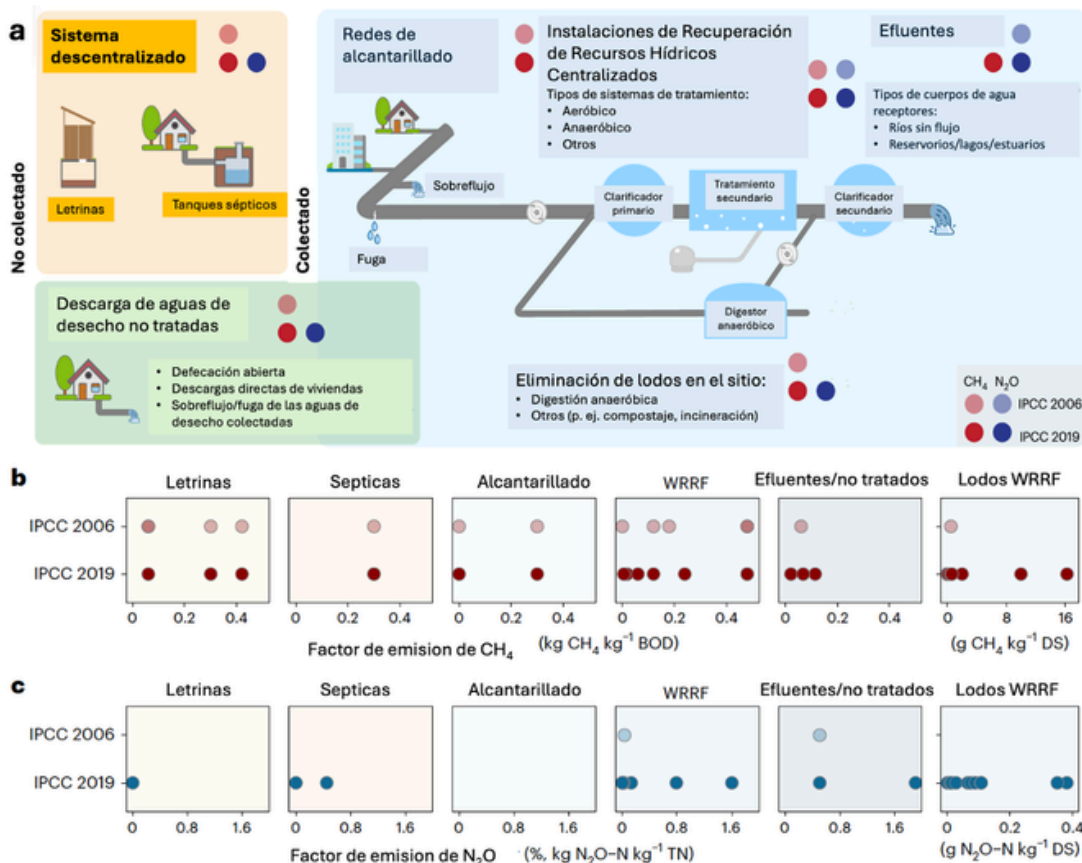


Figura 5. Cobertura de las vías de aguas residuales. a, Sistemas complejos de tratamiento de aguas residuales y vías de descarga, y cobertura general de estas vías en las directrices del IPCC de 2006 y 2019. b, c, Factores de emisión detallados sugeridos en las directrices del IPCC para estimar las emisiones de CH_4 (b) y N_2O (c) (modificado de Song et al., 2026).

emisiones intensifican el cambio climático y alteran los ciclos biogeoquímicos, impactando negativamente en la biodiversidad acuática. Además, el N_2O generado durante procesos biológicos, como la nitrificación y desnitrificación, contribuye al calentamiento global y afecta la capa de ozono (Peterse et al., 2024).

A principios de la década de 2000, la industria de aguas residuales comenzó a centrarse en los recursos “re-N-E-W-ables” (N – nutrientes, E – energía, W – agua), con la visión de que la mayoría, si no todos, los materiales presentes en las aguas residuales pueden convertirse en productos valiosos. En 2009, los administradores de WRF identificaron la recuperación de productos útiles a partir de aguas residuales y sólidos como una prioridad de investigación. Más recientemente, en 2021, la Fundación de Investigación del Agua eligió el uso y la recuperación eficiente de recursos como uno de los cinco temas de

investigación de alta prioridad, con el objetivo de impulsar al sector del agua hacia una economía circular (WRF, 2026).

3.3 ¿Cuáles son los planes?

Frente a este panorama, la ONU insiste en que no basta con reconocer la crisis: hace falta invertir en soluciones hídricas innovadoras, viables y escalables (UN, 2026). La idea es doble: responder a los desafíos del agua y, al mismo tiempo, generar beneficios sociales, económicos y climáticos. Entre las rutas más prometedoras destacan las siguientes:

- Mejorar el almacenamiento de carbono. Ecosistemas como turberas y manglares funcionan como grandes reservorios naturales de carbono. Cuidarlos y restaurarlos no solo protege la biodiversidad: también ayuda a frenar el calentamiento global y a reforzar el equilibrio hídrico.

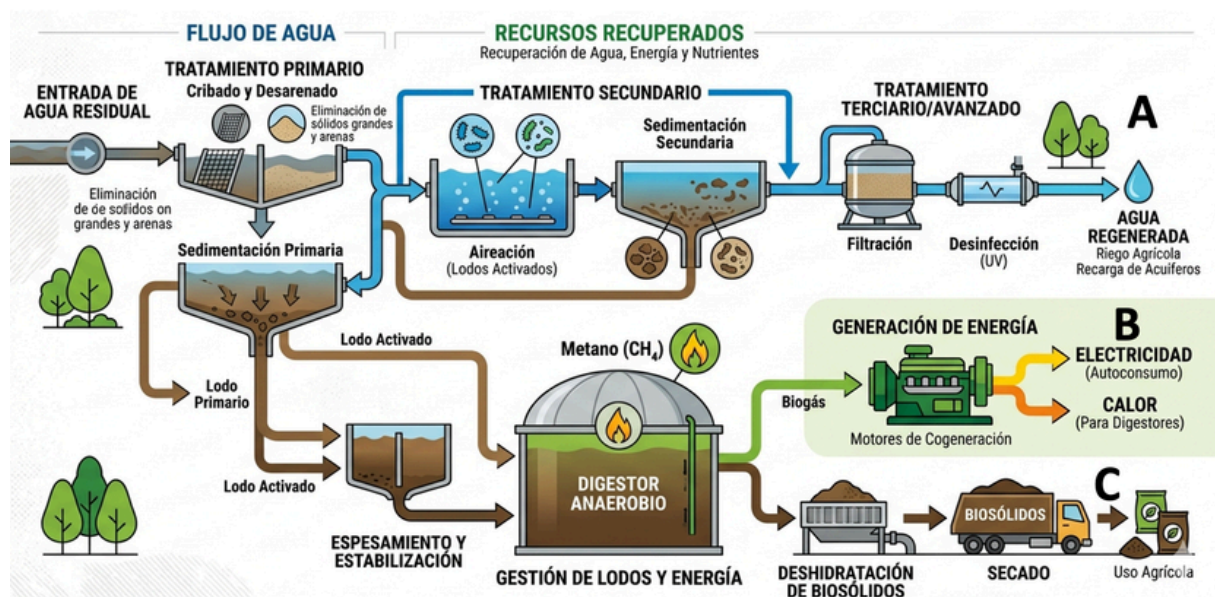


Figura 6. Ilustración de los procesos que se llevan a cabo en una WRRF (Planta de tratamiento y recuperación de recursos de aguas residuales). A) Proceso de recuperación del agua; B) proceso de recuperación de biogás para la generación de electricidad y calor; C) proceso de recuperación de biosólidos con uso agrícola (Canva).

- Proteger las zonas de amortiguación naturales. Humedales, manglares y riberas vegetadas actúan como defensas frente a inundaciones, erosión y eventos extremos. Son barreras naturales que amortiguan impactos y ayudan a regular el paso del agua.
- Captar el agua de lluvia. Aprovechar la lluvia permite reforzar el abasto en épocas secas, reducir la presión sobre otras fuentes y favorecer la recarga de acuíferos. Es una medida sencilla en apariencia, pero muy poderosa para aumentar la resiliencia.
- Adoptar una agricultura climáticamente inteligente. Mejorar el suelo, usar riego más eficiente, reducir pérdidas y transformar residuos en energía o fertilizantes permite producir alimentos con menos impacto hídrico y climático.
- Aprovechar mejor las aguas subterráneas. En muchos lugares este recurso se explota sin conocer bien sus límites o su calidad. Protegerlo y usarlo con criterio será esencial para enfrentar la escasez futura.
- Reutilizar aguas residuales. Cuando se tratan de forma segura, las aguas residuales pueden

convertirse en una fuente confiable de agua para riego, industria o usos urbanos. Además, permiten recuperar energía y nutrientes, lo que las vuelve una pieza central de la economía circular.

4. ¿Qué hay de las soluciones tecnológicas?

Las WRRFs muestran que la tecnología puede cambiar por completo la manera en que tratamos el agua usada. Más que simples plantas de saneamiento, empiezan a funcionar como sistemas capaces de recuperar tres recursos clave (Liu et al., 2022; Sherif et al., 2023):

I. Agua regenerada: Con tratamientos avanzados, el agua residual puede dejar de ser un desecho y transformarse en un recurso útil para riego, recarga de acuíferos, procesos industriales o ciertos usos urbanos (Fig. 6A).

II. Energía limpia: Los lodos orgánicos pueden aprovecharse mediante digestión anaerobia para

generar biogás (Fig. 7), una fuente de energía que ayuda a reducir el uso de combustibles fósiles e incluso puede volver autosuficientes a algunas plantas (Fig. 6B).

III. Nutrientes y recursos químicos: Del agua residual también pueden recuperarse elementos como fósforo y nitrógeno, que luego se transforman en fertilizantes. Así se evita contaminar más ríos y lagos, y al mismo tiempo se aprovechan materiales valiosos (Fig. 6C).

Se están desarrollando tecnologías avanzadas para reducir las emisiones de GEI en plantas de tratamiento, entre ellos podemos mencionar:

4.1 Digestores anaeróbicos

Un digestor anaeróbico es, en esencia, un sistema cerrado que aprovecha bacterias para descomponer materia orgánica sin oxígeno (Martinez-Martinez et al., 2026; Fig. 7). El resultado es doble: por un lado produce biogás, una fuente de energía renovable; por otro, genera viabilidad en este contexto puede considerarse media.

un residuo rico en nutrientes que puede usarse como fertilizante. Su gran ventaja es que captura metano que de otro modo escaparía a la atmósfera, además de reducir olores y lodos. Eso sí, requiere inversión, operación especializada y un control técnico cuidadoso para funcionar bien. Su viabilidad en este contexto puede considerarse media.

4.2 Optimización biológica de nitrificación y desnitrificación

Optimizar procesos como la nitrificación y la desnitrificación permite reducir emisiones de óxido nítrico y mejorar el rendimiento del tratamiento sin rehacer toda la planta. En otras palabras, se trata de ajustar mejor las condiciones de operación para que el sistema trabaje de forma más limpia y eficiente. Su ventaja es que ofrece buenos resultados con cambios relativamente accesibles, aunque exige monitoreo constante porque es sensible a variaciones de oxígeno, temperatura y carga. Por eso su viabilidad se considera alta.

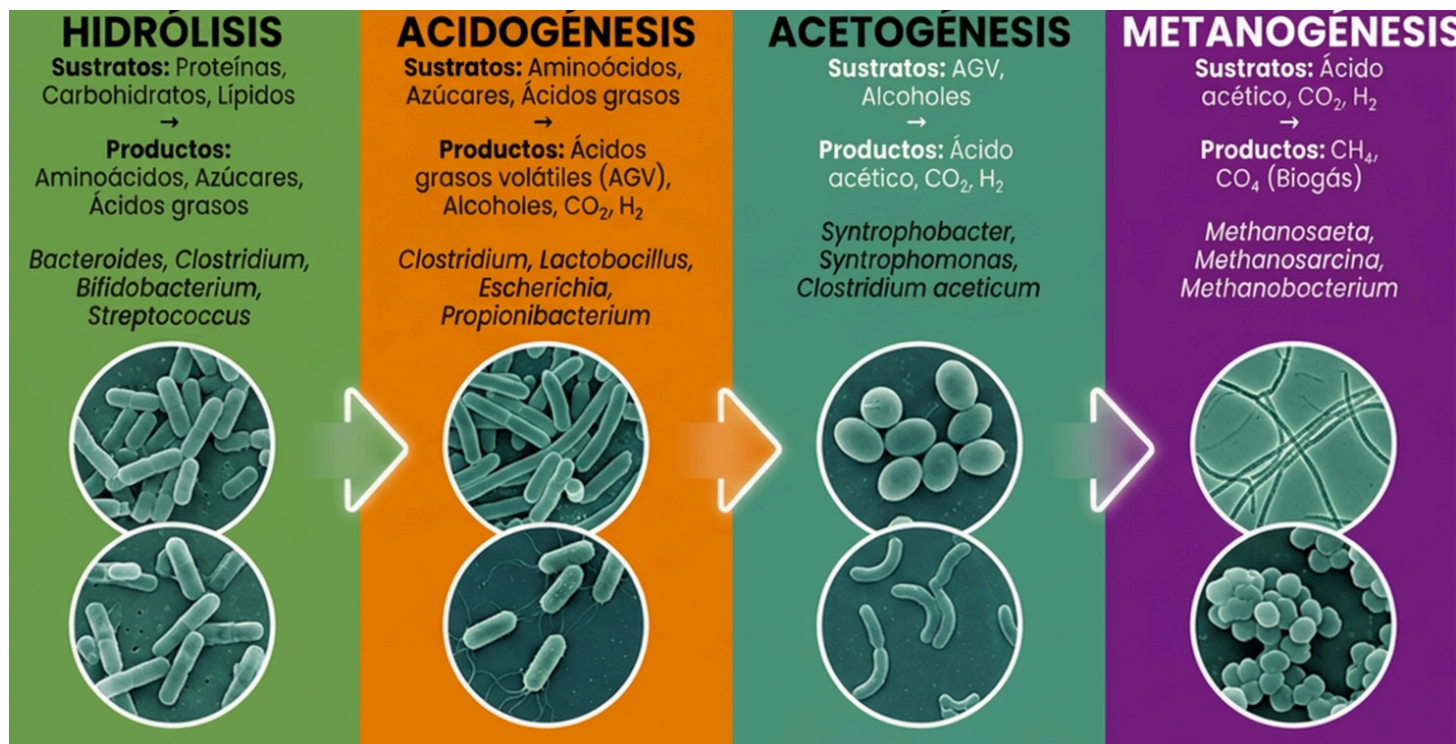


Figura 7. Pasos bioquímicos secuenciales que suceden en un digestor anaeróbico (sustratos-productos) facilitado por bacterias específicas (Goggle IA, Nano Banana 2).

4.3 Sensores inteligentes y monitoreo en tiempo real

Los sensores inteligentes y los gemelos digitales están convirtiendo a estas plantas en infraestructuras capaces de “sentir” y “pensar” en tiempo real. Los sensores recopilan información sobre variables clave, mientras que el gemelo digital simula escenarios y ayuda a decidir cómo ajustar la operación para ahorrar energía, reducir costos y disminuir emisiones. Su mayor fortaleza es que permiten anticiparse a problemas en lugar de reaccionar tarde. Aunque requieren inversión, conectividad y personal capacitado, su viabilidad es alta por el potencial que tienen para transformar la operación diaria.

4.4 Sistema integrado de control de GEI con sensores, IA y operación adaptativa

Un sistema integrado de control de GEI combina sensores, análisis de datos, inteligencia artificial y operación adaptativa para identificar en qué momentos y en qué etapas se generan más emisiones. Su valor está en que permite intervenir con rapidez y tomar decisiones mejor informadas. Es una de las opciones con mayor potencial para reducir la huella de carbono total de una planta, aunque también es la más compleja de implementar por la inversión y la coordinación tecnológica que requiere. Por ello, su viabilidad puede considerarse media.

5. Perspectiva global, sostenibilidad y conclusiones

En muchas regiones en desarrollo, donde las plantas de tratamiento todavía operan con limitaciones técnicas, las emisiones de gases de efecto invernadero representan un reto especialmente serio. un así, ya existen experiencias que muestran que es posible reducirlas mientras se mejora la eficiencia energética, lo que refuerza la idea de que la transición hacia sistemas más limpios no es una promesa lejana, sino una posibilidad real.

En conjunto, las WRRF representan una nueva manera de entender el tratamiento del agua: no como un proceso para deshacerse de residuos, sino como una oportunidad para recuperar recursos, ahorrar energía y reducir impactos ambientales. Sus principales fortalezas pueden resumirse así:

- Recuperan agua, energía y nutrientes, convirtiendo un residuo en recursos útiles.
- Ayudan a avanzar hacia plantas más eficientes y con menor dependencia de combustibles fósiles.
- Reflejan la evolución del sector hacia una visión más circular y estratégica del agua residual.
- Incorporan innovación tecnológica para optimizar procesos y mejorar la calidad del tratamiento.
- Contribuyen a reducir contaminación y emisiones, alineando saneamiento y acción climática.

La adopción de tecnologías como sensores IoT y gemelos digitales permitirá que las plantas de tratamiento operen con una huella de carbono cercana a cero en las próximas décadas. Estos sistemas facilitarán ajustes dinámicos y simulaciones avanzadas para optimizar procesos y minimizar emisiones.

En el fondo, el gran cambio de perspectiva es este: el agua residual no tiene por qué ser el final de un ciclo, sino el inicio de otro. Cuando se trata con tecnología, visión ambiental e innovación, puede transformarse en agua útil, energía, nutrientes y conocimiento para tomar mejores decisiones. Entenderlo así no solo mejora la gestión del agua: también abre una vía concreta para enfrentar la crisis climática con soluciones más inteligentes y sostenibles.

6. Referencias

AQUAE. 2026. Los tipos de huella hídrica y su impacto mundial. AQUAE FUNDACION. Consultado 26/05/2026.
Bordino, J. 2025. Ciclo del agua: qué es, etapas e importancia. ECOLOGIA verde. Consultado 22/04/2026.
Huerga, A. 2024. Día Mundial del Agua: ¿Cuál es el impacto del cambio climático en el agua? Mundo ZEO. Consultado 25/03/2026.

Kirkland, Ch. 2023. Understanding the Global Supply of Water. VISUAL CAPITALIST. Consultado 25/03/2026.

Liu Q., Li R., Dereli R.K., et al. 2022. Water resource recovery facilities as potential energy generation units and their dynamic economic dispatch. *Applied Energy*, 318:119199.

<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2022.119199>.

Martínez-Martínez J.H., Zañeta-Aguilar A., Valencia-Lozano E., et al. (2026). Manual Biodigestor Tipo Tubo. Proyecto N° 319773 Producción de biocombustibles para uso rural a partir de desechos agropecuarios mediante la optimización de consorcios microbianos usando metagenómica. Repositorio Ecosistema Nacional Informático de Energía y Cambio Climático CONAHCyT. Consultado 26/05/2026.

ONU (Organización de las Naciones Unidas). 2026. El agua: en el centro de la crisis climática. ONU. Consultado 25/03/2026.

Pacto Mundial. 2026. ODS 6 Agua limpia y saneamiento. UN Global Compact, Pacto Mundial España. Consultado 22/04/2026.

Peterse F.I., Hendriks L., Weideveld S.T.J., et al. 2024. Wastewater-effluent discharge and incomplete denitrification drive riverine CO₂, CH₄ and N₂O emissions. *Science of The Total Environment*, 951:175797.

<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.175797>.

Sherif M., Liaqat M.U., Baig F., et al. (2023). Water resources availability, sustainability and challenges in the GCC countries: An overview. *Heliyon*, 9(10):e20543. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e20543>.

Song C., Ponder D. Peng W., Ren Z.J. (2026). Discrepancies in national inventories reveal a large emissions gap in the wastewater sector. *Nat. Clim. Chang.*, 16, 313–32. <https://doi.org/10.1038/s41558-025-02540-6>.

TNA (Tratamiento Natural de Agua). 2024. ¿Qué es la gestión integral del agua y por qué es esencial? TNA. Consultado 22/04/2026.

UN (United Nations). 2026. Water and Climate Change. UN WATER. Consultado 25/03/2026.

UNIA. 2026. Innovaciones en el tratamiento de aguas residuales: hacia un futuro sostenible. Universidad Internacional de Andalucía. Consultado 25/03/2026.

WRF (Water Research Fundation). (2026). Resource Recovery. Consultado 25/03/2026.

Sobre el autor



Dra. Norma Y. Hernández Saavedra. Investigadora Titular, CIBNOR. Sistema Nacional de Investigadores Nivel 2. Scopus, Research Gate, ORCID, Academia.

Cita

Hernández-Saavedra, N. Y. (2026). Del desecho a la solución: cómo el manejo adecuado de las aguas residuales pueden ayudar frente al cambio climático. *Biotechnológica Magazine*, 4(4), 37–45. <https://doi.org/10.5281/zenodo.22236815>



Hongos filamentosos: arquitectos de los ecosistemas

Rosario Yadira Avalos Barajas, Santos Zepeda Guzman, David Gamaliel Valdivia Avatas, Gamaliel Valdivia Rojas*

Instituto Tecnológico Superior de Los Reyes, Tecnológico Nacional de México

* autor de correspondencia: gamaxew@gmail.com

Foto: tomasztc a través de canva.

Tema

Los hongos son organismos eucariotas heterótrofos cuyo componente principal es la quitina, incluyen levaduras unicelulares y mohos pluricelulares formados por hifas que conforman el micelio. Cumplen funciones ecológicas esenciales como descomponedores de materia orgánica, reciclando nutrientes al suelo, forman micorrizas con más del 80% de las plantas vasculares, actúan como parásitos que regulan poblaciones, como *Cordyceps* que controla insectos o *Beauveria bassiana* que combate la broca del café. Poseen capacidades sorprendentes: hongos radiotróficos como *Cladosporium sphaerospermum* convierten radiación en energía y especies como *Pleurotus ostreatus* degradan plásticos. Su estudio ofrece soluciones prometedoras para la biorremediación, el control biológico de plagas y el desarrollo de tecnologías sostenibles. En este trabajo se presentan las funciones y aplicaciones de hongos filamentosos en los ecosistemas.

1.Introducción

Los hongos son organismos eucariotas heterótrofos, es decir, a diferencia de las plantas, no realizan fotosíntesis ni fabrican su propio alimento. Carecen de clorofila y poseen pared celular cuyo componente principal es la quitina. Para nutrirse, deben buscar activamente sus nutrientes: su micelio secreta potentes enzimas que descomponen la materia orgánica muerta, cumpliendo un papel fundamental en el reciclaje de nutrientes del suelo. Pueden ser unicelulares (levaduras) o pluricelulares (mohos y setas), formados por hifas. Se reproducen por esporas y habitan en diversos ambientes. Cumplen funciones ecológicas esenciales como descomponedores, controladores biológicos y productores de metabolitos de interés industrial, aunque algunos son patógenos. **La ciencia que estudia a los hongos se llama micología** (Tlachino *et al.*, 2025).

1.1 Hongos como un solo super individuo

Uno de los hongos más impresionante se encuentra en Oregón, Estados Unidos: un ejemplar de *Armillaria ostoyae* (hongo de la miel) (Fig. 1) extiende su micelio por 965 hectáreas de bosque, siendo considerado el organismo terrestre más grande del planeta. El tamaño del daño que ocasiona es tal que se puede apreciar desde el espacio mediante satélites, aunque no es una buena noticia: es un patógeno forestal que mata árboles dejando claros inmensos en el bosque. Los hongos también están presentes en el mundo de los videojuegos como en el mundo de Minecraft. Su "Bioma de Champiñones", famoso por sus setas gigantes y peculiares vacas-hongo, donde el suelo está vivo y lo que pisas es puro micelio. Todo el bioma funciona como una colosal red interconectada, una brillante referencia al gigantesco hongo de la vida real, el titánico *Armillaria ostoyae* (Hanna, 2005).

2. Función ecológica de los Hongos

2.1 Descomponedores o degradadores de materia orgánica

Los hongos son los principales descomponedores de la naturaleza, junto con las bacterias. Mediante la secreción de potentes enzimas (como celulasas, ligninasas y proteasas) rompen la materia orgánica muerta como hojas, troncos, cadáveres, excrementos entre otros, transformándola en compuestos más simples como dióxido de carbono, Metano, sales minerales, humínicas, ácidos húmicos y fúlvicos. Este proceso recicla nutrientes esenciales como carbono, nitrógeno y fósforo, devolviéndolos al suelo para que las plantas puedan absorberlos. Sin ellos, el suelo se agotaría y los restos orgánicos se acumularían sin degradarse (Fig. 1) (Tlachino et al., 2025). Los hongos también son protagonistas en el mundo digital, en el

video juego de Mario Bros los hongos son fundamentales: al consumirlos crece y todo se vuelve colorido y energético. Curiosamente, estos síntomas son idénticos a los que provoca la psilocibina. ¿El fontanero tiene súper poderes o simplemente está alucinando?

2.2 Hongos en asociación con plantas: la red que sostiene los ecosistemas

Más del 80% de las plantas vasculares terrestres se benefician de las micorrizas, asociaciones simbióticas milenarias en las que los hongos proporcionan agua y minerales (fósforo) a cambio de azúcares y lípidos de la fotosíntesis vegetal. Las hifas fúngicas penetran las células de las raíces sin dañarlas, creando arbuscúlos (micorrizas arbusculares) o una densa malla alrededor de puntas radicales (ectomicorrizas, típicas de pinos y robles) (Fig. 1C). Esta simbiosis mejora la tolerancia a sequías, patógenos y suelos pobres (Herrera-Monroy et al., 2023).

A través de su extensa red de micelio, los hongos conectan físicamente individuos de la misma o diferente especie. Un árbol viejo y vigoroso puede transferir nutrientes y compuestos de defensa a plántulas jóvenes que aún no fotosintetizan plenamente. Este trasiego subterráneo permite la regeneración del bosque y aumenta la resiliencia frente a sequías, plagas o enfermedades. Se ha documentado que los árboles "madre" envían señales de alarma a través de la red micelial cuando son atacados por insectos, induciendo a sus vecinos a activar sus defensas químicas antes de que el peligro llegue (Carrillo-Saucedo et al., 2022).

Por ello, los científicos han bautizado esta infraestructura viva como la internet de la naturaleza o red micelial común. Un solo gramo de suelo puede contener kilómetros de hifas, convirtiendo el subsuelo en un cerebro colectivo que coordina la vida forestal. Sin esta alianza fúngica, la mayoría de los ecosistemas terrestres colapsarían: no habría bosques, ni praderas, ni cultivos agrícolas productivos.



Figura 1. Diferentes tipos de hongos. A. Hifas de un hongo saprófito (tomada de La casa de las Setas); B. Cuerpo fructífero del hongo de *Armillaria ostoyae* u hongo de la miel (tomada de Micología); C. Hifas y vesículas de un hongo micorrízico dentro de células de una raíz (tomada de Micorriza).

Se estima que el 90% de las plantas dependen críticamente de sus socios micorrízicos para sobrevivir en condiciones naturales. Comprender y proteger esta simbiosis oculta es una prioridad para la restauración ecológica y la agricultura sostenible del futuro (Herrera-Monroy et al., 2023; Carrillo-Saucedo et al., 2022).

3.Parasitismo y control biológico

3.1. Hongos parásitos y regulación de poblaciones

Muchos hongos actúan como parásitos de plantas, animales y otros hongos, infectando a sus hospedadores y causando enfermedades e incluso la muerte. Lejos de ser solo negativa, esta función regula las poblaciones al eliminar individuos débiles, enfermos o en exceso.

Por ejemplo, *Cordyceps* controla insectos y artrópodos; *Armillaria* limita árboles viejos; *Fusarium* ataca cultivos, sin embargo, también es un excelente aliado en la degradación de materia orgánica, participa en el control biológico e induce resistencia sistémica en plantas. Así, los hongos patógenos contribuyen a la selección natural y al equilibrio ecosistémico. El hongo *Cordyceps* spp. infecta hormigas, reemplaza sus tejidos con sus hifas y mantiene vivo el cerebro de la víctima, produce sustancias similares a neurotransmisores e insecticidas que paralizan la actividad muscular y el sistema nervioso central del insecto, tomando el control total del mismo, con esta condición obliga a la hormiga a trepar a un lugar alto, con la humedad, luz y temperatura necesaria para que el hongo complete su ciclo. El cuerpo fructífero del hongo emerge y libera

esporas, para su diseminación, o que el insecto momificado se lo coma un pájaro y este sea el vector de dispersión (Fig. 2A). **Es un espectáculo digno de una película de terror, así como en la famosa serie y videojuego The Last of Us famosa por convertir en sirvientes del Cordyceps a los humanos, nos hace recordar que a veces la realidad supera a la ficción** (Treviño-Rangel et al., 2024; Ramírez et al., 2024).

3.2. Yarsagumba y usos tradicionales de *Cordyceps*

En el Himalaya, los campesinos recolectan la Yarsagumba, larvas momificadas de polilla fantasma (*Thitarodes* spp.) colonizadas por *Cordyceps sinensis*. Las orugas vivas en el suelo son colonizadas por las esporas del hongo; el insecto infectado vive en túneles y el insecto una vez muerto, el hongo genera su cuerpo fructífero y sale a la superficie (Fig. 2B). Este hongo es muy valorado en la medicina tradicional de China, Nepal e India (Sen et al., 2023; National Geographic, 2020).

3.3. Metabolitos secundarios y antagonismo microbiano

Los hongos producen una enorme variedad de metabolitos secundarios (antibióticos, micotoxinas, compuestos antifúngicos y antimicrobianos) que inhiben el crecimiento de otros microorganismos. En el ecosistema, evitan la proliferación excesiva de bacterias, hongos patógenos o algas, manteniendo el equilibrio microbiano. Por ejemplo, *Trichoderma* spp. es un antagonista natural de hongos fitopatógenos, protegiendo las raíces de las plantas y es ampliamente utilizado en la agricultura (Benavides et al., 2020).

3.4. *Beauveria bassiana* y manejo integrado de plagas

Beauveria bassiana es un hongo entomopatógeno que

actúa como un insecticida biológico natural. Su mecanismo de acción comienza cuando sus esporas entran en contacto con la cutícula del insecto. En condiciones de alta humedad, germinan y el hongo penetra en el cuerpo del huésped por las tráqueas y mediante la secreción de enzimas. Una vez dentro, se multiplica y libera toxinas como la beauvericina, que terminan matando al insecto (Fig. 2C). Es muy eficaz contra la broca del café (*Hypothenemus hampei*), un coleóptero que causa graves daños al cultivo. En México, se ha investigado desde 1990 y su efectividad contra esta plaga supera el 76%. Por ello, es una herramienta clave en el manejo integrado de plagas, ya que, a diferencia de los químicos, no es tóxico para mamíferos ni para el ambiente (Hernández y Berlanga, 1997).

4. Capacidades extremas y aplicaciones ambientales

4.1. Hongos que comen radiación

Llegamos al punto más asombroso de este artículo. En zonas altamente contaminadas por radiación ionizante, como el reactor de Chernóbil, los científicos han descubierto hongos que no solo sobreviven, sino que crecen mejor gracias a la radiación. Especies como *Cladosporium sphaerospermum*, *Cryptococcus neoformans* y *Wangiella dermatitidis* contienen altas concentraciones de melanina, el mismo pigmento que oscurece nuestra piel. Pero en ellos, la melanina actúa como un escudo radiactivo y, además, convierte la radiación gamma en energía química utilizable, un proceso similar a la fotosíntesis, pero con rayos en lugar de luz solar. Se llama radiosíntesis. En experimentos dentro de la Estación Espacial Internacional, estos hongos demostraron crecer más rápido cuando eran expuestos a niveles de radiación similares a los de Marte. Es decir, literalmente "comen" radiación para desarrollarse.

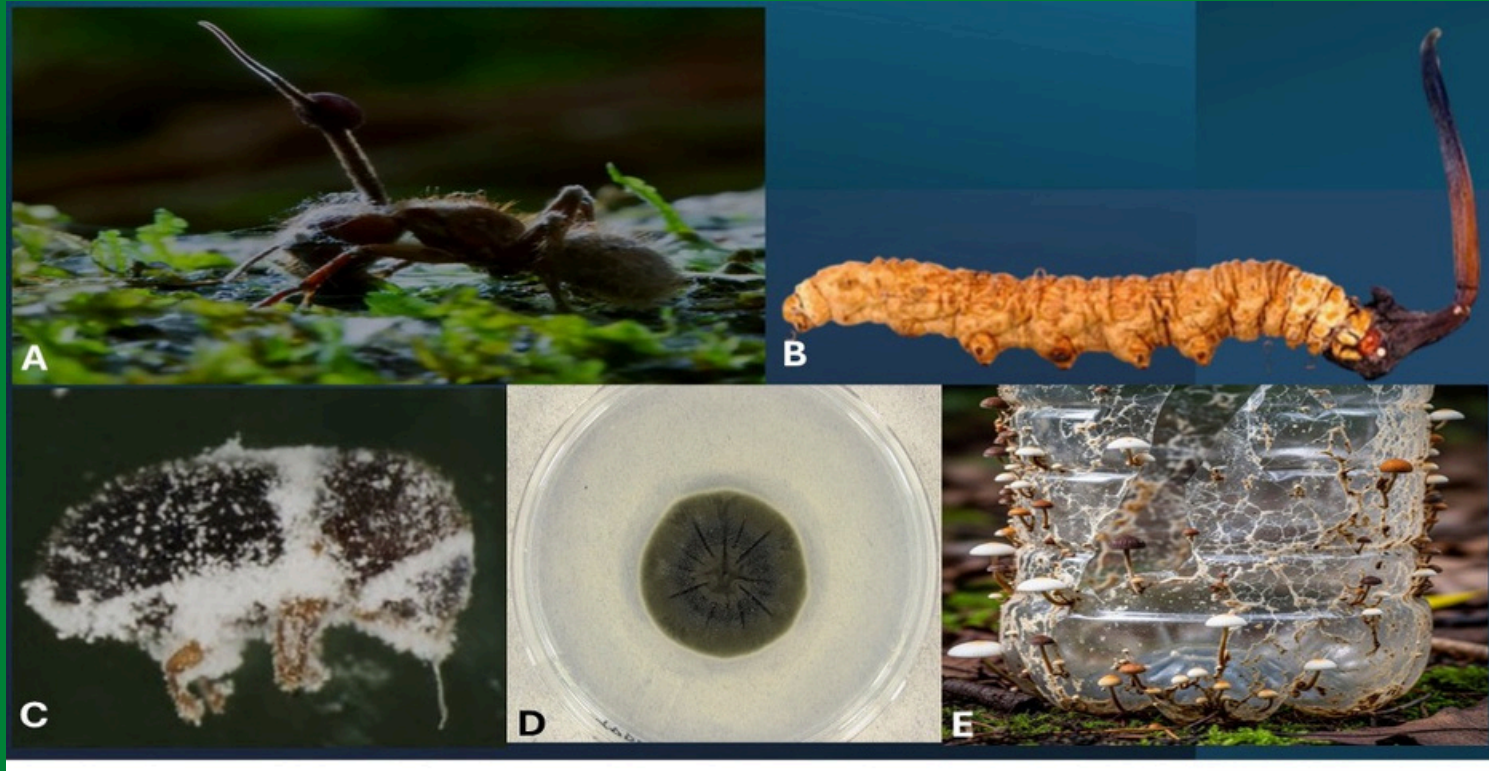


Figura 2. Diversidad de hongos y sus aplicaciones. A, Hormiga infectada por *Cordyceps* spp. (tomada de <https://www.youtube.com/watch?v=8nQlu0bXovs>) B, Larvas momificadas por el hongo *Cordyceps sinensis*. C, *Beauveria bassiana* infectando la broca del café (tomado de Benavides et al., 2020). D, Hongo *Cladosporium* sp. (Tomado de [Wikipedia](#)). E, Hongos que degradan plásticos (imagen generada con gemini.ai).

Este descubrimiento abre puertas increíbles como: la protección biológica para astronautas en viajes espaciales, limpieza de residuos nucleares y nuevas formas de producir energía o biocompuestos en entornos hostiles. En ecosistemas particulares (suelos contaminados, zonas radiactivas, fondos marinos, aguas ácidas), los hongos desarrollan capacidades únicas. **Los hongos radiotróficos como *Cladosporium sphaerospermum* usan melanina para convertir radiación ionizante en energía química** (Fig. 2D) (Tibolla y Fischer, 2025)

4.2. Hongos que comen plásticos

Ciertas especies fúngicas son capaces de descomponer microplásticos y otros compuestos tóxicos (petróleo, pesticidas, tintes industriales). Se habla ya de micorremediación: usar hongos para limpiar suelos y aguas contaminadas. Un campo con un potencial enorme frente a la crisis ambiental. **Algunos hongos como *Pleurotus ostreatus* y *Aspergillus* spp. producen enzimas capaces de degradar plásticos**, un descubrimiento prometedor ante el grave

problema de los residuos de bolsas, recipientes y envases que terminan en vertederos o en el ambiente, donde persisten durante siglos fragmentándose en microplásticos que contaminan suelos, aguas y organismos (Fig. 2E). Sin embargo, esta capacidad no justifica abandonar residuos en la naturaleza, ya que la degradación natural es extremadamente lenta. La clave está en investigar estos procesos en condiciones controladas para desarrollar soluciones reales de reciclaje enzimático, biotecnología y gestión ambiental. La micorremediación no es una panacea, pero bien gestionada puede complementar la reducción y reutilización para mitigar la crisis global de contaminación plástica (López et al, 2025; de Lucio-Flores et al, 2021; Ekanayaka et al, 2022).

4.3. Degradación de caucho

Recientemente se han reportado hongos degradadores de caucho de varios géneros, *Alternaria*, *Aspergillus*, *Fusarium*, *Penicillium*, *Monascus*, *Mucor*, y *Resinicium*, mostrando asociaciones reportadas con alteración o deterioro de la superficie del caucho natural, caucho vulcanizado, neumáticos de caucho y poliisopreno (Xu et al., 2026).

4.4. Biomateriales de micelio como alternativa al plástico

La biomasa del micelio de los hongos está revolucionando la fabricación de objetos domésticos. Este material se cultiva en moldes sobre residuos agrícolas, donde las hifas crecen entrelazándose hasta formar una estructura sólida. Tras un proceso de secado, se obtienen platos, contenedores y embalajes que son tan resistentes como ligeros. A diferencia del plástico, estos productos se degradan por completo en cuestión de semanas, devolviendo nutrientes al suelo. Su producción aprovecha desechos reduciendo la huella de carbono. Aunque aún requieren mejoras en resistencia al agua y grasas, representan una alternativa sostenible, económicamente viable y libre de toxinas. Así, los hongos no solo limpian contaminación, sino que también la previenen, ofreciendo una solución concreta y prometedora para un futuro sin plásticos (Gutiérrez-Chávez y Hernández-Huerta, 2025).

5. Conclusión

A lo largo de este recorrido por el fascinante mundo de los hongos, hemos podido constatar que estos organismos son mucho más que simples estructuras que emergen del suelo. Constituyen un reino biológico extraordinariamente diverso y versátil, cuyas funciones ecológicas desde la descomposición de materia orgánica hasta la formación de redes simbióticas que sostienen ecosistemas enteros, resultan fundamentales para el equilibrio de la vida en el planeta. Su capacidad para establecer alianzas con plantas a través de las micorrizas, regular poblaciones mediante su acción parasitaria, e incluso alimentarse de radiación o degradar plásticos, revela un potencial biotecnológico aún en gran medida inexplorado. Sin embargo, este potencial no debe interpretarse como

una licencia para seguir contaminando. Los hongos ofrecen herramientas prometedoras para la biorremediación, el control biológico de plagas y la producción sostenible de alimentos y medicamentos, pero su aplicación efectiva requiere investigación rigurosa en condiciones controladas, así como políticas ambientales que prioricen la reducción, reutilización y reciclaje de residuos. La micorremediación, por sí sola, no resolverá la crisis ecológica global, pero integrada en un enfoque multidisciplinario puede contribuir significativamente a mitigar los impactos de la contaminación.

6. Referencias

- Benavides P., Góngora C.E., Giraldo M., Constantino L., Aceved, F., Navarro L., Laiton L. (2020). El Control Natural de Insectos en el Ecosistema Cafetero Colombiano. Cenicafé.
- Carrillo-Saucedo S.M., Puente-Rivera J., Montes-Recinas S., Cruz-Ortega R. (2022). Las micorrizas como una herramienta para la restauración ecológica. Acta botánica mexicana, (129).
- de Lucio-Flores S.A., Otazo-Sánchez E.M., Romero-Bautista L., Gaytán-Oyarzún J.C. (2021). Hongos macroscópicos como bioacumuladores de metales pesados. Pädi Boletín Científico de Ciencias Básicas e Ingenierías del ICB, 8(16), 60-65.
- Ekanayaka A.H., Tibpromma S., Dai D., Xu R., Suwannarach N., Stephenson S.L., Karunarathna S.C. (2022). A review of the fungi that degrade plastic. Journal of fungi, 8(8), 772.
- Gutiérrez-Chávez A., Hernández-Huerta J. (2025). Empaques hechos de hongos: Una alternativa ecológica al poliestireno. Revista de divulgación científica iBIO, 7(1), 203-203.

Hanna J. W. (2005). *Armillaria Ostoyae*, Genetic Characterization and Distribution in the Western United States (Doctoral dissertation, University of Idaho).

Herrera-Monroy S., Herrera-Monroy M., Rivera-Ramírez J.M. (2023). Revisión sistemática en torno a los hongos micorrízicos arbusculares y su importancia ecológica. Revista Chapingo Serie Agricultura Tropical, 3(2), 1-18.

Hernández V., Berlanga A. (1997). Uso de *Beauveria bassiana* como insecticida microbial. Ficha técnica CB-03. Centro Nacional de Referencia de Control Biológico. SAGAR Y CONASA. Tecoman, Col. 4p.

López Z.H.L., Incacutipa Y.E.C., Ramos R.H.P., Phatti G.M.A., Paredes A.D.P.G. (2025). Evaluación del comportamiento de *Aspergillus* spp en la degradación del plástico. Ciencia y Educación, 6(2), 48-53.

National Geographic España. (2020). Este hongo parásito controla a los insectos | National Geographic en Español [Vídeo]. YouTube.

Ramírez C. E., Rodríguez, C. R., Ortiz R. M. (2024). Hongos *Cordyceps* enemigos naturales de insectos y aliados de la humanidad. Pregones de Ciencia, (2), 36-43.

Sen S., Karati D., Priyadarshini R., Dua T. K., Paul P., Sahu, R., Nandi G. (2023). *Cordyceps sinensis* (yarsagumba): pharmacological properties of a mushroom. Pharmacological Research-Modern Chinese Medicine, 8, 100294.

Tibolla M. H., Fischer J. (2025). Radiotrophic fungi and their use as bioremediation agents of areas affected by radiation and as protective agents. Research, Society and Development, 14(1), e2514147965-e2514147965.

Treviño-Rangel, R.D.J., Villanueva-Lozano, H. (2024). *Cordyceps* más allá de la ficción. Ecofronteras, 16-19.

Tlachino V.M., Ortiz A.A., Olivo-Vidal Z.E. (2025). ¿Buenos o malos en el mundo de los hongos?. Ecofronteras, 14-17.

Xu R.F., Karunarathna S.C., Hyde K.D., Phukhamsakda C., Rapior S., Dai D.Q., Tibpromma S. (2026). Screening and identification of fungal species associated with early-stage deterioration of natural rubber. MycoKeys. 134, 119-156.

Desde el punto de vista genético, eso tuvo un efecto enorme: cuando una población se reduce de forma tan drástica, muchos linajes desaparecen por completo y los supervivientes transmiten con mayor peso las variantes que lograron persistir. En cierto sentido, la epidemia también redibujó el mapa genético del país (McCaa, 1995).e: cuando una población se reduce de forma tan drástica, muchos linajes desaparecen por completo y los supervivientes transmiten con mayor peso las variantes que lograron persistir. En cierto sentido, la epidemia también redibujó el mapa genético del país (McCaa, 1995).

En consecuencia, el ADN de los mexicanos modernos refleja no solo la mezcla entre españoles e indígenas, sino también el efecto de un filtro demográfico brutal.

Sobre los autores



Rosario Yadira Avalos Barajas. Es docente de la Ingeniería en Innovación Agrícola Sustentable, Es Bióloga y actualmente es alumna de la maestría en agrobiotecnología. Colabora en el Laboratorio de Biotecnología y desarrolla la línea de investigación de propagación in vitro de orquídeas.



Santos Zepeda Guzman. Es Biólogo y Maestro en Ciencias Biológicas. Es el responsable del Laboratorio de Fertilización Biológica, su línea principal de investigación es el estudio de hongos micorrízicos y su aplicación en la agricultura.



David Gamaliel Valdivia Avalos. Es estudiante de la Ingeniería en Innovación Agrícola Sustentable, su formación incluye la propagación in vitro de plantas y microorganismos.



Gamaliel Valdivia Rojas. Es biólogo y Maestro en Ciencias Biológicas, responsable del Laboratorio de Biotecnología. Las líneas principales son el mejoramiento genético de plantas, la propagación *in vitro* de plantas y los microorganismos aplicados a la agricultura.

Cita

Avalos Barajas, R. Y., Zepeda Guzmán, S., Valdivia Ávalos, D. G., & Valdivia Rojas, G. (2026). Hongos filamentosos: arquitectos de los ecosistemas. *Biotecnológica Magazine*, 44(4), 46-53. <https://doi.org/10.5281/zenodo.22283572>

El calamar y la bacteria que cosechan luz de la luna

Arturo Sánchez-Paz

Laboratorio de Virología. Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste (CIBNOR). Calle Hermosa 101, Col. Los Ángeles. Hermosillo, Sonora. México. CP. 83106.

Filosofando

La introducción del libro “El Horror Sobrenatural en la Literatura” de Howard Phillips Lovecraft comienza con una sentencia definitiva: “El miedo es una de las emociones más antiguas y poderosas de la humanidad, y el miedo más antiguo y poderoso es el temor a lo desconocido”. La incertidumbre suele operar como un elemento paralizante. Cuando se desconocen los motivos y el origen de un ataque sorpresa, el instinto de protección natural, aquel que garantizó la supervivencia de las especies, pierde el rumbo. Como consecuencia, las defensas se debilitan y la respuesta es tardía, dejando a los organismos vulnerables ante la súbita adversidad. Sin embargo, la incertidumbre también puede actuar como un motor que impulse la exploración de nuevos caminos y genere transformación.

En 1975 se estrenó la película “Tiburón” (Jaws) dirigida por Steven Spielberg. La escena inicial de la película es considerada una de las más memorables de la historia del cine. La escena, en la que una pareja de jóvenes corre por unas dunas de arena en una playa mientras se van desnudando para nadar en las aguas del mar bajo la luz de la luna, es acompañada por una inquietante banda sonora basada en el uso repetitivo de dos notas en registro grave que aumentan lentamente su ritmo. La muchacha, que evidentemente disfruta nadando en el agua, es atacada repentinamente, desde la oscura profundidad, por algo desconocido que la sacude violentamente de un lado a otro.

Durante casi un minuto tenso, el espectador es testigo de este inesperado y brutal ataque. Y repentinamente, la muchacha es arrastrada al fondo del mar y la calma vuelve a reinar en el ambiente. Sin embargo, el espectador incómodo sabe que la joven sufre y agoniza bajo la superficie, sin posibilidad de respirar y triturada entre las mandíbulas de algo inmensamente poderoso. El ejecutor de este temible ataque, un tiburón blanco de más de 6 metros, que continúa atacando a más personas a lo largo de la película, no aparece por completo en pantalla sino hasta después de 81 minutos.

Por supuesto, el espectador intuye que el feroz animal que ha cometido los sanguinarios ataques es un tiburón (el propio cartel publicitario lo muestra). Pero al ocultar su figura durante gran parte de la película, utilizando una banda sonora estremecedora, mostrando las reacciones de terror de las víctimas y valiéndose de niños como objetivos del ataque del tiburón (un recurso fundamental para elevar la tensión), Spielberg explota magistralmente el miedo primitivo y la ansiedad oculta e incontrolable del espectador ante el peligro inminente que puede representar lo desconocido. El miedo a algo que acecha en silencio en la penumbra. Pero claro, esta es una historia ficticia. Falso, sin embargo, no es lo que viene a continuación.

En los cálidos y azules mares que rodean el archipiélago de Hawái habita una gran cantidad de especies cuya distribución se limita a ese ecosistema (a esto se le denomina *endemismo* en biología). Debido a su geografía remota, el entorno natural único de Hawái se desarrolló de forma aislada. Este aislamiento provocó que casi el 25 % de las especies marinas que habitan las aguas de este arrecife se encuentren únicamente en los arrecifes de Hawái. Una de las especies endémicas de las costas hawaianas es un calamar muy curioso y simpático, cuyo nombre científico es *Euprymna scolopes*, aunque comúnmente se le conoce como calamar de cola corta. Al llegar a la adultez, los organismos de esta especie alcanzan una talla máxima de 3.5 centímetros (cabén fácilmente en la palma de la mano de un adulto). A diferencia de la gran mayoría de los calamares, que habitan en aguas oceánicas alejadas de la costa o en aguas muy profundas, *E. scolopes* vive en aguas costeras a profundidades que oscilan entre 0 y 5 metros, aunque se encuentra principalmente en aguas muy poco profundas (0 a 1 m). Durante el día, para escapar de los muy activos y voraces depredadores que los acechan (incluidas barracudas y focas monje hawaianas), esta especie de calamar se

oculta entre fondos arenosos y, como la mayoría de los calamares, sepias y pulpos, en condiciones de peligro, es capaz de liberar un chorro de tinta como mecanismo para evadir el ataque de sus hambrientos agresores. Durante el día, este calamar realiza incursiones esporádicas en la columna de agua para capturar presas, principalmente camarones *misidáceos*.

La situación cambia radicalmente al llegar la noche. Bajo el cobijo de la oscuridad, *E. scolopes* emerge de la arena y dedica más tiempo a la búsqueda frenética de alimento. Sus ojos prominentes están equipados con proteínas que reflejan la luz y con lentes que les permiten navegar y detectar cambios su intensidad, lo que los convierte en depredadores agresivos que prefieren presas que nadan activamente y que pueden llegar a ser entre dos y cuatro veces más grandes que ellos. Sin embargo, al exponerse en la oscuridad para capturar presas potenciales, también se arriesgan a ser atacados por sus depredadores. En el ambiente marino nocturno, distinguir las siluetas de presas potenciales contra la tenue luz superficial es una estrategia visual clave para obtener alimento. En el océano, la depredación nocturna suele producirse desde abajo, como en la película Tiburón, ya que los depredadores se sitúan en las profundidades más oscuras para distinguir la silueta de sus presas contra la luz residual que desciende hasta allí. Y así, para ocultar su silueta ante la tenue luz de la luna y las estrellas, el calamar *E. scolopes* ha adoptado una estrategia fascinante.

Tras eclosionar, los embriones de *E. scolopes* son colonizados casi de inmediato por la bacteria *Vibrio fischeri*, que se encuentra libre en el mar. Durante este primer encuentro, la abundante bacteria cubre el cuerpo entero del calamar y, al encontrar un lugar específico, los poros del órgano luminoso se adhieren a ellos. Entonces, las bacterias son introducidas en este

órgano mediante los movimientos de los cilios que lo rodean. Una vez reclutadas, durante las siguientes cuatro semanas, la presencia de las bacterias induce cambios en la morfología del órgano luminoso hasta que este “madura”. Este encuentro cambiará la vida de ambas especies para siempre. Solo cuando la bacteria se ha establecido en el órgano luminoso, los calamares comienzan a “ocultarse” de día y a “emerger” de noche. Por su parte, el metabolismo de la bacteria también se modifica, pasando de un proceso en el que utiliza la oxidación del glicerol-3-fosfato para transferir electrones directamente a la cadena de transporte de electrones para producir ATP durante el día a la fermentación de la quitina de las presas del calamar por la noche. Esto implica que, durante el día, la bacteria trabaja para satisfacer sus requerimientos energéticos, pero de noche se convierte en una complaciente acompañante del calamar. Al fermentar los azúcares de la quitina, se liberan ácidos orgánicos, lo que acidifica el interior del órgano luminoso. Esta acidificación es fundamental para la relación entre el calamar y la bacteria. El secreto capital de esta serie de hechos es que *V. fischeri* es una bacteria bioluminiscente que emite más luz cuando las condiciones del ambiente son más ácidas.

Este fenómeno se puede resumir de la siguiente forma: Durante las noches, el calamar captura y se alimenta de misidáceos, que poseen un esqueleto externo rico en quitina, la que es aprovechada por la bacteria, lo que, a su vez, hace que se acidifique su entorno y emita una mayor cantidad de luz en el órgano luminoso. La luz que se produce en este órgano no puede ser ni más ni menos intensa que la del cielo, ya que eso le costaría la vida al calamar. Por su parte, *E. scolopes* posee vesículas extraoculares cerca de sus ojos que le ayudan a medir la luz ambiental, lo que le permite regular, mediante el saco de tinta que rodea dicho órgano, la cantidad de luz emitida por *V. fischeri*. Así, la luz emitida por *V. fischeri* coincide exactamente con la intensidad de la luz de la luna y de las estrellas que desciende hacia las profundidades

del mar, encubriendo al calamar mientras esté activo por la noche, un fenómeno de evasión de depredadores denominado “contrailuminación”.

Esta relación, que se prolongará durante el resto de la vida del calamar, presenta una serie de detalles complejos que la destacan aún más. Cada mañana, al despuntar la primera luz, *E. scolopes* expulsa del órgano luminoso cerca del 95 % de las bacterias al mar, un proceso conocido como “ventilación”. A continuación, mientras el calamar permanece oculto en la arena hasta el atardecer, el 5 % de la población bacteriana que permaneció en dicho órgano se ha reproducido rápidamente hasta colmarlo de nuevo. Y así, esta especie de calamares emerge de la arena noche tras noche para capturar a sus presas, con una población bacteriana totalmente renovada.

Queda claro que, para que la relación entre ambas especies haya alcanzado tal éxito evolutivo (se ha sugerido que esta asociación tiene entre 30 y 80 millones de años de convivencia), debe existir una comunicación muy estrecha. La bacteria fijó selectivamente formas para evitar la respuesta inmune del calamar y, a la vez, *E. scolopes* regula su sistema de defensa. Un estudio reciente realizado por la Dra. Silvia Moriano-Gutiérrez y su equipo demostró que en la hemolinfa (un tejido fluido análogo a la sangre de los vertebrados) de *E. scolopes* circula una población de ARN muy particular: el ARN pequeño no codificante (sncARN, por sus siglas en inglés), producido por *V. fischeri*. Uno de dichos sncARNs, denominado *Ssra*, es envuelto en vesículas de la membrana bacteriana, transportado a las células que la rodean y, finalmente, absorbido por estas; de ahí, entra en circulación en la hemolinfa del calamar. Cuando los investigadores sustituyen el *Ssra* por una versión mutante ($\Delta Ssra$), la bacteria continúa con el proceso normal de colonización del hospedero (el calamar). Sin embargo, la bacteria sólo produce el 20 % de la luz que debería emitir y, a las 48 horas, el $\Delta Ssra$ comienza a

desaparecer. Aún más, cuando el *Ssra* circula en la hemolinfa del calamar, se sobreexpresan 10 genes y se ha observado que uno de ellos, RIG-1, colabora en el reconocimiento de la bacteria e induce la modulación de la respuesta inmune.

Por otro lado, para que esta muy íntima relación sea exitosa, es absolutamente indispensable la regulación de la respuesta inmune del calamar. *E. scolopes*, como todos los moluscos, posee unas células denominadas hemocitos, que circulan libremente en su hemolinfa y cumplen funciones de defensa, cicatrización y coagulación. Actualmente se reconoce que inmediatamente después de eclosionar, los hemocitos del calamar presentan un comportamiento muy diferente al interactuar con *V. fischeri* u otras bacterias. Por ejemplo, cuando los hemocitos del calamar entran en contacto con las bacterias *V. fischeri* y *V. harveyi*, solo esta última especie es fagocitada (la fagocitosis es un proceso mediante el cual una célula “engulle” y destruye microorganismos o partículas sólidas). Sin embargo, la capacidad de los hemocitos para unirse a las bacterias evoluciona con el tiempo, de modo que, a medida que el calamar envejece, los hemocitos parecen madurar y se unen a un número menor de células de *V. fischeri* en comparación con la respuesta ante otras bacterias. Evidentemente, la respuesta inmune del calamar evita causar daño a su socia incondicional.

Si bien es común afirmar que vivimos en un mundo dominado por comportamientos egoístas, las generalizaciones suelen ser imprecisas. No nos percatamos, o pretendemos no hacerlo, para justificar algunos comportamientos, preservar nuestra imagen y proteger nuestro ego, olvidando que la vida en nuestro planeta se sostiene gracias a una vasta red de cooperación. Los genes cooperan brindando la información para sintetizar las proteínas que dan estructura y soporte y cumplen funciones como defen-

sa, transporte y regulación de procesos vitales, los organelos (como las mitocondrias y los ribosomas) cooperan para formar células eucariotas, las células cooperan formando órganos y tejidos, las bacterias cooperan con los animales para suplementar nutrientes esenciales, descomponer alimentos difíciles y proteger la salud del huésped, los insectos cooperan y trabajan en equipo para mantener la vida en la Tierra a través de la polinización.

Nuestra propia especie es reflejo de este fenómeno; el éxito que hemos alcanzado como especie radica en nuestra extraordinaria capacidad de cooperar para construir sociedades que nos han permitido sobrevivir, dividir el trabajo, crear cultura y proteger a los vulnerables. Historicamente, la premisa de la “supervivencia del más apto” se ha reducido a suponer que competir con éxito con otros organismos por los recursos y los espacios ha permitido el desarrollo de la vida. Sin embargo, el conocimiento actual demuestra que la naturaleza no es un campo unidimensional, sino una fuente inagotable de estrategias, donde la cooperación y la competencia son dos fuerzas motoras que coexisten e impulsan la supervivencia de la vida en nuestro planeta.

Referencias

- Kane, C., Kosaki, R.K., y Wagner, D. (2014). High levels of mesophotic reef fish endemism in the Northwestern Hawaiian Islands. *Bulletin of Marine Science*, 90(2), 693-703.
- Moriano-Gutierrez, S., Bongrand, C., Essock-Burns, T., Wu, L., McFall-Ngai, M.J., y Ruby, E.G. (2020). The noncoding small RNA *SsrA* is released by *Vibrio fischeri* and modulates critical host responses. *PLoS Biology*, 18(11), e3000934.
- Nyholm, S.V., y McFall-Ngai, M.J. (2021). A lasting symbiosis: how the Hawaiian bobtail squid finds and keeps its bioluminescent bacterial partner. *Nature Reviews in Microbiology*. 19(10), 666-679.

Otjacques, E., Pissarra, V., Bolstad, K., Xavier, J.C., McFall-Ngai, M. y Rosa, R. (2023). Bioluminescence in cephalopods: biodiversity, biogeography and research trends. *Frontiers in Marine Science*, 10, 1161049.

Peyer, S.M., Pankey, M.S., Oakley, T.H., y McFall-Ngai, M.J. (2014) Eye-specification genes in the bacterial light organ of the bobtail squid *Euprymna scolopes*, and their expression in response to symbiont cues. *Mechanisms of Development*, 131, 111-126.

Pipes, B.L., y Nishiguchi, M.K. (2022) Nocturnal acidification: A coordinating cue in the *Euprymna scolopes-Vibrio fischeri* symbiosis. *International Journal of Molecular Sciences*, 23(7), 3743

Sobre el autor



El Dr. Arturo Sánchez-Paz es investigador titular encargado del Laboratorio de Virología del Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste en Hermosillo, Sonora, México. Su investigación ha generado más de 50 artículos publicados en revistas científicas internacionales y ha guiado y dirigido tesis de varios estudiantes de licenciatura y posgrado. Es miembro del SNII (II) y de la Academia Mexicana de Ciencias.

Cita

Sánchez-Paz, A. (2026). El calamar y la bacteria que cosechan luz de la luna. *Biotechnológica Magazine*, 4(4), 54-58.
<https://doi.org/10.5281/zenodo.22216858>

TAURINA:

Uso en dietas acuícolas de origen animal o vegetal

Compuesto clave para funciones del organismo en los peces. Su importación depende del origen de la dieta, especie y sistema de producción.



ACUMULACIÓN DE TAURINA EN TEJIDOS



1 DIETAS CON INGREDIENTES DE ORIGEN ANIMAL

La taurina está presente de forma natural.



Ejemplo: Harina de pescado, krill, caseína, gelatina.

- ✓ Cubre buena parte de las necesidades del pez.
- ✓ En cultivo, sigue siendo necesario aunque en menores cantidades.
- ✓ Buen crecimiento en varias especies.

Ejemplos de especies con buen desempeño: Corvina, Pez loro japonés.

2 DIETAS VEGETALES SIN SUPLEMENTACIÓN

Bajo o nulo aporte natural de taurina.



Ejemplo: Harina de soja, concentrados vegetales, maíz y trigo.

- ⚠ Disminuye el aporte natural de taurina.
- ⚠ Aumenta el riesgo de deficiencia, sobre todo en peces carnívoros marinos.
- ⚠ Puede afectar el crecimiento, el uso del alimento y la salud.

Ejemplos de especies afectadas sin taurina añadida: Robalo, Huachinango del Pacífico, Pámpano de Florida.

3 DIETAS VEGETALES CON TAURINA AÑADIDA

La suplementación vegetal mejora el desempeño.



- ✓ Recupera o mejora el crecimiento.
- ✓ Mejora la eficiencia en el uso del alimento.
- ✓ Aumenta el consumo y el aprovechamiento de los nutrientes.

4 PECES DE AGUA DULCE

Mayor capacidad para sintetizar taurina.

- ✓ Tolerar mejor la escasez de taurina que muchas especies marinas.

✓ También se benefician de la suplementación, especialmente con dietas vegetales.

Ejemplos:



MÁS ALLÁ DEL CRECIMIENTO

La taurina influye en la salud y funciones metabólicas



- Salud del hígado
- Metabolismo de las grasas
- Mejor digestión y absorción de lípidos
- Formación de sales biliares

⚠ La falta de taurina puede provocar alteraciones en el metabolismo de las grasas y en la salud del hígado.



La taurina es esencial para el crecimiento, la salud y el desempeño de los peces cultivados. Su suplementación es clave en dietas vegetales, especialmente para especies marinas carnívoras, pero su necesidad y respuesta dependen de la especie y del contexto productivo.

Autores: Marco Antonio Hernández de Dios, Yvonne Caro Martínez, Milnera Concepción Maldonado García.

Correspondencia: mahernandez@cihnor.mx

Biología
Magazine

CI3

