Noviembre 2026 - febrero 2027 | Vol. 8 | No. 3 | e-ISSN 2954-4890

Revista de divulgación científica iBIO

Biotecnología a la vanguardia



Revista de divulgación científica iBIO, Año 8, No. 3, noviembre 2026 - febrero 2027, es una publicación electrónica cuatrimestral. Insurgentes norte 1260 509, Capultitlán, Gustavo A. Madero CP:07370, Ciudad de México, México. Página electrónica de la revista: www.revistaibio.com y dirección electrónica: jessica.sanchezvarg@gmail.com. Editor responsable: Jessica Sánchez Vargas. Certificado de Reserva de Derechos al Uso Exclusivo de Título: 04-2023-010910182600-102. ISSN: 2954-4890. Ambos otorgados por el Instituto Nacional del Derecho de Autor.

Responsable de la última actualización de este número: Dra. Jessica Sánchez Vargas. Fecha de última modificación: 24 de octubre de 2026. Tamaño del archivo: 37 MB.

Los derechos de publicación y distribución de los artículos pertenecen a la Revista de divulgación científica iBIO. Los artículos se publican bajo un licenciamiento de tipo:
Reconocimiento - No Comercial - Sin Obra Derivada (CC BY-NC-ND 4.0).

Se permite el autoarchivo o depósito de los trabajos en su versión post-publicación (versión editorial) en cualquier repositorio personal, institucional o temático, así como redes sociales o científicas.

Imagen de portada creada con Google Gemini (versión Gemini 3.5 Flash, 2026).

Directorio

Editor en jefe
Jessica Sánchez Vargas

Editor subjefe
Isauro Guzman Cortez

Editores asociados
Viridiana W. Velázquez Vázquez
Briseida Flores Tufiño
Olga B. Benítez López
Francisco J. Valdés Parada
Claudia Sinahi Ortega Aguilar
Ana Isabel Cota Magaña
Alejandro Lara Meléndez
Ricardo Alfonso González Hernández

Galerado
Jessica Sánchez Vargas
Francisco J. Valdés Parada

Redes sociales
Bryan A. Polito Palma

revistaibio.com **/revista.ibio** **ibio.revista**

Licenciamiento bajo el cual se publican los contenidos: CC BY-NC-ND 4.0

Contenido

Artículo	Pág.	Dificultad de la lectura
Hot Science		
El potencial de los alimentos fermentados: más allá de la tradición *Claudia Mercedes Gómez-Navarro, María de Lourdes Reyes-Escogido*	5	
Lactobacilos y la producción ecológica de nanopartículas de plata con actividad antibacteriana *Mary José Huitrón-García, María de Lourdes Reyes-Escogido*	11	
Bacterias en camarón de mercados del noroeste de México *Francisco Cadena-Cadena, Odilia Azucena Higuera-Barraza, Joe Luis Arias-Moscoso*	17	
El poder cicatrizante de Lycoperdon perlatum: Uso de un hongo medicinal en el proceso de cicatrización de heridas *Oscar Wilder Montiel Lucio, María Guadalupe González Pedroza, Cristina Burrola Aguilar*	23	
Socios invisibles: microorganismos que ayudan al agave a sobrevivir en el desierto *Mónica Robles-Arias, Ulises Carrasco-Navarro, Alma E. Cruz-Guerrero*	29	
Contaminación ambiental por el desgaste de neumáticos: un problema químico invisible *María Fernanda Ramírez-Manjarrez, Israel Castro-Ramírez, Omar Cruz-Santiago*	35	
Hongos endófitos: aliados ocultos de las plantas *Aura Jimena De La Rosa Lucas, Hypatia Arano Varela*	41	
Cuando la pared celular lucha: el papel de los xiloglucanos durante la micorrización arbuscular *Luis Gerardo Sarmiento-López, Melina López-Meyer, Mariana Esther Cesario-Solis*	46	
Neuropéptidos de mosquito: controlando la fisiología de un vector de enfermedades mortales *Karla Karina Guzman-Rabadan, Salvador Hernández-Martínez*	53	
Nanopartículas emergentes como alternativa a los pesticidas agrícolas *Luis Fernando Beltrán Villanueva, Verónica Campos Ibarra, Ravichandran Manisekaran*	59	
Reposicionamiento de fármacos: nuevos usos para medicamentos conocidos *Mayra Lozano-Espinosa, Arturo Rojo-Domínguez*	65	
CRISPR-Cas: el nuevo superdetective del cáncer *Katherine del Socorro Luna Abundis, Órfil González Reynoso, Javier Alejandro Delgado Nungaray*	72	

Licenciamiento bajo el cual se publican los contenidos: CC BY-NC-ND 4.0

Artículo	Pág.	Dificultad
¿Cómo funciona?		
Genes reporteros: linternas en el laboratorio *Dennia Fabiola Gómez Acosta, Antonia Guitérrez Mora, Rafael Urrea López*	78	
El mundo a través de una hoja de luz: La microscopía lightsheet *Gonzalo González-Domínguez , Javier Rodrigo Prado-Baeza*	85	
¿Cómo 'traducimos' el ADN? La ciencia detrás de la lectura de nuestro código genético *Valentín Pérez-Hernández, Mario Hernández-Guzmán*	93	
Aplicaciones de los surfactantes producidos por bacterias *Luis Alfonso Cruz Acevedo, Eric Pascal Houbron, Michel de la Cruz Canul Chan*	98	
Frutos de Latinoamérica con potencial cosmético: una mirada desde la bioprospección *Camilo Monroy-Forero, Ludy Pabón, Vanessa Gomez*	104	
El ciclo verde del biogás: microalgas y bacterias transformando desechos en bienestar local *Mario Longinos-Juarez, Wenceslao Bonilla-Blancas, Armando González-Sánchez*	78	
Arte en ciencia e ingeniería		
VIRI y el viaje de la medicina dirigida *Francisca Villanueva-Flores, Igor García-Atutxa*	119	
Código rojo: ¡La piel está bajo ataque! *Iliana C. Martínez-Ortíz, Francisca Villanueva-Flores*	124	
Concientifica		
La Citogenética y sus aportaciones en el desarrollo de las ciencias *Viridiana García-Rodríguez, Dalia Molina-Romero, Verónica Cepeda-Cornejo*	128	
La paradoja verde: El desafío metalúrgico de la transición energética *Alfredo Brito-Franco, Ana Karen Gálvez-Larios, Jorge Luis Hernández-Morelos*	135	
Los minerales como aliados en la bioingeniería *Jorge Luis Hernandez Morelos, Ana Karen Galvez Larios*	140	
Potencial actual de camellones y canales prehispánicos de la sabana de Bogotá *Angela María Patiño-López, Luz Andrea García Caycedo, Freddy Rodríguez-Saza*	145	
Microbichos		
Probióticos: pequeños aliados que cuidan nuestra salud *Areli Alejandra Robles-Bencomo, Ismael Ortiz-Aguirre*	151	

Licenciamiento bajo el cual se publican los contenidos: CC BY-NC-ND 4.0

Recibido: 17-sep-2025 *Aceptado: 15-may-2026* *e-ISSN 2954-4890*

Sección: *Hot Science*

El potencial de los alimentos fermentados: más allá de la tradición

The potential of fermented foods: moving beyond tradition

*Claudia Mercedes Gómez-Navarro**
María de Lourdes Reyes-Escogido

Laboratorio de Investigación en Metabolismo. Departamento de Medicina y Nutrición, División de Ciencias de la Salud, Campus León, Universidad de Guanajuato, Guanajuato, México.

**Autor para la correspondencia: claumeche@hotmail.com*

RESUMEN

Los alimentos fermentados forman parte del patrimonio gastronómico de diversas culturas y, gracias a los avances científicos, hoy es posible comprender mejor su composición y su potencial impacto en la salud. Sus propiedades se relacionan tanto con la presencia de microorganismos vivos o inactivados, como con los compuestos bioactivos generados durante la fermentación. Este artículo presenta ejemplos de fermentados tradicionales de México y otros países, destacando su valor cultural y su creciente relevancia en la biotecnología alimentaria. Con un enfoque basado en la evidencia, se busca promover su consumo informado además de reconocer la interacción entre tradición y ciencia.

Palabras clave: Alimentos fermentados, probióticos, postbióticos.

SUMMARY

Fermented foods constitute a fundamental component of the gastronomic heritage of diverse cultures. Advances in science have enabled a more comprehensive understanding of their composition and potential health effects. Their properties are linked not only to the presence of viable or inactivated microorganisms but also to the bioactive compounds generated during fermentation. This article examines examples of traditional fermented foods from Mexico and other countries, highlighting their cultural significance and their increasing relevance in food biotechnology. From an evidence-based perspective, it seeks to promote informed consumption while underscoring the dynamic interplay between tradition and science.

Keywords: Fermented foods, probiotics, postbiotics.

Licenciamiento bajo el cual se publican los contenidos: CC BY-NC-ND 4.0

Introducción

En distintas culturas del mundo, los alimentos fermentados han sido parte esencial de la cocina tradicional, valorados por su sabor y por su capacidad de conservar, transformar y enriquecer los ingredientes. Actualmente han despertado el interés de la ciencia, que estudia su composición, sus microorganismos y los compuestos generados durante la fermentación. Esto ha dado lugar a preguntas clave: ¿cuáles son sus beneficios reales? ¿Todos los fermentados contienen probióticos? Mientras algunos aportan microorganismos vivos con efectos comprobados, otros deben su valor a sustancias bioactivas, o a la combinanación de ambos [1-3]. Comprender estas diferencias permite valorar su verdadero potencial más allá de mitos o tendencias. Este artículo aborda los conceptos de probióticos y postbióticos, y presenta ejemplos tradicionales de México y otras partes del mundo, destacando su riqueza cultural, sus propiedades funcionales y sus posibles aplicaciones en salud y nutrición desde la perspectiva de la microbiología y la biotecnología.

Desarrollo

El regreso de los fermentados

La fermentación es una de las técnicas de conservación más antiguas de la humanidad. Mucho antes de que se conociera el mundo microscópico, distintas culturas ya empleaban procesos naturales para transformar ingredientes frescos en alimentos más seguros, duraderos y con sabores únicos [1, 4]. Aunque originalmente se guiaba por la experiencia empírica, hoy se entiende que estos procesos están mediados por comunidades microbianas que cumplen funciones específicas en la transformación de los alimentos [4].

Durante la fermentación, bacterias y levaduras transforman los azúcares en compuestos como ácidos orgánicos y sustancias bioactivas que pueden tener efectos beneficiosos, como reducir la inflamación o mejorar la digestión. Estos compuestos también favorecen el equilibrio de la microbiota intestinal, lo que contribuye a una mejor absorción de nutrientes y una respuesta inmune adecuada [2, 3].

Diversidad microbiana en fermentados y su relación con los probióticos

Uno de los principales atractivos de los alimentos fermentados es su diversidad microbiana, que incluye bacterias ácido-lácticas y ácido-acéticas así como levaduras [1, 4-5]. Algunas de las más comunes, como *Lactobacillus*, *Leuconostoc* y *Saccharomyces*, participan en fermentaciones de lácteos, vegetales y bebidas como el kéfir, el pozol o la kombucha [4, 6-8].

Aunque en los fermentados existe una gran diversidad microbiana, no todos los fermentados pueden considerarse probióticos ya que para esto, los microorganismos presentes deben cumplir tres condiciones: identificarse a nivel de cepa, ya que los efectos pueden variar incluso dentro de una misma especie; encontrarse en cantidades adecuadas, entre 10^6 y 10^9 unidades formadoras de colonias (UFC) por porción, según lo demostrado en estudios clínicos; y mantenerse vivos al momento del consumo, con la capacidad de sobrevivir al paso por el tracto gastrointestinal [1, 2]. Aunque muchos fermentados tradicionales no cumplen con estos requisitos, siguen siendo valiosos por los compuestos beneficiosos que se generan durante su fermentación [3].

¿Qué pasa cuando los microorganismos ya no están vivos? El papel de los postbióticos

Aunque gran parte del interés se centra en los probióticos, también los compuestos generados durante la fermentación pueden beneficiar la salud incluso cuando los microorganismos ya no están vivos. A estos se les co-

Licenciamiento bajo el cual se publican los contenidos: CC BY-NC-ND 4.0



Figura 1. *Relación entre alimentos fermentados, microorganismos y los compuestos bioactivos generados durante la fermentación, conocidos como postbióticos. Entre ellos se incluyen ácidos orgánicos, enzimas, péptidos, exopolisacáridos y bacterias no vivas, los cuales pueden favorecer la salud intestinal. Elaboración propia.*

noce como postbióticos, los cuales incluyen metabolitos, fragmentos celulares y otras moléculas bioactivas producidas por BAL y levaduras, que mantienen su efecto positivo aun si las células han sido eliminadas o inactivadas [2, 3].

Ejemplos de alimentos con postbióticos son el pan de masa madre, donde el horneado elimina los microorganismos pero persisten compuestos que mejoran la digestión, o vegetales fermentados pasteurizados como el kimchi o el chucrut, que aún conservan sustancias con posibles efectos antioxidantes, antimicrobianos o inmunomoduladores [4, 9].

Entre los postbióticos identificados se encuentran ácidos orgánicos, bacteriocinas, vitaminas del grupo B y polisacáridos solubles y exopolisacáridos (EPS) que producen ciertas bacterias durante la feremntación. Estos compuestos pueden favorecer el equilibrio intestinal, fortalecer la barrera intestinal, modular la respuesta inmunológica y contribuir a la salud metabólica. Debido a estas propiedades, los postbióticos han despertado interés como una alternativa prometedora para promover la salud sin depender de la viabilidad microbiana en el alimento final [2, 3].

La Figura 1 muestra de manera esquemática cómo los alimentos fermentados, a través de los microorganismos y los compuestos bioactivos generados durante la fermentación, pueden aportar postbióticos que contribuyen a la salud intestinal [2, 3].

Fermentados que representan a México y al mundo

En todo el mundo, recetas transmitidas por generaciones han permitido que microorganismos transformen ingredientes simples en productos con propiedades únicas [4]. En México, bebidas como el tepache, el pulque y el pozol, así como el jocoque, forman parte de la identidad gastronómica [6-8, 10]. A nivel internacional, fermentados como el kéfir, el kimchi, el chucrut o la kombucha se han popularizado por su valor culinario y sus posibles beneficios para la salud [4, 5, 9].

Aunque su composición microbiana y valor nutricional varían según los ingredientes y el método de elaboración, muchos de estos alimentos generan compuestos bioactivos con potencial funcional [1-3]. Para comprender mejor esta diversidad, resulta útil combinar una visión general con ejemplos concretos. La Figura 2 ilustra algunos fermentados de México y de otros países, mientras que la Tabla 1 detalla su preparación, los microorganismos identificados y las propiedades funcionales documentadas.

Licenciamiento bajo el cual se publican los contenidos: CC BY-NC-ND 4.0

Tabla 1. *Propiedades potenciales de fermentados seleccionados según evidencia científica*

Fermentado	Preparación	Microorganismos identificados	Propiedades funcionales (según la evidencia disponible)
Jocoque (México)	Fermentación láctica de leche	*Lactococcus, Leuconostoc, Streptococcus*	Fuente de bacterias lácticas potencialmente benéficas para la microbiota intestinal
Tepache (México)	Fermentación de cáscaras de piña con piloncillo y especias	*Lactobacillus, Leuconostoc, Lactococcus, Acetobacter*	Actividad antioxidante y antimicrobiana
Pozol (México)	Masa de maíz nixtamalizado fermentada bajo hojas de plátano	*Streptococcus, Lactobacillus, Weissella, Enterococcus*	Degradación de almidón y producción de aminoácidos y vitaminas
Pulque (México)	Fermentación del aguamiel del maguey	*Lactiplantibacillus plantarum, Levilactobacillus brevis*	Producción de compuestos antioxidantes, péptidos antimicrobianos y posible papel de los fructanos como prebiótico
Kéfir (Internacional)	Leche o bebida vegetal fermentada con gránulos de kéfir	*Lacticaseibacillus paracasei, Lactobacillus plantarum*	Actividad antimicrobiana y efectos inmunomoduladores
Kimchi (Corea)	Vegetales fermentados con especias, ajo y jengibre	*Leuconostoc mesenteroides, Weissella koreensis*	*Mejora de indicadores metabólicos y aumento de la diversidad microbiana intestinal en humanos
Chucrut (Europa del Este)	Col fermentada en salmuera	*Lactobacillus plantarum, Leuconostoc spp.*	Producción de exopolisacáridos con actividad antioxidante
Kombucha (Internacional)	Té endulzado fermentado con SCOBY	*Komagataeibacter, Acetobacter, Zygosaccharomyces*	*Actividad antioxidante, antimicrobiana y posible modulación glucémica en humanos
Pan de masa madre (Internacional)	Fermentación espontánea de harina y agua, posteriormente es horneado	*Lactobacillus sanfranciscensis, Lactobacillus plantarum*	La fermentación reduce FODMAP y puede mejorar la biodisponibilidad de minerales

Nota: SCOBY: Comunidad Simbiótica de Bacterias y Levaduras. FODMAP: carbohidratos fermentables (Oligo-, Di-, Mono-sacáridos y Poliol) que pueden causar molestias digestivas en personas sensibles. *Ensayos clínicos en humanos: estudio clínico que compara un grupo de intervención con un grupo control. La información de esta tabla fue compilada a partir de las referencias 4-10.

Licenciamiento bajo el cual se publican los contenidos: CC BY-NC-ND 4.0



Figura 2. *Ejemplos representativos de fermentados tradicionales de México y de otros países, clasificados en lácteos, vegetales, cereales y bebidas. Elaboración propia.*

El valor biotecnológico de los fermentados

El estudio de los fermentados no solo preserva tradiciones, sino también abre oportunidades para la salud y nutrición. Gracias a los avances en microbiología y biotecnología, hoy es posible aislar y caracterizar microorganismos de interés, así como aprovechar los compuestos bioactivos que producen [2, 4].

Entre las principales aplicaciones y oportunidades destacan:

• **Alimentos funcionales**: añadir cepas probióticas o compuestos postbióticos a productos nuevos o tradicionales [2].

• **Uso de compuestos bioactivos**: aprovechar ácidos orgánicos, enzimas y péptidos antimicrobianos como conservadores naturales o ingredientes funcionales [3].

• **Fermentaciones optimizadas**: controlar factores como temperatura, tiempo o mezcla microbiana para mejorar calidad y estabilidad [4].

• **Conservación microbiana**: preservar cepas nativas para futuras investigaciones y aplicaciones industriales [6-10].

Así, la ciencia convierte el conocimiento ancestral en soluciones modernas, uniendo tradición y biotecnología para proyectar a los fermentados como aliados de la salud y la innovación alimentaria.

Conclusión

Los fermentados tradicionales, además de ser parte invaluable del patrimonio culinario de diversas culturas, representan una fuente rica de microorganismos y compuestos con potencial funcional. Hoy se comprende mejor su composición y beneficios, más allá de la presencia de microorganismos vivos.

El avance de la microbiología y la biotecnología abre nuevas posibilidades para aprovechar estos alimentos en la promoción de la salud y el desarrollo de productos innovadores. Con ello, los fermentados se consolidan no solo como herencia cultural, sino también como herramientas actuales para una alimentación saludable basada en evidencia científica.

Referencias

[1] Marco, M. L., Sanders, M. E., Gänzle, M., Arrieta, M.-C., Cotter, P. D., De Vuyst, L., Hill, C., Holzapfel, W., Lebeer, S., Merenstein, D., Reid, G., Wolfe, B. E., & Hutkins, R. (2021). The International Scientific Association for Probiotics and Prebiotics (ISAPP) consensus statement on fermented foods. *Nature Reviews Gastroenterology & Hepatology*, 18(3), 196–208. https://doi.org/10.1038/s41575-020-00390-5

[2] Vinderola, G., Cotter, P. D., Freitas, M., Gueimonde, M., Holscher, H. D., Ruas-Madiedo, P., Salminen, S., Swanson, K. S., Sanders, M. E., & Cifelli, C. J. (2023). Fermented foods: A perspective on their role in delive-

Licenciamiento bajo el cual se publican los contenidos: CC BY-NC-ND 4.0

ring biotics. *Frontiers in Microbiology*, 14, 1196239. https://doi.org/10.3389/fmicb.2023.1196239

[3] Shah, A. M., Tarfeen, N., Mohamed, H., & Song, Y. (2023). Fermented foods: Their health-promoting components and potential effects on gut microbiota. *Fermentation*, 9(2), 118. https://doi.org/10.3390/fermentation9020118

[4] Tamang, J. P., Cotter, P. D., Endo, A., Han, N. S., Kort, R., Liu, S. Q., Mayo, B., Westerik, N., & Hutkins, R. (2020). Fermented foods in a global age: East meets West. Comprehensive *Reviews in Food Science and Food Safety*, 19(1), 184–217. https://doi.org/10.1111/1541-4337.12520

[5] Ecklu-Mensah, G., Miller, R., Maseng, M. G., Hawes, V., Hinz, D., Kim, C., & Gilbert, J. A. (2024). Modulating the human gut microbiome and health markers through kombucha consumption: a controlled clinical study. *Scientific Reports*, 14(1), 31647. https://doi.org/10.1038/s41598-024-80281-w

[6] Carboni, A. D., Martins, G. N., Gómez-Zavaglia, A., & Castilho, P. C. (2023). Lactic Acid Bacteria in the Production of Traditional Fermented Foods and Beverages of Latin America. *Fermentation*, 9(4), 315. https://doi.org/10.3390/fermentation9040315

[7] Gutiérrez Sarmiento, W., Peña Ocaña, B. A., Lam Gutiérrez, A., Guzmán Albores, J. M., Jasso Chávez, R., & Ruíz Valdiviezo, V. M. (2022). Microbial community structure, physicochemical characteristics and predictive functionalities of the Mexican tepache fermented beverage. *Microbiological Research*, 260, 127045. https://doi.org/10.1016/j.micres.2022.127045

[8] López-Sánchez, R., Hernández-Oaxaca, D., Escobar-Zepeda, A., Ramos Cerrillo, B., López-Munguía, A., & Segovia, L. (2023). Analysing the dynamics of the bacterial community in pozol, a Mexican fermented corn dough. *Microbiology* (Reading, England), 169(7), 001355. https://doi.org/10.1099/mic.0.001355

[9] Graça, C., Lima, A., Raymundo, A., & Sousa, I. (2021). Sourdough Fermentation as a Tool to Improve the Nutritional and Health-Promoting Properties of Its Derived-Products. *Fermentation*, 7(4), 246. https://doi.org/10.3390/fermentation7040246

[10] Ruiz Ramírez, Y., Valadez Blanco, R., Calderón García, C., Chikindas, M. L., & Ponce Alquicira, E. (2023). Probiotic and functional potential of lactic acid bacteria isolated from pulque and evaluation of their safety for food applications. *Frontiers in Microbiology*, 14, 1241581. https://doi.org/10.3389/fmicb.2023.1241581

Licenciamiento bajo el cual se publican los contenidos: CC BY-NC-ND 4.0

Recibido: 11-feb-2026 Aceptado: 24-jun-2026 e-ISSN 2954-4890

Sección: *Hot Science*

Lactobacilos y la producción ecológica de nanopartículas de plata con actividad antibacteriana

Lactobacilli and the green production of silver nanoparticles with antibacterial activity

Mary José Huitrón-García[1]
María de Lourdes Reyes-Escogido[2]*

[1]*Laboratorio de Microbiología,* [2]*Laboratorio de Metabolismo. Departamento de Medicina y Nutrición, División de Ciencias de la Salud, Campus León, Universidad de Guanajuato, Guanajuato, México.*

Autor para la correspondencia: ml.reyes@ugto.mx

RESUMEN

La creciente resistencia antimicrobiana representa un desafío de salud global que dificulta el tratamiento de diversas infecciones. Ante este escenario, las nanopartículas de plata han surgido como una alternativa para la eliminación de patógenos. Aunque existen múltiples rutas de obtención, la síntesis mediada por microorganismos o sus metabolitos destaca por su sostenibilidad. Dentro de este enfoque, el uso de lactobacilos resulta especialmente prometedor, ya que permite un control más preciso sobre la morfología y el tamaño de las nanopartículas, optimizando así su potencia antibacteriana.

Palabras clave: AgNPs, lactobacilos, actividad antibacteriana.

SUMMARY

The growing antimicrobial resistance represents a global health challenge that complicates the treatment of various infections. In this scenario, silver nanoparticles have emerged as an effective alternative for pathogen elimination. Although there are multiple synthesis routes, biogenic synthesis mediated by microorganisms or their metabolites stands out for its sustainability. Within this approach, the use of lactobacilli is particularly promising, as it allows for more precise control over the morphology and size of the nanoparticles, thereby optimizing their antibacterial potency.

Keywords: AgNPs, lactobacilli, antibacterial activity.

Licenciamiento bajo el cual se publican los contenidos: CC BY-NC-ND 4.0

Introducción

En los últimos años, el campo de la nanotecnología ha atraído la atención debido a sus múltiples aplicaciones. Las nanopartículas de plata (AgNPs), en particular, destacan por su histórica y comprobada actividad antibacteriana. Ante el aumento de bacterias que han desarrollado resistencia a múltiples antibióticos – fenómeno conocido como multirresistencia-, el tratamiento de las infecciones se ha vuelto cada vez más difícil. En este contexto, las AgNPs surgen como una alternativa eficaz para la eliminación de estos patógenos.

Estas diminutas partículas pueden obtenerse mediante distintos métodos físicos, químicos o biológicos. Entre ellos, los procesos biológicos han ganado popularidad porque son sencillos, rápidos y ecológicos, ya que, en lugar de emplear sustancias químicas, utilizan organismos vivos como bacterias, hongos o plantas para llevar a cabo la síntesis utilizando una sal como sustrato [1].

El empleo de bacterias para la síntesis de AgNPs, ofrece la ventaja de que estos microorganismos pueden crecer en medios de cultivo simples, esto es que se elaboran con los nutrientes básicos necesarios para su crecimiento, y son económicos. Además, las bacterias se desarrollan con mayor rapidez en comparación con los hongos y las plantas, los cuales requieren periodos más prolongados tanto para su crecimiento como para la producción de las nanopartículas.

Algunas bacterias, incluidos ciertos lactobacilos, tienen la capacidad de sintetizar AgNPs de forma intracelular o extracelular [2]. Este proceso involucra la participación de enzimas reductoras, como las nitrato reductasas y las óxido reductasas, así como de proteínas, polisacáridos y otros compuestos que se generan durante el crecimiento bacteriano, conocidos en conjunto como metabolitos. Estos compuestos actúan reduciendo los iones de plata (Ag^{+}) a plata metálica (Ag^{0}), dando lugar a la formación de nanopartículas. Además, las proteínas y polisacáridos pueden actuar como agentes estabilizadores, evitando la agregación de las nanopartículas y favoreciendo su estabilidad. Esto es importante, ya que tanto la morfología como el tamaño influyen directamente en su capacidad antimicrobiana: a menor tamaño, mayor es la efectividad; por lo tanto, la aglomeración de las nanopartículas reduce significativamente su potencia biológica.

¿Qué son las nanopartículas de plata?

Las AgNPs son estructuras extremadamente pequeñas: miden entre 1 y 100 nanómetros, lo que significa que son miles de veces más delgadas que un cabello humano. A pesar de su reducido tamaño, pueden presentar una gran variedad de formas, como esferas, barras, cubos, triángulos, hexágonos, flores, además de otras [3] (Figura 1).

Debido a sus propiedades fisicoquímicas, las AgNPs se han incorporado a una amplia gama de productos comerciales, tales como apósitos, hidrogeles, ungüentos, recubrimientos para catéteres y sondas, filtros para agua, ropa, forros y plantillas de zapatos, así como películas biodegradables para el empaque de alimentos [4]. Todos estos artículos tienen como objetivo reducir o eliminar la proliferación de bacterias y otros microorganismos, como hongos y virus. Además, al inhibir ciertas bacterias, es posible prevenir los malos olores generados por su actividad metabólica (figura 2).

En general, para la elaboración de estos productos, las AgNPs se incorporan directamente en la matriz que se utiliza de soporte, como las ceras empleadas en la formulación de ungüentos o los polímeros utilizados en hidrogeles, apósitos y empaques. Por ejemplo, en el caso particular de los textiles, el método

Licenciamiento bajo el cual se publican los contenidos: CC BY-NC-ND 4.0



Figura 1. *Las AgNPs pueden presentarse en diversas morfologías, tal como se ilustra en la figura, siendo la esférica la más común. Los tamaños pueden variar entre 1 nm y 100 nm, dependiendo de los métodos de síntesis empleados. Ilustración creada con Gemini.*



Figura 2. *En el mercado se pueden conseguir productos como cremas, apósitos, desodorantes, recubrimientos antibacterianos, limpiadores, ropa, filtros para agua, etc. La función principal de estos productos es inhibir la proliferación microbiana. Ilustración creada con Gemini.*

más común consiste en sumergirlos en soluciones que contienen AgNPs y, posteriormente, secarlos a altas temperaturas para favorecer la adhesión de las nanopartículas a las fibras. Es importante señalar que el proceso de fabricación varía en función del producto que se desee obtener [5].

¿Qué son los lactobacilos y cómo producen nanopartículas de plata?

Los lactobacilos pertenecen a un grupo de bacterias conocidas como bacterias ácido-lácticas (BAL); muchas de ellas poseen efectos benéficos para la salud humana y son consideradas como probióticas, estando

Licenciamiento bajo el cual se publican los contenidos: CC BY-NC-ND 4.0

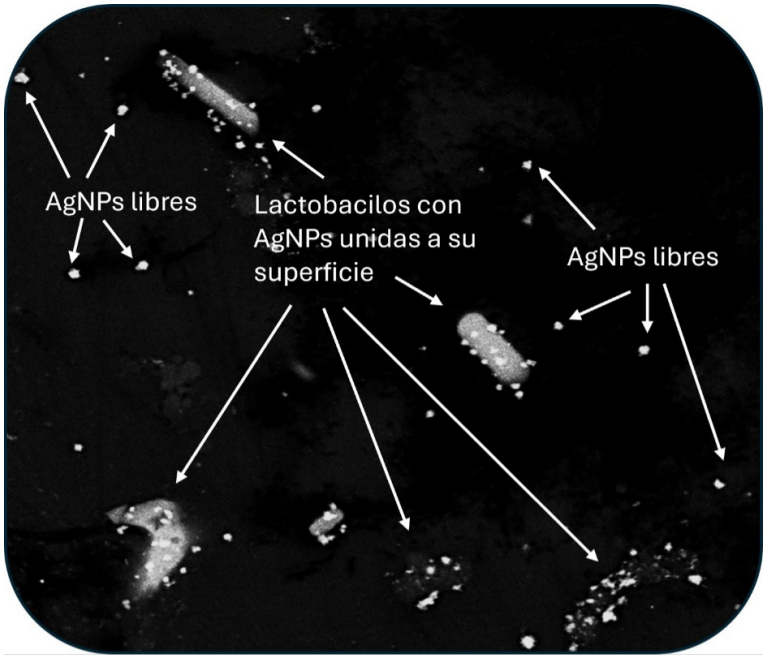


Figura 3. *Las AgNPs sintetizadas por los metabolitos de los lactobacilos presentes en el medio se encuentran libres. Por otro lado, la bacteria puede sintetizar las nanopartículas de forma intracelular y después liberarlas al medio, o bien de manera extracelular empleando componentes de su propia estructura, lo que mantiene las nanopartículas adheridas a la superficie celular. La imagen obtenida mediante un microscopio electrónico de barrido permite apreciar tanto la morfología de las células bacterianas como la presencia y distribución de las nanopartículas. Imagen propia del autor.*

presentes en alimentos de consumo habitual como el yogurt.

Algunas de estas bacterias tienen la capacidad de sintetizar AgNPs a partir de una sal de plata, sin necesidad de utilizar otras sustancias químicas. A este proceso se le conoce como “síntesis verde” ya que, al utilizar los organismos vivos o sus metabolitos, se reduce significativamente el impacto ambiental.

Aunque la principal función de las AgNPs es su actividad antimicrobiana, en algunas bacterias, como los lactobacilos, este efecto puede verse atenuado. Esto se debe a que las AgNPs que se generan pueden quedar encapsuladas por las proteínas y polisacáridos presentes en el medio de cultivo, lo que reduce su toxicidad y favorece la supervivencia bacteriana. Además, la pared celular de estos microorganismos es relativamente gruesa, por lo que actúa como una barrera física que dificulta la penetración de las nanopartículas y, en consecuencia, disminuye sus efectos adversos.

Las AgNPs pueden formarse tanto dentro (intracelular) como fuera (extracelular) de la célula bacteriana [6]. En consecuencia, las nanopartículas, pueden localizarse dentro de la célula, o fuera de ella ya sea adheridas a su superficie o libres en el medio (Figura 3). Esto sugiere que tanto los metabolitos secretados por la bacteria como algunos componentes estructurales de la célula pueden participar en el proceso de síntesis.

En la producción extracelular, se emplea el medio de cultivo que contiene los compuestos liberados por las bacterias durante su crecimiento. Entre estos compuestos se encuentran enzimas, proteínas, ácidos orgánicos, iones, polisacáridos e incluso pigmentos, los cuales actúan como agentes reductores. Posteriormente, el medio libre de células bacterianas se mezcla con una sal de plata, y los compuestos presentes en él reducen los iones de plata para formar nanopartículas. Al mismo tiempo, algunos de estos compuestos actúan como agentes estabilizadores, evitando la aglomeración de las nanopartículas [6].

En cambio, en la producción intracelular, la sal de plata se añade directamente al medio de cultivo donde crecen los lactobacilos. Las nanopartículas se forman dentro de las células bacterianas durante su crecimiento. Este método permite un mayor control sobre el tamaño y la forma de las AgNPs, ya que pueden ajustarse parámetros como el pH, la temperatura o la composición del medio.

Desde un punto de vista práctico, la producción extracelular suele preferirse porque facilita la recuperación de las nanopartículas. En cambio, aunque la producción intracelular ofrece un mayor control sobre sus caracterís-

Licenciamiento bajo el cual se publican los contenidos: CC BY-NC-ND 4.0

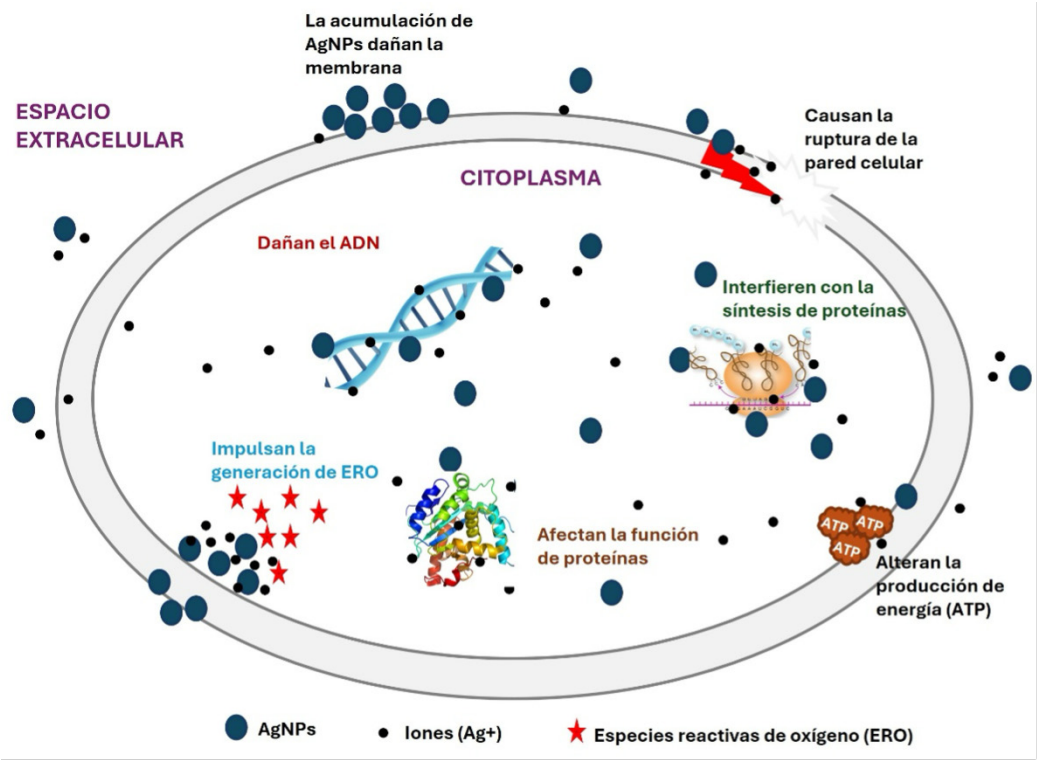


Figura 4. *Las AgNPs pueden actuar directamente contra la célula bacteriana al romper la pared celular, dañar el ADN o alterar la síntesis de proteínas, o indirectamente al inducir la formación de especies reactivas de oxígeno (ERO), las cuales afectan la producción de energía y también pueden dañar el ADN e interferir con la síntesis y función de proteínas.*

ticas, requiere pasos adicionales, como la ruptura de las células y la posterior recuperación de las nanopartículas, lo que hace que el proceso sea más largo y complejo.

¿Cómo actúan las nanopartículas de plata contra las bacterias?

Las AgNPs son eficaces contra una amplia variedad de bacterias patógenas, incluidas algunas que han desarrollado multirresistencia a los antibióticos [1]. Por esta razón, se han utilizado como agentes antibacterianos, principalmente en las industrias textil, alimentaria y médica. Su efectividad depende, en gran medida de su tamaño y forma; en particular, las nanopartículas de menor tamaño (inferiores a 10 nm) y de forma triangular suelen ser más potentes debido a que tienen una mayor superficie de contacto. No obstante, las formas esféricas son las más comunes.

El efecto antibacteriano de las AgNPs se atribuye a la liberación continua de iones de plata (Ag^+) por parte de las nanopartículas, los cuales afectan directa o indirectamente la viabilidad celular (Figura 4), mediante uno o varios de los mecanismos que se describen a continuación:

1. Los iones de plata dañan la pared celular bacteriana, provocando la pérdida del contenido intracelular y, en consecuencia, la muerte de la célula.

2. Las especies reactivas de oxígeno generadas por la acción de los iones inducen estrés oxidativo y alteran la cadena respiratoria, interrumpiendo la producción de energía afectando la viabilidad bacteriana.

3. Los iones de plata pueden unirse a proteínas, enzimas y al ADN, afectando funciones metabólicas esenciales y procesos celulares indispensables para la

Licenciamiento bajo el cual se publican los contenidos: CC BY-NC-ND 4.0

supervivencia de la bacteria [7].

A pesar de sus múltiples mecanismos de acción, existe la posibilidad de que ciertas cepas bacterianas desarrollen resistencia a las AgNPs a largo plazo. Dado que este fenómeno aún es objeto de investigación y no se han esclarecido totalmente sus causas, se ha propuesto la combinación de estas nanopartículas con otras sustancias, tales como extractos vegetales, polímeros o antibióticos convencionales. Este enfoque busca generar un efecto sinérgico que potencie su actividad antimicrobiana y reduzca la probabilidad de desarrollar resistencia a las AgNPs por parte de los microorganismos.

Conclusiones

Las AgNPs representan una alternativa prometedora frente a la multirresistencia bacteriana. Cuando se sintetizan mediante métodos biológicos, como el uso de lactobacilos, ofrecen ventajas competitivas, destacando una mayor biocompatibilidad y un control más preciso de sus propiedades fisicoquímicas.

Aunque los mecanismos moleculares mediante los cuales estos microorganismos producen las nanopartículas no se conocen por completo, la síntesis verde mediada por lactobacilos se perfila como una ruta biotecnológica viable y sostenible. No obstante, para garantizar aplicaciones seguras y efectivas en el futuro, resulta imperativo profundizar en el estudio de su toxicidad en humanos y en los mecanismos de resistencia que las bacterias podrían desarrollar ante este nanomaterial.

Agradecimientos

Los autores agradecen a la Dirección de Apoyo a la Investigación y Posgrado de la Universidad de Guanajuato, por financiamiento otorgado al proyecto 132/2022 de la convocatoria CIIC2022. Se declara que se utilizaron las herramientas Gemini para generación de imágenes y ChatGPT-4 para revisión de ortografía y estilo.

Referencias

[1] Siddiqi, K. S., et al. (2018). A review on biosynthesis of silver nanoparticles and their biocidal properties. *Journal of Nanobiotechnology*, 16(1), 14. https://doi.org/10.1186/s12951-018-0334-5

[2] Garmasheva, I., et al. (2016). Lactobacillus species mediated synthesis of silver nanoparticles and their antibacterial activity against opportunistic pathogens *in vitro. Bioimpacts*, 6(4), 219-223. https://doi.org/10.15171/bi.2016.29

[3] Zhang, X.-F., et al. (2016). Silver Nanoparticles: Synthesis, Characterization, Properties, Applications, and Therapeutic Approaches. *International Journal of Molecular Sciences*, 17(9), 1534. https://doi.org/10.3390/ijms17091534

[4] Yaqoob, A. A., et al. (2020). Recent Advances in Metal Decorated Nanomaterials and Their Various Biological Applications: A Review. *Frontiers in Chemistry*, 8, 341. https://doi.org/10.3389/fchem.2020.00341

[5] dos Santos, L.M.G., et al. (2025). Unravelling the effects of silver nanoparticles on textiles: a comprehensive toxicological and quantitative analysis. *Health Nanotechnology*, 1, 6. https://doi.org/10.1186/s44301-025-00006-4

[6] Ghosh, S., et al. (2022). Nanobiotechnological prospects of probiotic microflora: Synthesis, mechanism, and applications. *Science of the Total Environment*. 2022 Sep 10;838 (Pt 3):156212. doi: 10.1016/j.scitotenv.2022.156212

[7] Bruna, T., et al. (2021). Silver Nanoparticles and Their Antibacterial Applications. International *Journal of Molecular Sciences*, 22(13), 7202. https://doi.org/10.3390/ijms22137202

Licenciamiento bajo el cual se publican los contenidos: CC BY-NC-ND 4.0

Recibido: 20-mar-2026 Aceptado: 01-jun-2026 e-ISSN 2954-4890

Sección: *Hot Science*

Bacterias en camarón de mercados del noroeste de México

Bacteria in shrimp from markets in northwestern Mexico

Francisco Cadena-Cadena
Odilia Azucena Higuera Barraza
*Joe Luis Arias-Moscoso**

Tecnológico Nacional de México, Instituto Tecnológico del Valle del Yaqui Departamento de Ingenierías, Av. Tecnológico, Block 611, Valle del Yaqui, Bácum, C.P. 85276, Sonora, México.

**Autor para la correspondencia: jarias.moscoso@itvy.edu.mx*

RESUMEN

El camarón es uno de los mariscos más populares en México y, por su naturaleza perecedera, es muy susceptible a la contaminación bacteriana. Este estudio evaluó la presencia de bacterias indicadoras de higiene (coliformes y enterobacterias) en camarón comercializado en supermercados, pescaderías y mercados tradicionales (Tianguis) de Sonora durante 2025. Los resultados revelaron mayor contaminación en tianguis, seguidos de pescaderías y supermercados, lo que indica que las condiciones de manejo y refrigeración son factores clave en la calidad microbiológica del camarón que llega al consumidor.

Palabras clave: Camarón, coliformes y enterobacterias, calidad microbiológica.

SUMMARY

Shrimp is one of the most popular seafoods in Mexico and, due to its perishable nature, is highly susceptible to bacterial contamination. This study evaluated the presence of hygiene indicator bacteria (coliforms and enterobacteria) in shrimp sold in supermarkets, fish markets, and traditional markets (Tianguis) in Sonora during 2025. The results revealed higher contamination levels in open-air markets, followed by fish markets and supermarkets, indicating that handling and refrigeration conditions are key factors in the microbiological quality of shrimp reaching consumers.

Keywords: Shrimp, coliforms and enterobacteria, microbiological quality.

Licenciamiento bajo el cual se publican los contenidos: CC BY-NC-ND 4.0

Introducción

El camarón es uno de los productos de pesca más consumidos en México. Lo encontramos en ceviches, cocteles y numerosos platillos tradicionales. Sin embargo, pocas veces nos preguntamos qué ocurre con este alimento desde que sale de zonas de pesca o de granjas acuícolas hasta que llega a nuestra mesa. Durante su transporte, almacenamiento y venta, el camarón puede entrar en contacto con bacterias que afectan su calidad e incluso representar un riesgo para la salud si no se maneja adecuadamente.

Como sucede con otros productos frescos de origen marino o acuáticos, el camarón se caracteriza por ser altamente perecedero. Su composición, rica en agua y nutrientes, favorece el crecimiento de microorganismos si no se mantiene bajo temperaturas de refrigeración adecuadas (alrededor de 4 °C) y prácticas adecuadas de higiene [1]. Cuando el producto permanece fuera de refrigeración durante largos periodos o es manipulado sin las medidas sanitarias necesarias, puede deteriorarse rápidamente y facilitar el crecimiento de bacterias capaces de provocar enfermedades gastrointestinales [2].

A lo largo de la cadena de producción y comercialización, el camarón pasa por diferentes etapas que incluyen su captura o cultivo, transporte, almacenamiento y venta al consumidor final. En cada una de estas fases existe la posibilidad de que el producto entre en contacto con microorganismos presentes en el ambiente, en superficies de trabajo o incluso en las manos de los que lo manipulan [3]

En muchas ciudades del noroeste de México, el camarón se comercializa en distintos tipos de establecimientos. Algunos consumidores prefieren adquirirlo en supermercados, donde el producto suele mantenerse en vitrinas refrigeradas. Otros lo compran en pescaderías o en (tianguis), donde el camarón se vende fresco y, en ocasiones, directamente sobre hielo [1].

Estas diferencias en la forma de vender el camarón llevan a una pregunta importante: ¿el lugar donde compramos el camarón influye en la presencia de bacterias relacionadas con la higiene y el manejo del producto? Para responder a esta pregunta se realizó un estudio enfocado en evaluar la presencia de bacterias en camarón comercializado en distintos puntos de venta del noroeste de México.

¿Cómo se realizó el estudio?

Durante el año 2025 se recolecto camarón destinado al consumo humano. Los camarones se obtuvieron en distintos establecimientos de venta al público, incluyendo supermercados, pescaderías y tianguis.

Cada muestra recolectada fue trasladada al laboratorio de alimentos del Instituto Tecnológico del Valle del Yaqui bajo condiciones de refrigeración para evitar alteraciones durante el transporte. Después, las muestras fueron analizadas en laboratorio mediante pruebas microbiológicas. Estas pruebas permiten detectar bacterias presentes en los alimentos y ayudan a identificar si el camarón estuvo expuesto a malas condiciones de higiene o almacenamiento.

Entre las bacterias evaluadas se encontraron los coliformes. Este grupo se utiliza como señal de higiene deficiente, ya que puede aparecer cuando los alimentos entran en contacto con superficies sucias, agua contaminada o utensilios mal lavados. Su presencia indica que el camarón pudo haber sido manipulado bajo condiciones poco higiénicas. Por otro lado, las enterobacterias forman un grupo más amplio de microorganismos cuya detección suele relacionarse con fallas de higiene durante etapas como la captura o cultivo, el transporte, el almacenamiento, la conservación en hielo y la venta del producto.

Licenciamiento bajo el cual se publican los contenidos: CC BY-NC-ND 4.0

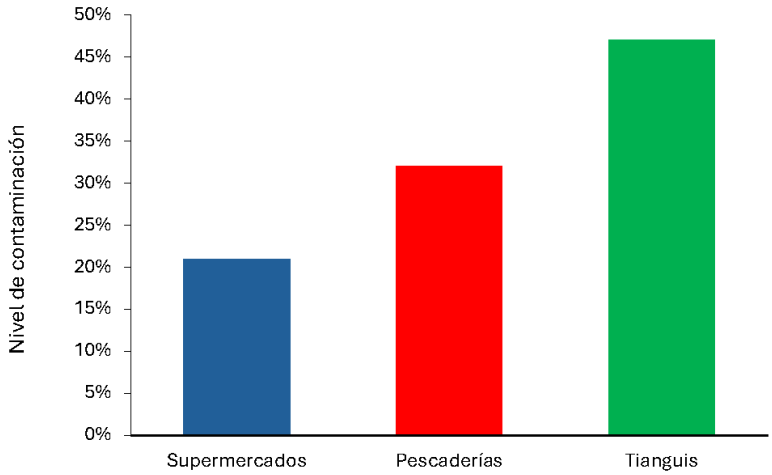


Figura 1. *Porcentaje de muestras con crecimiento bacteriano detectado en supermercados, pescaderías y tianguis. El 0 % corresponde a muestras sin crecimiento bacteriano observable utilizadas como refxerencia de control negativo.*

El objetivo principal fue conocer qué tan frecuente era la presencia de estos microorganismos en el camarón disponible en los mercados de venta al publico y analizar si existían diferencias relacionadas con el tipo de establecimiento donde se adquirió el producto.

¿Influye el lugar donde compramos el camarón?

Los resultados mostraron que el lugar donde se adquiere el camarón puede influir en su calidad microbiológica. Las muestras obtenidas en tianguis presentaron un mayor número de bacterias indicadoras de higiene. Estas bacterias no siempre causan enfermedad directamente, pero se utilizan como señales de que el alimento pudo haber estado expuesto a contaminación o manipulación inadecuada. En segundo lugar, se ubicaron las pescaderías, mientras que los supermercados mostraron los valores más bajos (Figura 1). Los niveles de contaminación se calcularon observando cuántas muestras presentaron crecimiento de bacterias. Como punto de comparación para el 0 %, se usaron cultivos sin ningún crecimiento bacteriano (llamados control negativo), es decir, completamente limpios.

Estas diferencias pueden explicarse por las condiciones de almacenamiento y manipulación del producto. En muchos mercados el camarón permanece expuesto al ambiente durante varias horas, lo que facilita el contacto con microorganismos presentes en el aire o en superficies cercanas (Figura 2). Además, la refrigeración puede ser menos constante en comparación con otros establecimientos, lo que favorece el crecimiento de bacterias cuando el producto permanece a temperaturas superiores a las recomendadas.

En contraste, los supermercados suelen contar con vitrinas refrigeradas, controles de temperatura más estables y procedimientos



Figura 2. *Imágenes ilustrativas de formatos de comercialización de productos pesqueros. A y B: Venta de camarón en tianguis. C y D: Exhibición y venta de camarón y otros productos marinos en pescaderías establecidas.*

Licenciamiento bajo el cual se publican los contenidos: CC BY-NC-ND 4.0

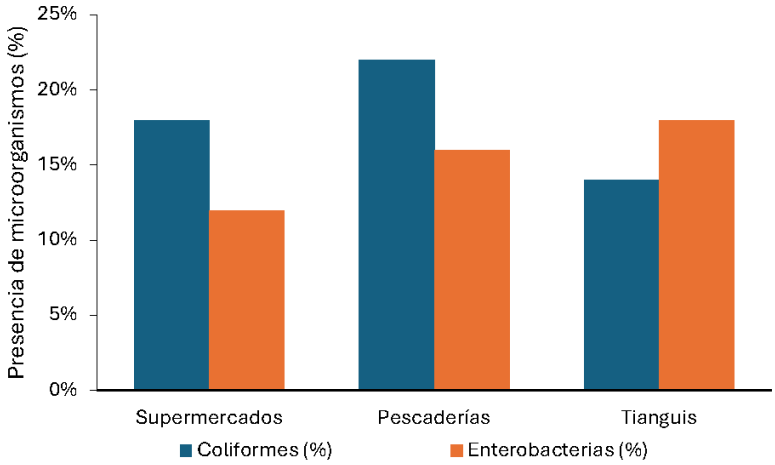


Figura 3. *Porcentaje de presencia de coliformes y enterobacterias en muestras obtenidas de supermercados, pescaderías y tianguis.*

de manejo más estandarizados. Estas condiciones contribuyen a reducir la multiplicación de bacterias durante la exhibición del producto [4]. También es más común que el personal reciba capacitación básica en prácticas de higiene, lo que ayuda a disminuir el riesgo de contaminación durante la manipulación del alimento.

Cuando el camarón no se mantiene a temperaturas adecuadas, incluso pequeñas cantidades de bacterias pueden multiplicarse rápidamente. Sin embargo, es importante señalar que la presencia de bacterias en todos los tipos de establecimientos indica que el riesgo potencial no desaparece completamente en ningún punto de venta [3, 4]. Esto significa que la seguridad del camarón para el consumo depende de varios factores, como la refrigeración, la limpieza y la forma en que el producto es manipulado desde su captura hasta su venta.

Presencia de bacterias indicadoras de higiene

En las muestras analizadas se detectó la presencia de coliformes y enterobacterias en los distintos puntos de venta evaluados (Figura 3). Los coliformes fueron el grupo bacteriano más frecuente, lo cual coincide con diversos estudios sobre la calidad microbiológica de productos pesqueros.

La presencia de estos microorganismos se asocia con superficies contaminadas y prácticas inadecuadas de manipulación de alimentos. También puede estar asociada con el uso de agua no potable por ejemplo en la fabricación del hielo utilizado para conservar el camarón, también puede estar asociada con deficiencias en las condiciones de limpieza durante el procesamiento o la venta del producto.

Las enterobacterias también estuvieron presentes en varias muestras analizadas. Este grupo incluye diferentes bacterias que pueden aparecer en alimentos cuando existen fallas en la limpieza, en la manipulación o en las condiciones de almacenamiento. La detección de estas bacterias sugiere que el producto pudo haber estado expuesto a condiciones que favorecen la contaminación microbiana [5, 6].

Aunque la presencia de estos microorganismos no significa necesariamente que el alimento cause enfermedad, sí indica que es importante mejorar las condiciones de higiene durante su manejo y comercialización, especialmente en etapas como el transporte, la exhibición y la venta al consumidor final.

Recomendaciones para un consumo seguro de camarones

Los resultados del estudio muestran que la calidad microbiológica del camarón puede variar dependiendo de las condiciones de manejo y del lugar donde se comercializa. Por esta razón, tanto los vendedores como los consumidores desempeñan un papel importante en la prevención de enfermedades transmitidas por alimentos. Aunque el producto provenga de una zona de producción reconocida, factores como el tiempo de exposición al ambiente,

Licenciamiento bajo el cual se publican los contenidos: CC BY-NC-ND 4.0

la temperatura de almacenamiento y la forma en que se manipula pueden influir en su calidad final [5, 6].

Para reducir riesgos se recomienda comprar camarón que se encuentre bien refrigerado o conservado en hielo, evitar productos con olores desagradables o apariencia deteriorada, mantener el camarón refrigerado hasta su preparación y cocinarlo completamente antes de consumirlo. También es importante observar las condiciones del establecimiento donde se adquiere el producto. La presencia de hielo limpio, vitrinas refrigeradas y superficies de trabajo ordenadas puede ser un buen indicio de que el alimento se maneja bajo condiciones adecuadas [3].

Es recomendable transportar el producto en el menor tiempo posible hasta el hogar y mantenerlo refrigerado si no se va a cocinar inmediatamente. En climas cálidos, como los que predominan en muchas regiones del noroeste de México, los alimentos perecederos pueden deteriorarse con mayor rapidez cuando permanecen fuera de refrigeración durante periodos prolongados. Por ello, es conveniente colocar el camarón en refrigeración tan pronto como sea posible después de su compra.

Además, en los puntos de venta es fundamental mantener buenas prácticas de higiene, como la limpieza de superficies, el lavado frecuente de manos y el uso adecuado de utensilios para evitar la contaminación cruzada entre alimentos. La capacitación de los manipuladores de camarón y el uso de agua limpia para el lavado de productos y utensilios también contribuyen a reducir la presencia de microorganismos [4, 6]. La combinación de estas medidas, tanto en la venta como en el hogar, ayuda a disminuir los riesgos asociados al consumo de productos del mar y favorece que el camarón llegue a la mesa del consumidor en mejores condiciones de calidad e inocuidad.

Asimismo, promover una mayor cultura de inocuidad alimentaria entre vendedores y consumidores puede contribuir a mejorar la calidad de los alimentos disponibles en el mercado. Acciones sencillas, como mantener el producto a temperaturas adecuadas y evitar su manipulación innecesaria, pueden marcar una diferencia importante en la seguridad del camarón que finalmente llega al plato del consumidor.

Conclusiones

Este estudio muestra que el camarón comercializado en el noroeste de México puede presentar bacterias indicadoras de higiene como coliformes y enterobacterias. La detección fue mayor en tianguis, seguida de pescaderías y supermercados.

Estos resultados sugieren que las condiciones de manipulación, almacenamiento y refrigeración influyen en la calidad microbiológica del producto. Fortalecer las prácticas de higiene y mantener la cadena de frío durante la comercialización del camarón son medidas clave para garantizar alimentos más seguros para el consumidor y mejorar la calidad de los productos del mar disponibles en el mercado.

Estos hallazgos muestran la importancia de que consumidores y vendedores mantengan prácticas adecuadas de higiene y refrigeración durante la compra, almacenamiento y manejo del camarón. Acciones simples, como conservar el producto en hielo o refrigeración continua y evitar la exposición prolongada al ambiente, pueden contribuir significativamente a disminuir los riesgos de contaminación bacteriana

Referencias

[1] Barbosa, L. J., Ribeiro, L. F., Lavezzo, L. F., Barbosa, M. M. C., Rossi, G. A. M. and Do Amaral, L. A. Detection of pathogenic Escherichia coli and microbiological quality of chilled shrimp sold in street markets. *Letters in Applied Microbiology*. (2016), 62(5), 372-378.

Licenciamiento bajo el cual se publican los contenidos: CC BY-NC-ND 4.0

[2] Dumen, E., Ekici, G., Ergin, S. and Bayrakal, G. M. Presence of foodborne pathogens in seafood and risk ranking for pathogens. *Foodborne Pathogens and Disease*. (2020), 17(9), 541-546.

[3] Farag, M. A., Mansour, S. T., Nouh, R. A. and Khattab, A. R. Crustaceans (shrimp, crab, and lobster): A comprehensive review of their potential health hazards and detection methods to assure their biosafety. *Journal of Food Safety*. (2023), 43(1), e13026.

[4] Hannan, M. A., Habib, K. A., Shahabuddin, A. M., Haque, M. A. and Munir, M. B. (2022). Processing of shrimp. In Post-Harvest Processing, Packaging and Inspection of Frozen Shrimp: A Practical Guide (pp. 59-77): Springer.

[5] Hirshfeld, B., Lavelle, K., Lee, K. Y., Atwill, E. R., Kiang, D., Bolkenov, B., Gaa, M., Li, Z., Yu, A. and Li, X. Prevalence and antimicrobial resistance profiles of Vibrio spp. and Enterococcus spp. in retail shrimp in Northern California. *Frontiers in microbiology*. (2023), 14, 1192769.

[6] Vega-Sánchez, V., De Anda, F. R. G., Velázquez, A. P. Z., González, J. M. T. and Reyes-Rodríguez, N. E. Calidad microbiológica en muestras de camarón obtenidas en puntos de venta en Tulancingo, Hidalgo. *Boletín de Ciencias Agropecuarias del ICAP*. (2023), 9(17), 24-28.

Licenciamiento bajo el cual se publican los contenidos: CC BY-NC-ND 4.0

Recibido: 07-ene-2026 Aceptado: 12-abr-2026 e-ISSN 2954-4890

Sección: *Hot Science*

El poder cicatrizante de Lycoperdon perlatum: Uso de un hongo medicinal en el proceso de cicatrización de heridas

The healing power of Lycoperdon perlatum: Use of a medicinal mushroom in the wound healing process

Oscar Wilder Montiel Lucio[1]
María Guadalupe González Pedroza[2]*
Cristina Burrola Aguilar[2]

[1]*Laboratorio de Bionanotecnología, Facultad de Ciencias de la Universidad Autónoma del Estado de México. Toluca, Estado de México, México.*
[2]*Universidad Autónoma del Estado de México, Facultad de Ciencias, Centro de Investigación en Recursos Bióticos, Carretera Toluca-Atlacomulco Km 14.5, 50200 Toluca, Estado de México, México.*

**Autor para la correspondencia: mggonzalezp@uaemex.mx*

RESUMEN

Este artículo explora el potencial medicinal de *Lycoperdon perlatum*, un hongo basidiomiceto que pertenece a la familia Agaricaceae, en los procesos de cicatrización, abordándolo desde el conocimiento tradicional hasta los avances más recientes en el estudio de sus compuestos bioactivos. Se analizan sus principales compuestos bioactivos y sus efectos antiinflamatorios, antioxidantes y antimicrobianos. Asimismo, se destaca su uso histórico en la medicina tradicional y su potencial en futuras aplicaciones terapéuticas orientados a acelerar la cicatrización de heridas.

Palabras clave: Medicina tradicional, regeneración tisular, compuestos bioactivos.

SUMMARY

This article explores the medicinal potential of *Lycoperdon perlatum*, a basidiomycete fungus that belongs to the family Agaricaceae, in wound healing processes, addressing it from traditional knowledge to the most recent advances in the study of its bioactive compounds. Its main bioactive compounds and their anti-inflammatory, antioxidant, and antimicrobial effects are analyzed. Likewise, its historical use in traditional medicine and its potential in future therapeutic applications aimed at accelerating wound healing are highlighted.

Keywords: Traditional medicine, tissue regeneration, bioactive compounds.

Licenciamiento bajo el cual se publican los contenidos: CC BY-NC-ND 4.0

Introducción: La cicatrización y el Potencial de *Lycoperdon perlatum*

Lycoperdon perlatum (Figura 1) ha destacado como una alternativa terapéutica prometedora, conocido comúnmente como “pedo de lobo” o “pedo de bruja”, este hongo ha sido reconocido por sus propiedades cicatrizantes, las cuales han sido atribuidas a diversos compuestos bioactivos presentes en el hongo. Estudios han revelado que los polisacáridos y otros compuestos presentes en *L. perlatum* pueden provocar efectos antiinflamatorios, antioxidantes y antimicrobianos en la cicatrización [1]. Estos compuestos ayudan a reducir la inflamación, estimular la síntesis de colágeno y prevenir infecciones, permitiendo así una regeneración más rápida.



Figura 1. *Lycoperdon perlatum en su hábitat natural durante la liberación de esporas.*

También, *L. perlatum* ha sido parte de la medicina tradicional mexicana. Las comunidades indígenas, a lo largo de generaciones han usado a este hongo en diversas prácticas como en algunas regiones que se utiliza deshidratado en forma de polvo o en infusión para el tratamiento de heridas, aprovechando sus propiedades antimicrobianas y su capacidad para la cicatrización. La transmisión del conocimiento ha permitido conservar estas prácticas, resaltando la importancia de este recurso natural en la cultura y en el bienestar de las comunidades mexicanas [1].

Este artículo tiene como objetivo evidenciar las propiedades cicatrizantes de *Lycoperdon perlatum* y su uso tradicional en México ya que es un hongo de alto valor en el patrimonio cultural de México. La sinergia de los conocimientos ancestrales y avances científicos ha despertado el interés en el estudio de sus compuestos bioactivos. Sin embargo, el desarrollo de biomateriales o formulaciones terapéuticas a partir de *L. perlatum* aún se encuentra en etapas de investigación por lo que representa una posible línea innovación biotecnológica en la industria farmacéutica.

Raíces ancestrales: Uso tradicional de *Lycoperdon perlatum* en México

En México, el uso de recursos naturales en el área de la salud ha sido una práctica fundamental a lo largo de la historia. En ese sentido, *L. perlatum* demostró ser importante para la medicina tradicional, principalmente por su habilidad de acelerar el proceso de cicatrización. Desde hace mucho tiempo, diversas comunidades indígenas han recurrido a los hongos medicinales como remedios caseros y prácticas curativas, transmitiendo este conocimiento de generación en generación [2].

El uso ancestral de *L. perlatum* se destaca por la observación y el aprovechamiento de la biodiversidad local. En algunas comunidades, este hongo ha sido empleado para tratar heridas u otras lesiones superficiales. Las

Licenciamiento bajo el cual se publican los contenidos: CC BY-NC-ND 4.0



Figura 2. *Recolección tradicional de hongos en comunidades.*

prácticas tradicionales explican que al secarlo, macerarlo y mezclarlo con grasas animales o vegetales se forma una pomada que pueden aplicar directamente sobre la herida, ayudando a detener hemorragias y prevenir infecciones gracias a sus propiedades. Aunque la evidencia científica sobre su mecanismo de acción es limitada, la efectividad percibida por el uso empírico ha permitido que esta práctica se mantenga vigente [3].

Esta transmisión del conocimiento sobre *L. perlatum* es un ejemplo del cómo la medicina tradicional se basa en la experiencia y observación de la naturaleza. En diversas comunidades indígenas los conocimientos sobre la identificación, recolección y preparación de este hongo se enseña conversando. Por ejemplo, en algunas regiones se relata que las madres y abuelas enseñan a los niños sobre las características de los hongos, fomentando una relación entre las comunidades y la naturaleza fortaleciendo así la cultura al divulgar los conocimientos ancestrales [4].

En comunidades Mixtecas y otros grupos indígenas, la recolección de estos hongos forma parte de las actividades recreativas y educativas donde los habitantes distinguen desde muy temprana edad las diferencias entre especies comestibles y su potencial medicinal siendo esto una forma de preservar su identidad cultural y el conocimiento tradicional (Figura 2).

Lycoperdon perlatum se encuentra ligado a los conocimientos de los pueblos originarios de México. El uso de este hongo no es solo una alternativa natural para la cicatrización de heridas, sino también una forma de conexión con la tierra. En muchas comunidades, la recolección se realiza con respeto hacia la naturaleza y sus usos reflejan el equilibrio entre el hombre y su hábitat por lo que es importante conservar y documentar la herencia cultural del uso de los recursos naturales [5]. El conocimiento tradicional sobre el uso de Lycoperdon perlatum ha motivado el interés científico por comprender los compuestos responsables de sus propiedades terapéuticas y los posibles mecanismos biológicos involucrados en el proceso de cicatrización.

Licenciamiento bajo el cual se publican los contenidos: CC BY-NC-ND 4.0

Propiedades curativas y mecanismos bioactivos en *Lycoperdon perlatum*

Además de ser un hongo reconocido por su relevancia en la medicina tradicional también ha sido reconocido por la variedad de compuestos bioactivos que posee ya que estos han sido asociados a las propiedades terapéuticas en el proceso de la cicatrización. La evidencia indica que este hongo contiene una serie de compuestos entre los cuales destacan los polisacáridos además de otros compuestos que en conjunto confieren estas propiedades antiinflamatorias, antioxidantes y antimicrobianas lo que lo convierte en un hongo con potencial para acelerar la regeneración tisular y mejorar la cicatrización de heridas.

Entre los compuestos identificados en *Lycoperdon perlatum* se encuentran los polisacáridos que tienen la capacidad de regular la respuesta inmunitaria, ayudando a disminuir la inflamación en los tejidos afectados. Además, se ha observado que, en otros estudios relacionados con hongos medicinales, se demostró que la presencia de β-glucanos, un tipo de polisacárido, potencia la respuesta inmunológica y favorece la regeneración tisular.

Además de los polisacáridos, diversos estudios han reportado la presencia de otros compuestos bioactivos incluyendo los compuestos fenólicos, proteínas y metabolitos secundarios asociados a actividades antioxidantes y antimicrobianas. Estos compuestos pueden contribuir a la la inhibición del crecimiento microbiano y a la regulación del proceso inflamatorio, factores que influyen en el proceso de cicatrización [6].

Otros de los compuestos presentes en este hongo son los flavonoides, saponinas, proteínas, carbohidratos y en algunos extractos se han mencionado también la presencia de glicósidos, alcaloides y taninos. Estos compuestos en conjunto aportan propiedades antioxidantes que permiten la neutralización de radicales libres, es decir, previenen el daño celular causado por el estrés oxidativo, lo que interfiere en la cicatrización de heridas [7].

Por otro lado, las propiedades antimicrobianas de *L. perlatum* son atribuidas a la combinación de estos compuestos. En otras investigaciones, los extractos obtenidos a través de diferentes métodos de extracción, por ejemplo, usando solventes como etanol o metanol, han demostrado ser efectivos contra diversas cepas bacterianas y fúngicas. Esta capacidad de inhibir el crecimiento bacteriano es importante ya que se reduce el riesgo de contraer infecciones en el proceso de cicatrización.

Los compuestos presentes en *L. perlatum* actúan de diferentes formas, en primer lugar, sus propiedades antiinflamatorias permiten una regulación del proceso inflamatorio de la herida. Al reducir la liberación excesiva de citoquinas proinflamatorias, estos compuestos ayudan a limitar el daño del tejido y facilitan el paso a posteriores fases de la cicatrización ya que una respuesta inflamatoria excesiva puede ralentizar la regeneración de la piel y otros tejidos.

Otro mecanismo es la estimulación de síntesis de colágeno. Los polisacáridos y otros compuestos bioactivos favorecen la producción de colágeno por parte de los fibroblastos y así, reconstruir la matriz extracelular y proporcionar soporte para el tejido en reparación. Un aumento en la síntesis de colágeno no solo acelera el cierre de la herida, sino que también contribuye a una cicatrización de mejor calidad, reduciendo las cicatrices antiestéticas.

La reducción del estrés oxidativo de las células es producida por las propiedades antioxidantes de este hongo, de esta forma se facilita la proliferación celular y la migración de células como los queratinocitos y los fibroblastos. Finalmente, las propiedades antimicrobianas de *Lycoperdon perlatum* contribuyen a mantener un ambiente estéril en la herida. Al

Licenciamiento bajo el cual se publican los contenidos: CC BY-NC-ND 4.0

impedir el crecimiento de bacterias y hongos patógenos y así se reduce el riesgo de infecciones que puedan complicar la cicatrización [7]. El estudio de estos compuestos bioactivos ha despertado interés en su posible aprovechamiento dentro del campo de la biotecnología, particularmente en el desarrollo de nuevas estrategias para favorecer la regeneración tisular.



Figura 3. *Representación conceptual de L. perlatum en un hidrogel para la regeneración de tejidos.*

De la tradición a la innovación: aplicaciones biotecnológicas

El conocimiento tradicional de las propiedades de *L. perlatum* ha generado interés en el estudio de sus compuestos bioactivos y su posible aprovechamiento dentro del campo de la biotecnología. Particularmente, la investigación de los hongos medicinales ha permitido identificar metabolitos con propiedades antiinflamatorias, antioxidantes y antimicrobianas, las cuales podrían tener aplicaciones en el desarrollo de nuevas estrategias terapéuticas [8].

Diversos estudios sobre compuestos bioactivos de hongos han explorado su aplicación en biomateriales enfocados en la regeneración tisular como apósitos, ungüentos e hidrogeles, que permitan mantener un ambiente adecuado para la cicatrización al proteger la herida de agentes microbianos externos y estimular la proliferación de fibroblastos y la síntesis de colágeno (Figura 3) [9]. Aunque el uso específico de *Lycoperdon perlatum* aún se encuentra en etapas iniciales de investigación, el estudio de sus metabolitos podría contribuir al desarrollo de biomateriales que favorezcan la cicatrización.

En el caso de heridas crónicas o quemaduras, el uso de biomateriales funcionalizados con los compuestos orgánicos de *L. perlatum* podría contribuir a la liberación controlada de estos, ayudando a controlar la inflamación prolongada y permitiendo una regeneración tisular más eficiente, debido a una mayor biocompatibilidad asociada al origen natural del hongo.

En conclusión, la utilización y extracción biotecnológica de compuestos bioactivos de *Lycoperdon perlatum* no solo demuestra que los conocimientos tradicionales de la medicina natural mexicana pueden extrapolarse y validarse dentro de la medicina moderna, sino que también abre nuevas posibilidades para el desarrollo de alternativas terapéuticas innovadoras, seguras y sustentables [5].

Referencias

[1] Akpi, U. K., Odoh, C. K., Ideh, E. E., & Adobu, U. S. (2017). Antimicrobial activity of Lycoperdon perlatum whole fruit body on common pathogenic bacteria and fungi. *African Journal of Clinical and Experimental Microbiology*, 18(2), 79. https://doi.org/10.4314/ajcem.v18i2.4

[2] Zamora-Martínez, M. C., González Hernández, A., Islas Gutiérrez, F., Nayeli, E., Barrera, C., & López Valdez, L. I. (2018). Geographic and ecological distribution of 13 species of wild edible mushrooms in Oaxaca. *Revista*

Licenciamiento bajo el cual se publican los contenidos: CC BY-NC-ND 4.0

Mexicana De Ciencias Forestales 5 (21). México, ME:76-93. https://doi.org/10.29298/RMCF.V5I21.359

[3] Sánchez-García, D., Burrola-Aguilar, C., Zepeda-Gómez, C., & Estrada-Zúñiga, M. E. (2020). Edible, medicinal wild mushrooms: A study in Estado de México. *Agro Productividad*, 13(10). https://doi.org/10.32854/agrop.v13i10.1746

[4] Bautista-González, J. A., Montoya, A., Bye, R., Esqueda, M., & Herrera-Campos, M. de los A. (2022). Traditional knowledge of medicinal mushrooms and lichens of Yuman peoples in Northern Mexico. *Journal of Ethnobiology and Ethnomedicine*, 18(1). https://doi.org/10.1186/s13002-022-00550-8

[5] Novakovic, A., Karaman, M., Matavulj, M., Pejin, B., Belovic, M., Radusin, T., & Ilic, N. (2015). An insight into in vitro bioactivity of wild-growing puffball species Lycoperdon perlatum (Pers) 1796. *Food and Feed Research*, 42(1), 51–58. https://doi.org/10.5937/ffr1501051n

[6] Díaz-Talamantes, C., Burrola-Aguilar, C., Estrada-Zúñiga, M. E., & Zepeda-Gómez, C. (2021). Obtención de β-glucanos de esporomas silvestres y micelio in vitro de Lycoperdon perlatum. *Scientia Fungorum*, 52, e1409. https://doi.org/10.33885/sf.2021.52.1409

[7] Santiago, F. H., Moreno, J. P., Cázares, B. X., Suárez, J. J. A., Trejo, E. O., de Oca, G. M. M., & Aguilar, I. D. (2016). Traditional knowledge and use of wild mushrooms by Mixtecs or Ñuu savi, the people of the rain, from Southeastern Mexico. *Journal of Ethnobiology and Ethnomedicine*, 12(1). https://doi.org/10.1186/s13002-016-0108-9

[8] Mata, G., Gaitán-Hernández., R., & Salmones, D. (2020). *El cultivo del shiitake: Tecnología e innovación en la producción de un alimento y medicina ancestral.* Instituto de Ecología, A.C.

[9] Owaid, M. N., Rabeea, M. A., Abdul Aziz, A., Jameel, M. S., & Dheyab, M. A. (2019). Mushroom-assisted synthesis of triangle gold nanoparticles using the aqueous extract of fresh Lentinula edodes (shiitake), Omphalotaceae. *Environmental Nanotechnology, Monitoring and Management*, 12. https://doi.org/10.1016/j.enmm.2019.100270

Licenciamiento bajo el cual se publican los contenidos: CC BY-NC-ND 4.0

Recibido: 11-mar-2026 Aceptado: 08-may-2026 e-ISSN 2954-4890

Sección: *Hot Science*

Socios invisibles: microorganismos que ayudan al agave a sobrevivir en el desierto

Invisible partners: microorganisms that help agave survive in the desert

Mónica A. Robles-Arias[1]
Ulises Carrasco-Navarro[2]
Alma E. Cruz-Guerrero[2]*

[1]*SECIHTI-Universidad Autónoma Metropolitana, Iztapalapa, Ciudad de México, México.*
[2]*Universidad Autónoma Metropolitana, Iztapalapa, Ciudad de México, México.*

**Autor para la correspondencia: aec@xanum.uam.mx*

RESUMEN

El agave es una planta emblemática de México que sobrevive en ambientes áridos gracias a adaptaciones fisiológicas orientadas al ahorro de agua, modificaciones en su metabolismo fotosintético, y a la presencia de comunidades microbianas endófitas. Estos microorganismos ayudan a la planta a resistir sequías, protegerse de patógenos, obtener nutrientes esenciales y producen compuestos que favorecen su crecimiento y defensa. Las ciencias óhmicas han permitido descubrir este ecosistema y su importancia para la salud de la planta. Conocer estas interacciones abre oportunidades para desarrollar estrategias de agricultura sostenible mejorar la resiliencia de cultivos, y reducir el uso de fertilizantes y pesticidas.

Palabras clave: Agave, bacterias, simbiosis.

SUMMARY

The agave is an emblematic plant of Mexico that survives in arid environments thanks to physiological adaptations aimed at saving water, modifications in its photosynthetic metabolism, as well as the presence of endophytic microbial communities. These microorganisms help the plant tolerate drought, protect it against pathogens, and obtain essential nutrients. They also produce compounds that promote plant growth and defense. Omics sciences have made it possible to uncover this ecosystem and understand its importance for plant health. Studying these interactions opens new opportunities to develop sustainable agriculture strategies, improve crop resilience, and reduce the use of fertilizers and pesticides.

Keywords: Agave, bacteria, symbiosis.

Licenciamiento bajo el cual se publican los contenidos: CC BY-NC-ND 4.0

Introducción

El agave es una de las plantas más emblemáticas de México. De las 210 especies registradas, cerca del 75 % se distribuyen en nuestro país y alrededor del 56% se consideran endémicas, lo que posiciona al Altiplano mexicano como uno de sus principales centros de diversidad. Tradicionalmente, su imagen se asocia a la producción de bebidas tradicionales como el pulque, el mezcal y el tequila. No obstante, su importancia va mucho más allá de este ámbito. Tan sólo en la región de Yucatán se han documentado cerca de 40 formas diferentes de aprovechamiento, que incluyen su uso ornamental, la obtención de fibras para la elaboración de cepillos, escobas y canastas, así como aplicaciones en la gastronomía- como el jarabe de agave y el consumo de sus flores, ya sea capeadas o preparadas a la mexicana-. Además, se le atribuyen propiedades medicinales, entre ellas su uso como agente antiséptico e incluso como tónico en casos de alopecia [1].

Al pensar en el agave evocamos en nuestra mente paisajes áridos donde pocas especies vegetales logran sobrevivir. Pero surge una pregunta fascinante: ¿cómo consigue el agave crecer y prosperar en ambientes con escasez de agua, suelos pobres y temperaturas extremas?

La respuesta no depende únicamente de la planta. En su interior existe un sorprendente ecosistema invisible formado por microorganismos que colaboran con ella. En este artículo exploraremos los mecanismos que permiten al agave resistir condiciones adversas y conocer el papel crucial de los microorganismos que lo habitan.

El agave y su estrategia para ahorrar agua

El agave es una planta xerófila, es decir, está adaptada a prosperar en ambientes con disponibilidad limitada de agua, como regiones con días calurosos, noches frías y suelos áridos (Figura 1). Esta notable capacidad de adaptación se debe, en gran parte, a su metabolismo CAM (Metabolismo Ácido de las Crasuláceas), una estrategia fisiológica que optimiza el uso del agua. A diferencia de la mayoría de las plantas, el agave abre sus estomas-pequeños poros microscópicos en la superficie de las hojas que regulan el intercambio gaseoso y la perdida de agua- durante las noches, cuando la temperatura es más baja y la humedad mayor. Durante este periodo, captan dióxido de carbono (CO_2), que se transforma en ácidos orgánicos para almacenarlo temporalmente en sus células. Durante el día, los estomas permanecen cerrados para minimizar la pérdida de agua, es entonces cuando los ácidos orgánicos son metabolizados y, como resultado se libera CO_2 que es utilizado en la fotosíntesis para síntesis de azúcares [2].

Además de ese metabolismo especializado, el agave presenta adaptaciones morfológicas esenciales, como sus hojas suculentas dispuestas en forma de roseta que almacenan agua, cutículas epidérmicas gruesas con abundante deposición de ceras que reduce la pérdida hídrica y un sistema radical superficial altamente eficiente capaz de captar rápidamente la humedad disponible tras precipitaciones. Estas características le permiten cap-



Figura 1. *El agave en su ambiente natural.*

Licenciamiento bajo el cual se publican los contenidos: CC BY-NC-ND 4.0

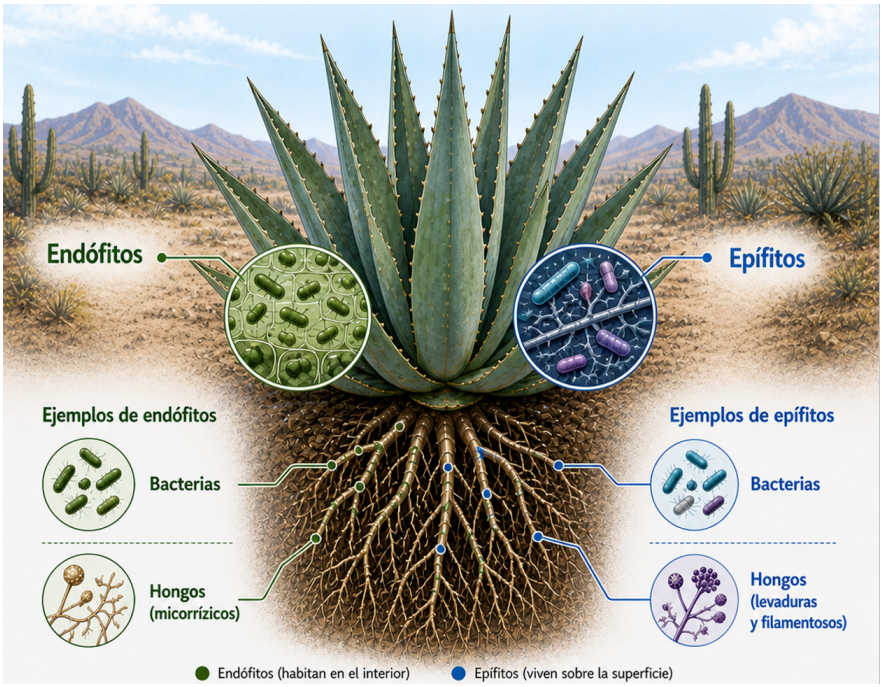


Figura 2. *Microorganismos asociados al agave y su papel en la planta. Se muestran bacterias y hongos que habitan tanto en el interior (endófitos) como la superficie (epífitos), contribuyendo a la nutrición, defensa y adaptación del agave a condiciones áridas.*

tar mejor la radiación del sol para llevar a cabo el proceso de fotosíntesis y ayudan a dirigir el agua hacia las raíces superficiales, las cuales disminuyen su tamaño durante las sequías evitando así la pérdida de agua. [2]. Esta morfología permite sobrevivir a los agaves en entornos donde otras plantas no podrían prosperar.

Los invisibles del agave: aliados internos y externos

Al observar un agave en el desierto, es difícil imaginar que no está sólo. ¿Sabías que dentro y fuera de la planta del agave hay microorganismos que contribuyen a su supervivencia? Este conjunto de microorganismos forma para de lo que conocemos como el ecosistema invisible del agave. Se pueden clasificar en dos grandes grupos: los microorganismos endófitos, que habitan en el interior de los tejidos de la planta (raíces, tallo y horas) y los epífitos, que viven sobre su superficie, formando comunidades en contacto directo con el ambiente (Figura 2).

Ambos grupos desempeñan funciones esenciales para la planta. Los microorganismos endófitos participan en procesos clave como la fijación de nitrógeno, la producción de compuestos que estimulan el crecimiento vegetal y la modulación de respuestas al estrés. Por ejemplo, bacterias de los géneros *Acinetobacter*, *Bacillus*, *Enterobacter*, *Klebsiella* y *Pseudomonas* contribuyen a mejorar la disponibilidad de nutrientes y a regular el crecimiento en condiciones adversas [3].

Por su parte, los microorganismos epífitos actúan como una primera línea de defensa frente a factores externos. Al colonizar la superficie de hojas y raíces, limitan el establecimiento de patógenos mediante competencia por espacio y nutrientes, además de producir compuestos antimicrobianos que inhiben el crecimiento de patógenos (Figura 3). Entre estas destacan los ácidos orgánicos y las bacteriocinas como la nicina - proteínas con actividad antimicrobiana-, compuestos producidos principalmente por bacterias ácido-lácticas (sí, como las que encontramos en alimentos como el yogurt) [4]. Algunos microorganismos generan compuestos naturales con propiedades insecticidas, como la pulegona, repelentes como la 2-undecanona y sustancias antimicrobianas como el germacreno D, contribuyendo así a la protección integral de la planta [5].

Así mismo, algunas de estas comunidades como las pertenecientes a órdenes como *Pseudomonanadales*, *Enterobacteriales* y *Xanthomonadales* producen biopelículas con la finalidad de protegerse a ellos mismos y al agave. Una biopelícula es una capa protectora

Licenciamiento bajo el cual se publican los contenidos: CC BY-NC-ND 4.0

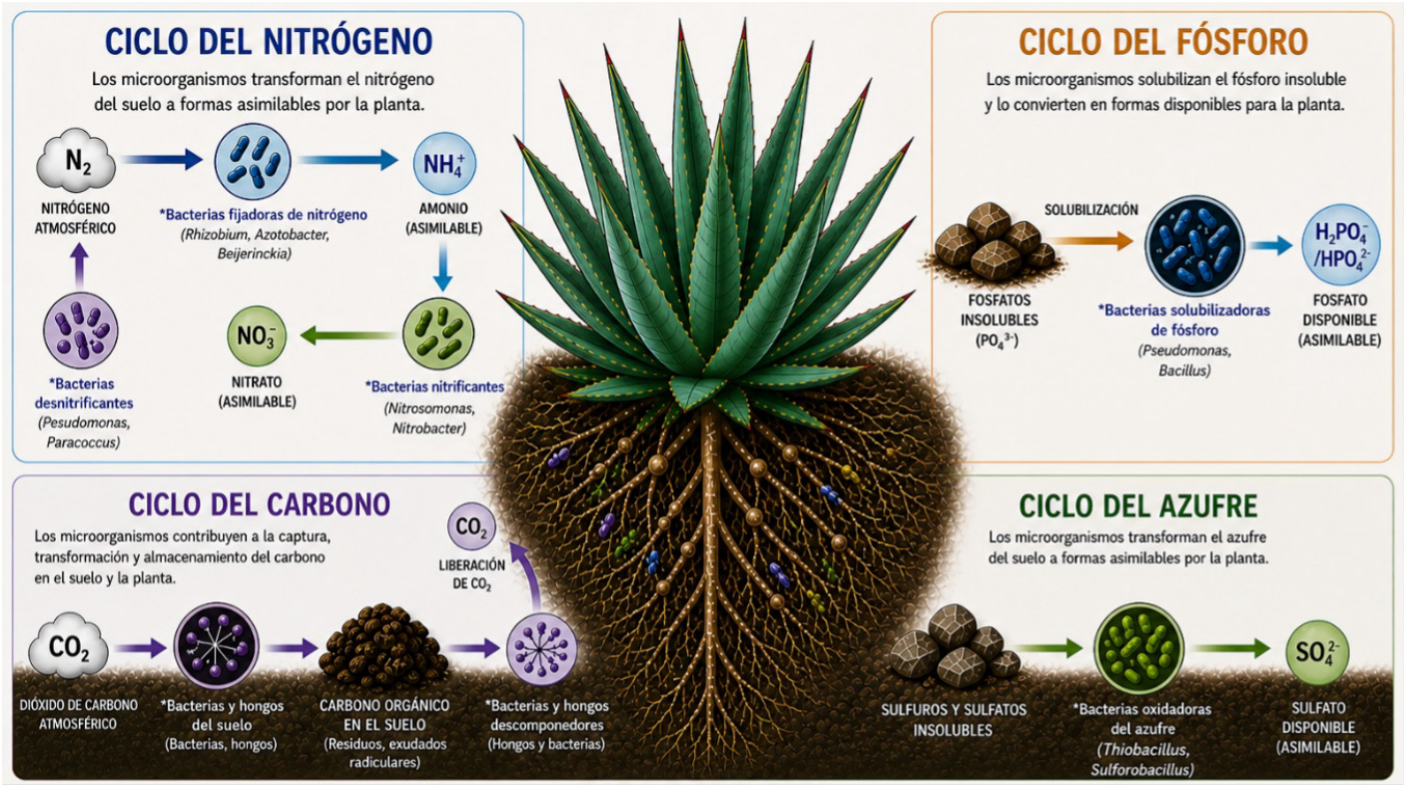


Figura 3. *Ciclos biogeoquímicos del fósforo, azufre, carbono y nitrógeno en el sistema suelo-agave, resaltando el papel de los microorganismos en la transformación y disponibilidad de nutrientes para la planta.*

compuesta principalmente por polisacáridos producidos por los propios microorganismos, que les permite adherirse a la superficie de la planta y permanecer unidos. Esta capa ayuda a retener humedad, proteger contra radiación solar y dificultar el establecimiento de microorganismos patógenos. De esta manera, los microbios no solo se benefician de la planta, sino que también contribuyen activamente a su supervivencia [6].

Es importante destacar que no solo las bacterias cumplen esas funciones. Los hongos, en particular los micorrízicos como *Rhizophagus*, establecen asociaciones con las raíces del agave que mejoran la absorción de agua y nutrientes, especialmente el fósforo [7]. Esta interacción resulta casi crucial en suelos pobres y ambientes con disponibilidad limitada de agua.

En conjunto, estos microorganismos no sólo coexisten con el agave, sino que forman una red de cooperación que fortalece su capacidad de adaptación. Este equilibrio entre microorganismos internos y externos permite al agave sobrevivir en condiciones extremas, demostrando que su resistencia no depende únicamente de sus propias características fisiológicas, sino también de las interacciones



Figura 4. *Beneficios potenciales del conocimiento del ecosistema microbiano asociado al agave para una agricultura sostenible.*

Licenciamiento bajo el cual se publican los contenidos: CC BY-NC-ND 4.0

con su microbiota asociada.

Microbios que ayudan al agave a alimentarse

El agave destaca por su capacidad de desarrollarse en suelos erosionados y de baja fertilidad, condiciones donde muchas otras plantas presentan limitaciones, pero ¿cómo lo hace? Gracias a la ayuda de sus microorganismos asociados. En las plantas de agave, el nitrógeno representa el macronutriente con mayor limitación para su crecimiento. El nitrógeno abunda en la atmósfera, pero el agave no puede aprovecharlo directamente; es aquí donde entran en acción las bacterias que viven asociadas a él (Figura 4). Bacterias como *Acinetobacter* sp. y *Leclercia adecarboxylata* fijan nitrógeno atmosférico necesario para que la planta produzca proteínas, enzimas, clorofila y ácidos nucleicos [2]. Adicionalmente, algunas bacterias participan en procesos del ciclo del carbono, el nitrógeno y el azufre, contribuyendo al reciclaje de nutrientes en suelos pobres. También, se ha reportado que algunos microorganismos como bacterias de los géneros *Bacillus*, *Pseudomonas* y *Enterobacter*, así como hongos del género *Rhizophagus* sintetizan enzimas y ácidos orgánicos que solubilizan el fósforo presente en el suelo, haciéndolo disponible para la planta [3,7]. Gracias a esas interacciones, el agave reduce su dependencia de fertilizantes químicos y mejora su capacidad de adaptación a suelos de baja fertilidad.

¿Cómo estudia la ciencia esta vida invisible?

Durante mucho tiempo, los microorganismos asociados a las plantas pasaron inadvertidos. Hoy, gracias a las ciencias ómicas como la metagenómica, metaproteómica y metabolómica, es posible identificar qué comunidades microbianas habitan en el agave, qué moléculas producen y cómo interactúan con su hospedero [3, 5].

Estas herramientas permiten comprender las complejas relaciones de cooperación entre el agave y los microorganismos que en él habitan, abriendo nuevas oportunidades para la biotecnología agrícola. Por ejemplo, gracias a la metaproteómica se puede identificar la expresión de proteínas por microorganismos específicos ante un estímulo concreto como temperatura, sequías, exposición ante patógenos o plagas, de tal manera que podrían utilizarse microorganismos benéficos del agave para mejorar la resistencia de otros cultivos, ya sea frente a estrés abióticos- como sequía, salinidad, temperaturas extremas y limitación de nutrientes- o estrés bióticos, mediante la supresión de patógenos, la producción de compuestos antimicrobianos y la inducción de respuestas de defensa sistémica en la planta hospedera [3, 5].

¿Por qué es importante conocer el ecosistema oculto del agave?

Comprender la relación entre el agave y sus microorganismos ofrece posibilidades para desarrollar estrategias de agricultura sostenible (Figura 5). Las características que estos microorganismos presentan permitirían explorar su uso potencian en la agricultura o en el mejoramiento de los cultivos de importancia económica. Diversos microorganismos asociados a esta planta presentan características funcionales clave, como la producción de compuestos antimicrobianos (por ejemplo, bacteriocinas y ácidos orgánicos), la formación de biopelículas que favorecen la retención de humedad y la protección frente a estrés ambiental, así como la capacidad de solubilizar fosfatos o facilitar la adquisición de nitrógeno. Estas propiedades pueden aprovecharse en el diseño de bioinoculantes capaces de mejorar el establecimiento y crecimiento de cultivos, especialmente en suelos degradados o bajo condiciones climáticas adversas. Así mismo, el uso de bacterias con actividad antimicrobiana podría disminuir la dependencia de

Licenciamiento bajo el cual se publican los contenidos: CC BY-NC-ND 4.0

pesticidas, mientras que los microorganismos promotores del crecimiento vegetal contribuirían a incrementar la productividad en regiones con limitaciones agrícolas. En conjunto estas aplicaciones representan una alternativa prometedora para fortalecer la producción de alimentos y apoyar a comunidades rurales con recursos limitados. Esto representa una alternativa prometedora para mejorar la producción de alimentos y para apoyar a comunidades rurales que enfrentan escasez de recursos.

Conclusión

El agave no es una planta resistente per se, sino que es el resultado de una estrecha colaboración entre la planta y un diverso conjunto de microorganismos que viven en su interior. Ese ecosistema invisible le permite sobrevivir en ambientes extremos y ofrece pistas valiosas para el desarrollo de soluciones biotecnológicas sostenibles. Descubrir y comprender esta alianza microscópica abre nuevas posibilidades para enfrentar los desafíos agrícolas del futuro y demuestra que, incluso en los ambientes más hostiles, la vida prospera gracias a la cooperación.

Referencias

[1] Robles-Arias, M. & Curz-Guerreo A. (2023). Agave: importancia y aplicaciones en México. *CienciAcierta*, 19(76), 264-288.

[2] García-Mendoza, A. J., Cházaro-Basañes, M. J., Nieto Sotelo, J., Sánchez-Teyer, L. F., Tapia-Campos, E., Gómez-Leyva, J. F., Tamayo-Ordóñez, M., ... Gutiérrez-Mora, A. (2017). Agave. En *Panorama del aprovechamiento de los agaves en México* (pp. 19–69). AGARED. ISBN 978-607-97548-5-3.

[3] Aguado-Santacruz, G.A., Aguado-Rodríguez, D.L., Moreno-Gómez, B., Arroyo-Gonzáles, D., Centeno-Jamaica, D., Aguirre-Mancilla, C. & García-Moys, E. (2022). Endomicrobiota bacteriana de agave pulquero (*Agave salmiana*). I. Aislamiento, frecuencia e identificación molecular. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 45, 243-250. https://doi.org/10.35196/rfm.2022.2.243

[4] Alameri, F., Tarique, M., Osaili, T., Obaid, R., Abdalla, A., Masad, R., A. Al-Sbiei, M. Fernandez-Cabezudo, S.Q. Liu, B. Al-Ramadi & M. Ayyash. (2022). Lactic acid bacteria isolated from fresh vegetable products: Potential probiotic and postbiotic characteristics including immunomodulatory effects. *Microorganisms*, 10, 389. https://doi.org/10.3390/microorganisms10020389

[5] Slama, H. B., Cherif-Silini, H., Chenari Bouket, A., Qader, M., Silini, A., Yahiaoui, B., ... & Belbahri, L. (2019). Screening for Fusarium antagonistic bacteria from contrasting niches designated the endophyte *Bacillus halotolerans* as plant warden against *Fusarium*. *Frontiers in microbiology*, 9, 3236. https://doi.org/10.3389/fmicb.2018.03236

[6] del Rosario, M. H. M., Abel, L. B. J., Karen, S. F. M., Adriana, C. O. & Jabín, B. B. J. (2025). Arbuscular mycorrhizal fungi improve the growth, nutrient uptake and survival of micropropagated agave (*Agave marmorata* Roezl) plantlets during acclimatization. *Journal of Arid Environments*, 228, 105330. https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2025.105330

[7] Martha-Lucero, N., Viniegra-González, G., González-Olivares, L., & Cruz-Guerrero, A. (2023). Biofilm formation by agave epiphytic lactic acid bacteria fed with agave fructans. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 39(11), 299. https://doi.org/10.1007/s11274-023-03749-3

Licenciamiento bajo el cual se publican los contenidos: CC BY-NC-ND 4.0

Recibido: 16-abr-2026 Aceptado: 08-jun-2026 e-ISSN 2954-4890

Sección: *Hot Science*

Contaminación ambiental por el desgaste de neumáticos: un problema químico invisible

Environmental pollution from tire wear: an invisible chemical problem

María Fernanda Ramírez-Manjarrez[1]
Israel Castro-Ramírez[2]
Omar Cruz-Santiago[2]*

[1]*Posgrado en Biociencias, División de Ciencias de la Vida, Universidad de Guanajuato, Campus Irapuato-Salamanca, 36500, Km. 9.0 Carretera Irapuato-León, Irapuato, Guanajuato, Mexico.*
[2]*Departamento de Ciencias Ambientales. División de Ciencias de la Vida, Universidad de Guanajuato, Campus Irapuato-Salamanca, 36500, Km. 9.0 Carretera Irapuato-León, Irapuato, Guanajuato, Mexico.*

**Autor para la correspondencia: o.cruz@ugto.mx*

RESUMEN

El impacto ambiental derivado del desgaste de neumáticos ha sido estudiado en años recientes, debido a sus efectos sobre organismos acuáticos y terrestres, como resultado de la dispersión de compuestos químicos presentes en estos productos. Entre ellos destacan el antioxidante 6PPD y su producto de transformación, el 6PPD-Q, considerados contaminantes emergentes asociados con efectos de toxicidad ambiental. A pesar de los avances por comprender su comportamiento ambiental, el conocimiento disponible es limitado, especialmente en países como México, subrayando la necesidad de continuar investigando sus efectos biológicos y los riesgos asociados a la exposición prolongada para la salud ambiental y humana.

Palabras clave: 6PPD, contaminantes emergentes, toxicidad ambiental.

SUMMARY

Environmental impact derived from tire wear has been studied in recent years, due to its effects on aquatic and terrestrial organisms, resulting from the dispersion of chemical compounds present in these products. Among them, the antioxidant 6PPD and its transformation product, 6PPD-Q, stand out as emerging contaminants associated with environmental toxic effects. Despite advances in understanding the environmental behavior, the available knowledge remains limited, particularly in countries such as Mexico, highlighting the need to continue investigating their biological effects and the risks associated with prolonged exposure to environmental and human health.

Keywords: 6PPD, emerging contaminants, environmental toxicity.

Licenciamiento bajo el cual se publican los contenidos: CC BY-NC-ND 4.0

Introducción

La mayoría de las personas nos hemos percatado del problema ambiental que representan los neumáticos, al verlos acumulados en los alrededores de zonas viales, abandonados en parques o perturbando el paisaje. Sin embargo, existe un impacto que ha sido invisible durante años derivado al uso y desgaste: diminutas partículas que contienen residuos químicos potencialmente tóxicos que terminan contaminando el suelo y el agua (Figura 1).

La incorporación de diversos químicos durante la manufactura de los neumáticos se realiza para aumentar su durabilidad, su resistencia al desgaste y evitar su envejecimiento prematuro. Entre ellos destaca el antioxidante 6PPD [N-(1,3-dimetilbutil)-N′-fenil-p-fenilendiamina] el cual ha despertado la preocupación de la comunidad científica, debido a su alta capacidad de transformarse en 6PPD-Q (6PPD-Quinona), un contaminante encontrado en 2020 como el causante de la muerte masiva de salmón coho (*Oncorhynchus kisutch*), y que se ha catalogado como un contaminante de presencia universal en las zonas de alto tráfico vehicular, pues ha sido detectado incluso en polvo de áreas recreativas y polvo de interiores [1, 3].

A partir de este hallazgo, se han realizado numerosas investigaciones para comprender el comportamiento de estos compuestos en el ambiente, revelando su presencia en cuerpos de agua, escorrentía, suelo, polvo y en la atmósfera. Además, estas investigaciones evidencian los efectos provocados por la exposición al 6PPD y el 6PPD-Q en diversos organismos acuáticos y terrestres, como algunas especies de peces y ratones, respectivamente [2, 3].

Sin embargo, pese al conocimiento adquirido sobre el 6PPD y el 6PPD-Q en años recientes, la información disponible sigue siendo limitada. En este contexto, resulta indispensable continuar realizando investigaciones con el fin de comprender plenamente el comportamiento ambiental de estos contaminantes emergentes, nombrados así ya que su presencia en el ambiente ha sido detecta-

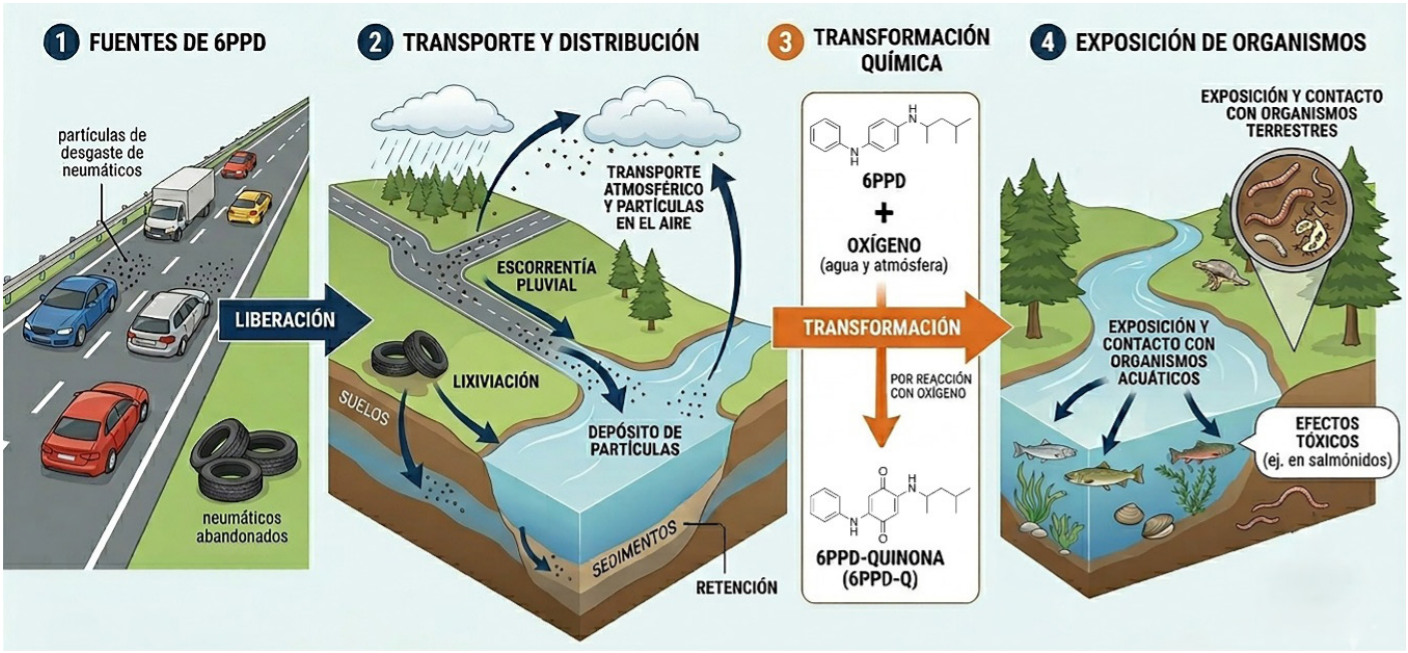


Figura 1. *Comportamiento ambiental del 6PPD: fuentes, distribución, transformación y exposición. Ilustración creada con Google Gemini 3 Flash basado en Tian et al. [1] y Zhao et al. [3].*

Licenciamiento bajo el cual se publican los contenidos: CC BY-NC-ND 4.0

da recientemente, por lo que no se conocía su potencial tóxico ni sus efectos, y como consecuencia, no cuentan con ningún tipo de regulación. Además, conocer su potencial tóxico y los impactos a la salud humana derivados de la exposición constante debe convertirse en prioridad, dado que esta problemática surge debido a nuestras actividades cotidianas. Por su parte, la difusión sobre el panorama actual y las perspectivas futuras de estos compuestos sirven de base para la realización de más investigaciones científicas en países como el nuestro.

¿Qué es el 6PPD y por qué preocupa?

El aditivo 6PPD es un químico usado desde la década de 1960 en la industria de los neumáticos de caucho actuando como una capa protectora ante la abrasión. Entre sus propiedades fisicoquímicas destaca su potencial para adherirse a lípidos, lo que puede significar una alta tendencia de permanecer en tejidos grasos como el hígado en caso de exposición y acumularse. Además, el 6PPD posee gran afinidad por la materia orgánica, lo que le confiere un comportamiento para ser retenido en suelos o sedimentos. No obstante, a pesar de que sus propiedades facilitan su permanencia en el ambiente, y que el 6PPD ha resultado comprometer el bienestar de diversos organismos, debido a su liberación ambiental prolongada, la mayor preocupación sobre la presencia de este compuesto en los ecosistemas es debido a su alta reactividad con el oxígeno [4].

Esta característica permite la transformación del 6PPD, al reaccionar con el oxígeno atmosférico o presente en el agua, en un contaminante con mayor potencial tóxico, el 6PPD-Quinona o 6PPD-Q (Figura 1). Se ha reportado que el 6PPD-Q se vuelve más estable en el ambiente, lo que aumenta su tiempo de vida media, es decir, el tiempo que tarda el contaminante en reducir su concentración a la mitad. Debido a esto, puede permanecer durante más tiempo en el ambiente. Además, los cambios en su composición química alteran sus propiedades, y, en consecuencia, este contaminante produce mayores efectos a la salud a menores concentraciones, es decir, es más tóxico [5].

¿Qué se sabe hasta el momento?

Se han publicado diversas investigaciones realizadas en Norteamérica, Europa y Asia, en las cuales se han detectado concentraciones traza (nanogramo o microgramo por litro) de estos compuestos en la escorrentía urbana, cuerpos de agua cercanos a zonas con alta densidad vehicular, así como en sedimentos, suelos urbanos y polvo atmosférico, demostrando la amplia presencia ambiental de ambos contaminantes, así como su capacidad de movilizarse y distribuirse en los ecosistemas, lo que conlleva al aumento de rutas de exposición para los organismos [2].

Uno de los estudios más destacados, en el que se identificó al 6PPD-Q como el principal responsable de la mortalidad masiva del salmón coho (*Oncorhynchus kisutch*, Figura 2), fue registrado en el noreste del Pacífico de Estados Unidos en 2020 [1]. Este caso demostró la gravedad de la presencia de estos compuestos en el ambiente, porque resultó ser letal



Figura 2. *Salmón coho adulto (Oncorhynchus kisutch). Fotografía de Bureau of Land Management Oregon and Washington (2015). Utilizada bajo licencia Creative Commons Attribution 4.0 (CC BY 4.0)*

Licenciamiento bajo el cual se publican los contenidos: CC BY-NC-ND 4.0

incluso en concentraciones extremadamente pequeñas: apenas 9.5 partes por trillón, equivalentes a unos cuantos nanogramos en un litro de agua. Mostrando así una evidencia de que sustancias prácticamente invisibles para nosotros pueden tener consecuencias graves para la vida acuática.

Además, resulta necesario analizar no solamente su distribución ambiental, por ello se han publicado artículos enfocados en comprender su toxicocinética, es decir, qué ocurre cuando estos contaminantes ingresan al organismo. Bioensayos realizados con pez cebra (*Danio rerio*) han demostrado que la exposición de ambos compuestos se da principalmente a través de la respiración branquial y se acumulan en el organismo, aunque presentan distintos patrones de distribución. Por su parte el 6PPD tiende a concentrarse mayormente en el hígado, mientras que la afinidad del 6PPD-Q predomina en el cerebro, confiriéndole potencial neurotóxico [2]. Por otro lado, en organismos terrestres se ha evidenciado también tener impactos negativos como alteraciones en la actividad fisiológica, lo que repercute a especies de relevancia para la dinámica de los suelos, como las lombrices de tierra (*Eisenia andrei*), cuya participación es fundamental para el ciclo de nutrientes y la descomposición de materia orgánica [6].

Estos datos indican que la disponibilidad del 6PPD y, en especial, del 6PPD-Q en el ambiente permite la exposición constante de diversos organismos vivos, los cuales son susceptibles a sufrir efectos tóxicos a distintas escalas biológicas. Sin embargo, gran parte de esta información es derivada de estudios realizados en zonas específicas y bajo condiciones controladas, lo que resalta la necesidad de desarrollar bioensayos e investigaciones en diferentes contextos ambientales para construir un entendimiento completo del comportamiento de estos contaminantes emergentes.

Del ambiente al ser humano: ¿qué se sabe sobre la exposición humana?

La presencia del 6PPD y el 6PPD-Q en diversos ecosistemas también ha despertado el interés por evaluar el posible riesgo para la salud humana. Un estudio realizado en 2022 en tres regiones del sur de China reportó la detección de ambos contaminantes en muestras de orina recolectadas de habitantes de estas zonas (los grupos poblacionales estudiados fueron adultos, niños y mujeres embarazadas). Los análisis demostraron concentraciones significativamente mayores de 6PPD-Q que las de 6PPD, lo que resalta el potencial de exposición de estos compuestos y la urgencia de realizar evaluaciones de riesgo integrales para la salud humana ante exposiciones prolongadas [7].

Aunque todavía no se conocen con precisión las consecuencias de esta exposición para la salud humana, la presencia de ambos compuestos en muestras biológicas indica que pueden ingresar al organismo a través de diferentes rutas, como la inhalación de partículas suspendidas de aire, el consumo de agua o alimentos contaminados, y el contacto con ambientes urbanos [4]. Subrayando así, la necesidad de desarrollar estudios toxicológicos más detallados en seres humanos, sobre todo porque los patrones de exposición pueden variar entre la población general y los grupos vulnerables, como niños, adultos mayores y mujeres embarazadas, que pueden presentar mayor sensibilidad.

Perspectivas: limitaciones y desafíos

A pesar de los avances en el estudio del 6PPD y el 6PPD-Q, aún existen importantes desafíos para comprender de forma integral su comportamiento e implicaciones ambientales. Las propiedades fisicoquímicas de ambos compuestos dificulta predecir cómo se transportan, transforman y acumulan en los ecosistemas, por lo que todavía existen incer-

Licenciamiento bajo el cual se publican los contenidos: CC BY-NC-ND 4.0

tidumbres sobre su destino final, así como sus efectos a largo plazo.

Otro de los principales desafíos surge debido a que la información disponible proviene de estudios bajo condiciones controladas de laboratorio o en regiones con condiciones ambientales específicas. Aunque diversos estudios han resultado fundamentales para identificar rutas de exposición y mecanismos de toxicidad, aún resulta necesario ampliar las investigaciones en ecosistemas reales, donde factores como la temperatura, las lluvias, la presencia de otros contaminantes y las actividades humanas pueden modificar la exposición y los efectos observados.

Además, en futuros estudios se deberían tomar en cuenta la evaluación de la toxicidad de ambos compuestos en poblaciones humanas. Aunque ya se ha demostrado la exposición al 6PPD y al 6PPD-Q, aún se requiere investigar sus posibles efectos en poblaciones vulnerables, como niños y mujeres embarazadas, así como en trabajadores relacionados con la fabricación, reciclaje y manejo de neumáticos.

En México, el panorama es aún más incierto. Hasta el momento no existen reportes publicados que documenten la presencia o los efectos del 6PPD y el 6PPD-Q en ecosistemas nacionales, lo que limita la evaluación de riesgos ambientales y para la salud humana. Frente a esto, resulta fundamental impulsar programas de monitoreo ambiental, estudios ecotoxicológicos y estrategias de gestión que permitan comprender si existe una problemática, y la magnitud de esta.

Conclusiones

El descubrimiento de la toxicidad del 6PPD-Q reveló una fuente de contaminación que por muchos años paso desapercibida: el desgaste cotidiano de los neumáticos. La presencia de este contaminante tanto en los ecosistemas acuáticos como terrestres demuestra que sus efectos pueden ser más amplios de lo que se pensaba.

Por ello, es necesario continuar investigando sus impactos ambientales, sobre todo en países en vías de desarrollo como México. Esto puede realizarse fortaleciendo el monitoreo y promoviendo soluciones que permitan reducir los riesgos asociados al uso masivo de neumáticos.

Agradecimientos

Agradecemos el apoyo otorgado por la Secretaría de Ciencias, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI) a Manjarrez-Ramírez (Becaria No. 2145478). Se declara que se utilizó Microsoft 365 Copilot únicamente como apoyo para la corrección ortográfica y mejora de la redacción en algunas secciones del texto, sin comprometer la originalidad del manuscrito.

Referencias

[1] Tian, Z., Zhao, H., Peter, K. T., Gonzalez, M., Wetzel, J., Wu, C., Hu, X., Prat, J., Mudrock, E., Hettinger, R., Cortina, A. E., Biswas, R. G., Kock, F. V. C., Soong, R., Jenne, A., Du, B., Hou, F., He, H., Lundeen, R., … Kolodziej, E. P. (2021). A ubiquitous tire rubber–derived chemical induces acute mortality in coho salmon. *Science*, 371(6525), 185–189. https://doi.org/10.1126/science.abd6951

[2] Ding, Y., y Wang, W.-X. (2026). Tissue-specific bioaccumulation and hepatotoxicity of 6PPD and 6PPD-Quinone in zebrafish. *Environmental Chemistry and Ecotoxicology*, 8, 307–318. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.enceco.2025.11.029

[3] Zhao, H. N., Thomas, S. P., Zylka, M. J., Dorrestein, P. C., y Hu, W. (2023). Urine Excretion, Organ Distribution, and Placental Transfer of 6PPD and 6PPD-Quinone in Mice and Potential Developmental Toxicity through Nuclear Receptor Pathways. *Environmental*

Licenciamiento bajo el cual se publican los contenidos: CC BY-NC-ND 4.0

Science and Technology, 57(36), 13429–13438. https://doi.org/10.1021/acs.est.3c05026

[4] Ihenetu, C.S., Xu, Q., Fang, L., Azeem, M., Li, G. y Enyoh, E.C. (2025). 6PPD and 6PPD-Quinone in the Urban Environment: Assessing Exposure Pathways and Human Health Risks. *Urban Science*, 9(228). https://doi.org/10.3390/urbansci9060228

[5] Jiao, F., Zhao, Y., Yue, Q., Wang, Q., Li, Z., Lin, W., Han, L., y Wei, L. (2025). Chronic toxicity mechanisms of 6PPD and 6PPD-Quinone in zebrafish. *Environmental Science and Ecotechnology*, 25. https://doi.org/10.1016/j.ese.2025.100567

[6] Masset, T., Breider, F., Renaud, M., Müller, J., Bergmann, A., Vermeirssen, E., Dudefoi, W., Schirmer, K. y Ferrari, B.J.D. (2025). Effects of tire particles on earthworm (*Eisenia andrei*) fitness and bioaccumulation of tire-related chemicals. *Environmental Pollution*, 368. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2025.12578

[7] Du, B., Liang, B., Li, Y., Shen, M., Liu, L.-Y., & Zeng, L. (2022). First Report on the Occurrence of N-(1,3-Dimethylbutyl)-N′-phenyl-p-phenylenediamine (6PPD) and 6PPD-Quinone as Pervasive Pollutants in Human Urine from South China. *Environmental Science & Technology Letters,* 9(12), 1056–1062. https://doi.org/10.1021/acs.estlett.2c00821

Licenciamiento bajo el cual se publican los contenidos: CC BY-NC-ND 4.0

Recibido: 14-feb-2026 Aceptado: 02-may-2026 e-ISSN 2954-4890

Sección: *Hot Science*

Hongos endófitos: aliados ocultos de las plantas

Aplicaciones ecológicas, agrícolas y farmacológicas

Endophytic fungi: plants' hidden allies

Ecological, agricultural, and pharmacological applications

Aura Jimena De La Rosa Lucas[1]
Hypatia Arano Varela[2]*

[1]*Estudiante de la Licenciatura en Psicología Biomédica, DCBS, Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Lerma (UAM Lerma), Estado de México, México.*
[2]*Departamento de Ciencias de la Salud, DCBS, UAM Lerma, Estado de México, México.*

**Autor para la correspondencia: h.arano@correo.ler.uam.mx*

RESUMEN

Los hongos endófitos son microorganismos que viven dentro de las plantas sin causarles daño y que desempeñan funciones clave en su supervivencia. Se encuentran en casi todas las plantas, aunque su estudio se ha centrado en especies de importancia económica. Estos hongos producen metabolitos secundarios con propiedades antibacterianas, antifúngicas, antivirales y anticancerígenas, lo que los hace relevantes en medicina, biotecnología y agricultura sustentable. Además, contribuyen a la defensa vegetal y tolerancia al estrés ambiental. En México, su diversidad es poco explorada, pero representa una fuente prometedora de compuestos con aplicaciones industriales, médicas y agroecológicas.

Palabras clave: Hongos endófitos, metabolismo secundario, biotecnología.

SUMMARY

Endophytic fungi are microorganisms that live inside plants without causing harm and play key roles in their survival. They are found in almost all plants, although research has mainly focused on economically important species. These fungi produce secondary metabolites with antibacterial, antifungal, antiviral, and anticancer properties, making them relevant in medicine, biotechnology, and sustainable agriculture. Additionally, they contribute to plant defense and tolerance to environmental stress. In Mexico, their diversity remains underexplored, but they represent a promising source of compounds with industrial, medical, and agroecological applications.

Keywords: Endophytic fungi, secondary metabolism, biotechnology.

Licenciamiento bajo el cual se publican los contenidos: CC BY-NC-ND 4.0

Hongos endófitos

Cuando pensamos en hongos, es común concentrarse en el moho de la fruta, en las setas del bosque o incluso en infecciones. Sin embargo, existe un grupo mucho más discreto e interesante: los hongos endófitos, los cuales son microorganismos que viven ocultos dentro de las plantas y que cumplen un papel fundamental en la naturaleza. Los hongos endófitos habitan en el interior de estructuras vegetales vivas como hojas, tallos o raíces. A diferencia de los hongos patógenos, no dañan a su hospedero; por el contrario, sostienen una relación biótica que es benéfica para ambos: la planta les proporciona refugio y nutrientes, mientras que el hongo ofrece protección y cooperación para asegurar su supervivencia en ambientes hostiles (p. ej., altas temperaturas, sequía, suelos infértiles o contaminados por metales pesados), una interacción conocida como simbiosis [1].

¿En qué plantas habitan los hongos endófitos?

Diversos estudios han demostrado que los endófitos pueden encontrarse prácticamente en todas las plantas estudiadas hasta la fecha, desde musgos y helechos hasta árboles y cultivos agrícolas, lo cual sugiere que es relación es más común y antigua de lo que pensaba [2].

No obstante, el conocimiento relacionado con ese tipo de hongos ha quedado restringido solo a una cantidad limitada de especies vegetales, la mayoría de los estudios se concentra en plantas herbáceas (plantas cuyos tallos son blandos o flexibles, compuestos principalmente por tejidos primarios) y en árboles (plantas que desarrollan tejidos lignificados o madera, p duciendo tallos duros y persistentes, característicos de árboles y arbustos), mientras que otros grupos como los musgos (plantas pequeñas que carecen de tejidos conductores y se reproducen por esporas, creciendo comúnmente en ambientes húmedos) han recibido menor atención [3]. Por ejemplo, en una revisión reciente sobre plantas coreanas (2022), en la cual recopilaron datos sobre 132 especies vegetales que fueron estudiadas como hospederas de hongos endófitos, solo 3 especies correspondían a musgos, mientras que 95 eran plantas herbáceas y 34 se referían a árboles u otras plantas leñosas (ver Figura 1) [2].

A nivel global sucede algo similar, el panorama general de las investigaciones científicas muestra que los hongos endófitos se han descrito únicamente en alrededor del 30% de las familias de plantas terrestres [4]. Como se muestra en la Figura 2, algunas familias han sido estudiadas con mayor frecuencia, sobre todo aquellas que incluyen cultivos importantes o especies forestales. Entre los grupos de plantas más estudiados, se encuentran las gramíneas (Poaceae) con 189 hospederos reportados, que incluyen cultivos tan relevantes como el arroz, el trigo, la avena y la caña de azúcar. También destacan las leguminosas (Fabaceae) con 98 hospederos, a las que pertenecen especies ampliamente cultivadas como el frijol, la lenteja, el garbanzo y el maní. En el caso de los árboles, sobresale la familia Pinaceae con 82 hospederos que abarcan pinos, abetos

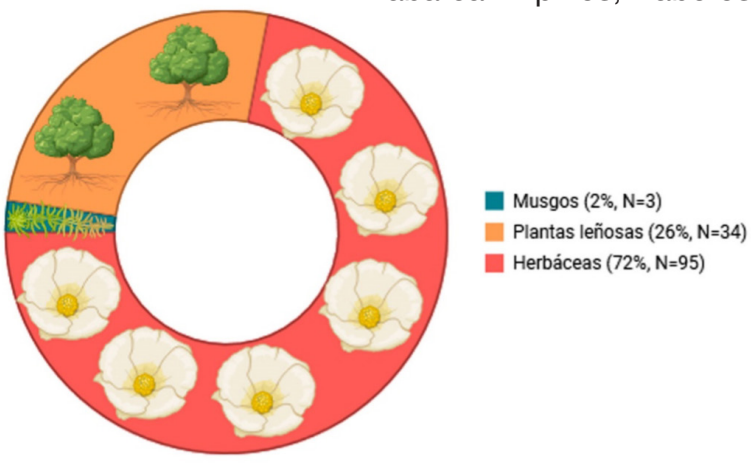


Figura 1. *Comparación de especies vegetales coreanas hospederas de hongos endófitos (musgos, herbáceas y árboles). Fuente: Elaborado con BioRender con información de Eo et al., 2022.*

Licenciamiento bajo el cual se publican los contenidos: CC BY-NC-ND 4.0

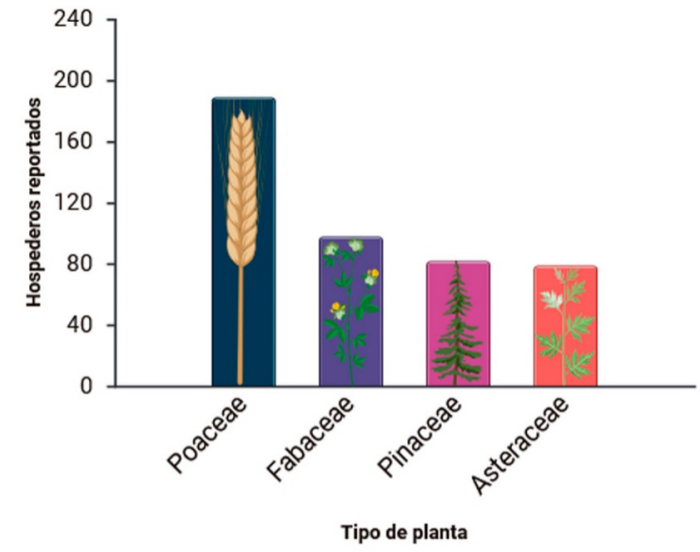


Figura 2. *Principales familias vegetales estudiadas como hospederas de hongos endófitos a nivel mundial. Fuente: Elaborada con BioRender con información de Harrison et al., 2020.*

y cedros. Finalmente, respecto a las plantas con flores, está la familia Asteraceae con 79 hospederas que incluyen al girasol, la gerbera, la lechuga y la alcachofa. Ese patrón sugiere que el atractivo académico suele centrarse en plantas con alto valor económico o con un papel clave en los ecosistemas, más que en otros grupos vegetales menos estudiados como los musgos o las plantas medicinales [4, 5].

¿Qué papel desempeñan los hongos endófitos dentro de sus hospederos y por qué han despertado tanto interés en la biología y la ecología?

Entre los beneficios más relevantes, destaca su capacidad para defender a las plantas contra agresiones bióticas como la invasión de plagas y/o enfermedades causadas por microorganismos. En gran medida, eso lo logran mediante la producción y secreción de compuestos bioactivos (metabolitos secundarios) capaces de repeler insectos o de inhibir el crecimiento de bacterias u otros hongos patógenos [6]. Además, ayudan a las plantas a tolerar condiciones ambientales extremas, como sequías, suelos estériles o con altos niveles de salinidad y en general, para enfrentar el estrés ambiental asociado con el cambio climático y la degradación de los ecosistemas [7].

Sin embargo, el interés por los hongos endófitos no solo se restringe al ámbito vegetal. En las últimas décadas estos microorganismos también han despertado el interés de áreas como la biotecnología y la farmacología [5].

¿Qué son los metabolitos secundarios y cuál es su importancia?

Los metabolitos secundarios son compuestos químicos de bajo peso molecular producidos por los hongos de forma especie-específica. Debido a su diversidad química, los metabolitos se clasifican en policétidos, péptidos no ribosomales, terpenos, alcaloides y otros compuestos híbridos. Aunque no son esenciales para el crecimiento o la reproducción de esos organismos, desempeñan roles ecológicos y de defensa importantes por causa de sus cualidades bioactivas que incluyen propiedades antibacterianas, antifúngicas, antivirales, y anticancerígenas, entre otras [8].

Precisamente, debido a esas importantes funciones biológicas, muchos metabolitos secundarios son farmacológicamente relevantes para enfrentar enfermedades ocasionadas por virus, bacterias y/u hongos; pero también enfermedades crónicas como cáncer, diabetes o enfermedades cardiovasculares [5]. Un ejemplo clásico es el antibiótico β-lactámico 'penicilina' (descubierto en *Penicillium notatum* y actualmente producido a nivel industrial por *Penicillium chysogenum*), cuyo descubrimiento marcó un antes y un después en el tratamiento de infecciones bacterianas [8].

Otro compuesto importante es la griseofulvina, un compuesto con actividad antifúngica, el cual fue originalmente aislado de

Licenciamiento bajo el cual se publican los contenidos: CC BY-NC-ND 4.0

Penicillium griseofulvum, en la actualidad hay referencias sobre su producción por otros hongos endófitos. Este metabolito ejerce un efecto inhibidor sobre la reproducción de diversos hongos, incluidos patógenos que afectan a las plantas. Este tipo de compuestos contribuye al control de enfermedades vegetales sin recurrir a fungicidas sintéticos, lo cual representa una alternativa más amigable con el ambiente [9]. También, los hongos endófitos son capaces de sintetizar compuestos con actividad antiviral como la alternoxina I, una micotoxina que ha demostrado actividad inhibitoria contra algunos virus; la pestalotiopsona A, una naftoquinona con capacidad para interferir en la replicación viral; el ácido citónico A, un metabolito que ha demostrado actividad contra virus como el citomegalovirus humano [10].

La lovastatina, es un compuesto antitumoral aislado del hongo *Aspergillus terreus*. Este metabolito se utiliza clínicamente para reducir los niveles de colesterol que también ha mostrado *in vitro* e *in vivo* la capacidad de inhibir el crecimiento de células tumorales y favorecer procesos de muerte celular (apoptosis). Estos efectos han despertado un creciente interés en su posible aplicación dentro de la investigación oncológica, aunque aún se requieren más estudios para validar su potencial uso en humanos [11].

Los compuestos producidos por los endófitos también son de interés en la agricultura sustentable. Se buscan alternativas que favorezcan el crecimiento vegetal, mejoren la absorción de nutrientes y protejan a las plantas contra enfermedades sin recurrir a pesticidas o fertilizantes de origen sintético, cuyo uso puede contribuir a la contaminación del suelo y de los cuerpos de agua [7]. Esta perspectiva resulta especialmente valiosa ante el aumento de la demanda de alimentos y de la necesidad urgente por reducir el impacto ambiental derivado de la producción agrícola [7].

Hongos endófitos en plantas mexicanas

En países megadiversos como México existen numerosos trabajos sobre endófitos en especies particulares, como el café, las orquídeas o en algunas plantas farmacológicamente relevantes. Actualmente no se cuenta con una revisión a nivel nacional que reúna datos relacionados con los grupos vegetales más estudiados y sus hongos endófitos asociados. Lo anterior es importante, en virtud de que las diferentes especies vegetales que nutren la amplia variedad de ecosistemas mexicanos, podrían albergar una enorme riqueza de hongos endófitos poco explorada y con alto potencial industrial, médico, agroalimentario y/o ambiental [4, 5].

En ese sentido, el trabajo experimental permite explorar de manera directa el potencial de esos microorganismos, ya que bajo condiciones controladas en laboratorio es posible aislarlos, cultivarlos, identificarlos y manipularlos, lo que facilita el estudio de sus metabolitos y de sus actividades biológicas asociadas. Por ejemplo, en el laboratorio de Biotecnología y Microbiología Ambiental de la Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Lerma, estamos llevando a cabo investigaciones relacionadas

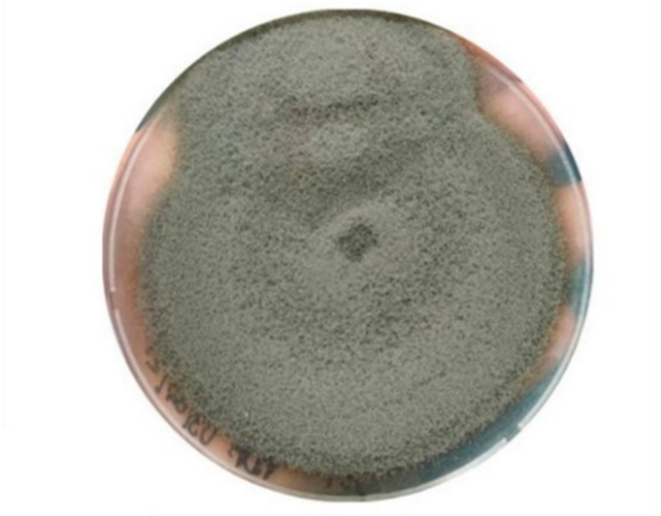


Figura 3. *Cladosporium spp., hongo endófito aislado de la planta medicinal 'Tepozán' (Buddleja cordata Kunth).*

Licenciamiento bajo el cual se publican los contenidos: CC BY-NC-ND 4.0

con el aislamiento e identificación de hongos endófitos a partir de la planta medicinal mexicana 'Tepozán' (*Buddleja cordata* Kunth), con la finalidad de evaluar su potencial metabólico. Para ello, inicialmente los tejidos vegetales son desinfectados cuidadosamente con el propósito de eliminar los microorganismos presentes en la superficie y de asegurar que los hongos que se obtengan provengan únicamente del interior de la planta. Posteriormente, los tejidos son seccionados y colocados en medio nutritivo para favorecer el crecimiento de los hongos. Después, cada cepa es aislada e identificada a partir de sus características genotípicas y fenotípicas. Actualmente, estamos evaluando la capacidad antibacteriana de extractos de *Cladosporium* spp. (ver Figura 3) una de las cepas endofíticas aisladas de *B. cordata*.

Este tipo de estudios representa un primer paso para descubrir nuevos compuestos con posibles aplicaciones médicas y/o agrícolas a partir de hongos endófitos aislados de una planta no modelo y además, evidencia el basto trabajo que queda por hacer al respecto.

Conclusión

Lejos de ser organismos aislados, las plantas forman parte de complejas redes de interacción con microorganismos que influyen en su supervivencia y desempeño, ejemplo de ello son los hongos endófitos, componentes esenciales de la biología vegetal que, aunque invisibles a simple vista, influyen profundamente en la adaptación, salud y productividad de las plantas. Su estudio no solo contribuye a ampliar nuestro conocimiento de los procesos ecológicos naturales, sino que también abre la puerta a aplicaciones innovadoras en ámbitos como la agricultura, la biotecnología y la salud humana. Frente a los grandes retos ambientales y alimentarios del siglo XXI, estos microorganismos podrían convertirse en piezas clave para el desarrollo de soluciones sostenibles que integren la ciencia básica con prácticas aplicadas. A veces, las soluciones más poderosas son también las más discretas.

Referencias

[1] Waqar, S., Bhat, A. A., & Khan, A. A. (2024). Endophytic fungi: Unravelling plant-endophyte interaction and the multifaceted role of fungal endophytes in stress amelioration. *Plant Physiology and Biochemistry,* Volume 206, 108174. https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2023.108174.

[2] Eo, J. K., Choi, J. W., & Eom, A. H. (2022). Diversity, Distribution, and Host Plant of Endophytic Fungi: A Focus on Korea. *Mycobiology*, 50(6), 399–407. https://doi.org/10.1080/12298093.2022.2154044

[3] Glimn-Lacy, J., & Kaufman, P. B. (2006). Botany illustrated: Introduction to plants, major groups, flowering plant families (2nd ed.). New York: Springer.

[4] Harrison, J. G., & Griffin, E. A. (2020). The diversity and distribution of endophytes across biomes, plant phylogeny and host tissues: how far have we come and where do we go from here? *Environmental microbiology*, 22(6), 2107–2123. https://doi.org/10.1111/1462-2920.14968

[5] Wang, Z., Wang, L., Pan, Y., Zheng, X., Liang, X., Sheng, L., Zhang, D., Sun, Q., & Wang, Q. (2023). Research advances on endophytic fungi and their bioactive metabolites. *Bioprocess and Biosystems Engineering* 46(2), 165–170. https://doi.org/10.1007/s00449-022-02840-7

[6] Waqar, S., Bhat, A. A., & Khan, A. A. (2024). Endophytic fungi: Unravelling plant-endophyte interaction and the multifaceted role of fungal endophytes in stress amelioration. *Plant physiology and biochemistry: PPB*, 206, 108174. https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2023.108174

[7] Watts, D., Palombo, E. A., Jaimes Castillo, A., & Zaferanloo, B. (2023). Endophytes in Agriculture: Potential to Improve Yields and Tolerances of Agricultural Crops. *Microorganisms*, 11(5), 1276. https://doi.org/10.3390/microorganisms11051276

[8] Ortega, H. E., Torres-Mendoza, D., & Cubilla-Ríos, L. (2025). Antibacterial compounds isolated from endophytic fungi reported between 2021 and 2024. *Antibiotics* 14(7), 644. https://doi.org/10.3390/antibiotics14070644

Licenciamiento bajo el cual se publican los contenidos: CC BY-NC-ND 4.0

Recibido: 08-abr-2026 Aceptado: 03-jun-2026 e-ISSN 2954-4890

Sección: *Hot Science*

Cuando la pared celular lucha: el papel de los xiloglucanos durante la micorrización arbuscular

When the cell wall fights: the role of xyloglucans during arbuscular mycorrhization

*Luis Gerardo Sarmiento-López[1,2]**
Melina López-Meyer[2]
Mariana Esther Cesario-Solis[1]

[1]Unidad de Investigación en Ambiente y Salud, Universidad Autónoma de Occidente, Unidad Regional Los Mochis, Los Mochis, Sinaloa, México.
[2]Departamento de Biotecnología Agrícola, Instituto Politécnico Nacional. Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional, Unidad Sinaloa, Guasave, Sinaloa, México.

**Autor para la correspondencia: luis.sarmiento@uadeo.mx*

RESUMEN

Las plantas enfrentan múltiples tipos de estrés ambiental que limitan su desarrollo y crecimiento. La pared celular vegetal es una estructura dinámica que actúa como barrera protectora. Entre sus componentes sobresalen los xiloglucanos, polisacáridos que interactúan con la celulosa y regulan la flexibilidad de los tejidos. La micorrización arbuscular es una asociación simbiótica que mejora la nutrición de la planta y puede regular su interacción con otros microorganismos activando genes que modifican la pared vegetal, permitiéndole resistir a patógenos. Conocer cómo se desarrollan estos procesos facilitará el diseño de estrategias sostenibles para mejorar la resiliencia de los cultivos agrícolas.

Palabras clave: Pared celular, micorriza arbuscular y xiloglucanos.

SUMMARY

Plants are exposed to diverse environmental stresses that limit growth and development. The plant cell wall, a dynamic and complex structure, serves as a critical protective barrier. Xyloglucans, key polysaccharide components, interact with cellulose to modulate cell wall flexibility and tissue mechanics. Arbuscular mycorrhizal symbiosis enhances nutrient acquisition and can influence interactions with other microorganisms by activating genes involved in cell wall remodeling, thereby increasing pathogen resistance. Understanding the molecular and physiological mechanisms underlying these processes is crucial for designing sustainable strategies to enhance crop resilience and productivity under challenging environmental conditions.

Keywords: Cell wall, arbuscular mycorrhizal, xyloglucans.

Licenciamiento bajo el cual se publican los contenidos: CC BY-NC-ND 4.0

Introducción

Las plantas, desde que colonizaron los ambientes terrestres, han enfrentado condiciones ambientales adversas, como temperaturas extremas, estrés hídrico y salino, ataques por patógenos, entre otras condiciones. En tiempos recientes, estas problemáticas se han intensificado a nivel mundial y representan un reto importante para la agricultura. Las plantas suelen estar expuestas simultáneamente a diferentes tipos de estrés, cuya respuesta difiere de la provocada por factores individuales. Uno de los organelos más afectados por el estrés es la pared celular y su daño extremo puede conducir a la muerte de la planta. Además de proporcionar soporte estructural, la pared celular funciona como una barrera dinámica y como un sistema de percepción durante la interacción con microorganismos del suelo, tanto benéficos como patógenos. Algunos microorganismos benéficos, como los hongos micorrízicos arbusculares, inducen modificaciones en la pared celular para establecer procesos de colonización, lo que ha llevado a las plantas a desarrollar mecanismos de regulación asociados con la biosíntesis y remodelación de sus componentes estructurales. Entre estos componentes destacan los xiloglucanos (XyG), hemicelulosas fundamentales para la organización y plasticidad de la pared celular primaria.

El avance de las tecnologías bioinformáticas ha permitido profundizar en el estudio de los cambios asociados con la biosíntesis y remodelación de los XyG, tanto para contrarrestar los efectos de los diferentes tipos de estrés ambiental, como para responder a los microorganismos con los que interacciona. Este conocimiento puede contribuir a reducir los problemas ecológicos, ambientales y económicos asociados al estrés abiótico y biótico en la agricultura moderna.

La pared celular, una estructura estratégica de defensa

La pared celular vegetal es una estructura formada por cadenas de polímeros y algunas proteínas. Su función es dar forma a la célula y actuar como una estructura rígida que resista la presión interna y mantenga su firmeza. Esta pared está compuesta por tres materiales principales: la celulosa, la hemicelulosa y la pectina, cada uno aportando características y funciones únicas [1] (Fig. 1).

Aunque todas las plantas del planeta pertenecen al mismo reino, la composición y estructura de sus paredes celulares presentan variaciones entre especies. Estas diferencias no solo se observan a nivel del organismo completo, sino también entre distintos tejidos y tipos celulares dentro de una misma planta, lo que evidencia que la composición de la pared celular es dinámica y altamente especializada.

La *celulosa* es el componente más abundante de la pared celular y el que le confiere rigidez y resistencia a la planta. La celulosa es una cadena formada por muchas unidades de azúcar glucosa, lo que da lugar a fibras muy fuertes. Gracias a que la celulosa puede combinarse con otros componentes como la hemicelulosa y la pectina (Fig. 1), la pared celular representa una barrera contra el ataque de microorganismos que pueden causar enfermedades. Las células vegetales se mantienen unidas gracias a las *pectinas*, polisacáridos complejos ricos en ácido galacturónico y otros azúcares ramificados, cuya alta capacidad de retención de agua contribuye a la plasticidad y porosidad de la pared celular. Estas moléculas forman una capa delgada denominada lámina media, la cual actúa como un "*pegamento*" que mantiene adheridas a las células vegetales entre sí. La *hemicelulosa* también está formada por cadenas de azúcares que se unen a la celulosa y ayudan a organizar la pared celular, regulando la interacción entre ambos componentes. En una gran variedad de plantas, principalmente dicotiledóneas, la hemicelulosa más común es el XyG [2] (Fig. 1).

Las células vegetales pueden generar

Licenciamiento bajo el cual se publican los contenidos: CC BY-NC-ND 4.0

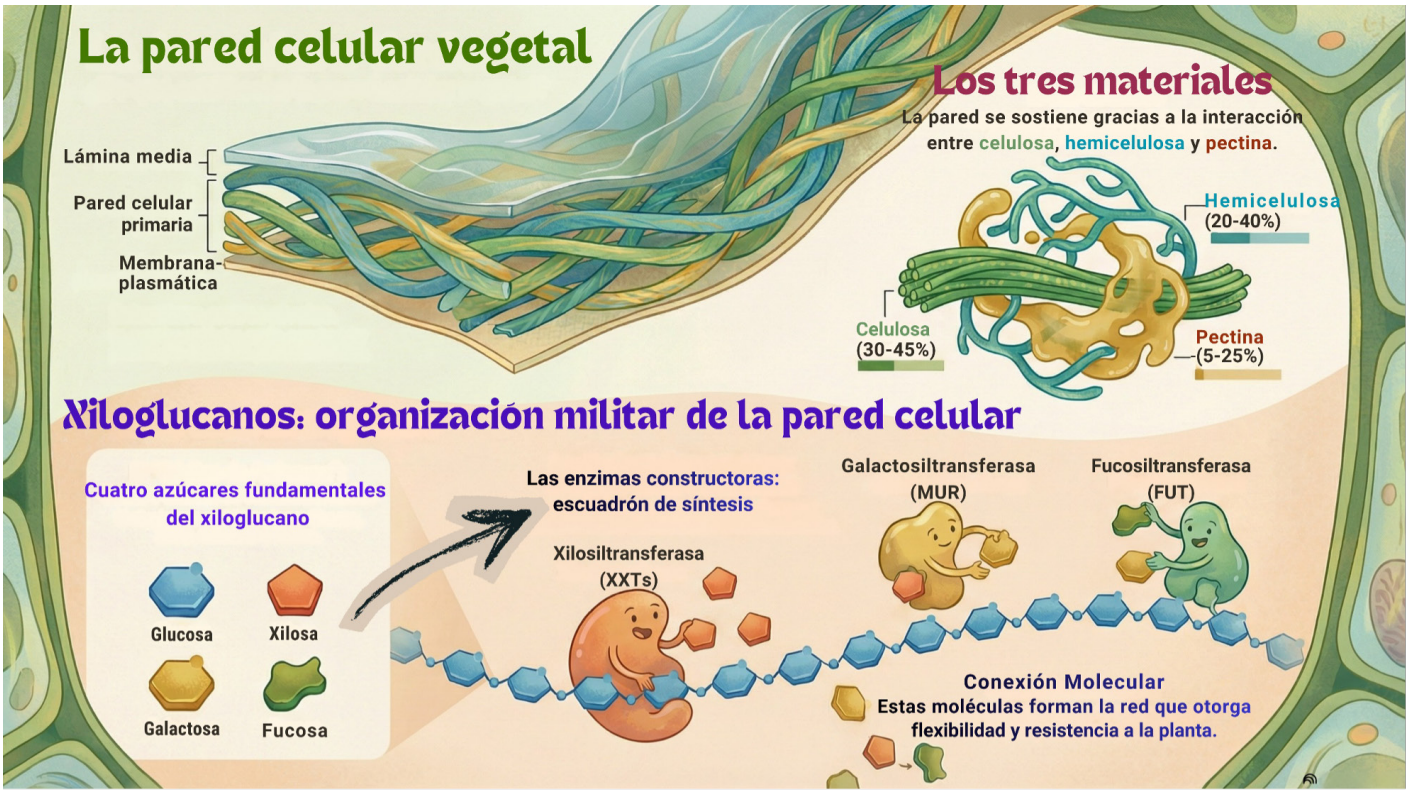


Figura 1. *Estructura de una pared celular primaria y la composición química de sus componentes principales. En la sección inferior se ilustra la composición fundamental de azúcares del xiloglucano y la acción de enzimas biosintéticas como xilosiltransferasas (XXTs), galactosiltransferasas (MUR) y fucosiltransferasas (FUTs), responsables de la incorporación de xilosa, galactosa y fucosa a la cadena lateral de glucosa.*

dos tipos principales de pared celular: la pared primaria y la pared secundaria. La pared primaria se encuentra en células jóvenes en crecimiento y se caracteriza por ser relativamente flexible, debido a su composición rica en celulosa, hemicelulosas y pectinas. Mientras la celulosa proporciona soporte estructural, las hemicelulosas contribuyen a la organización de las microfibrillas y las pectinas aportan plasticidad, hidratación y adhesión entre células. En contraste, la pared secundaria se deposita en células más maduras o especializadas, como las del colénquima y esclerénquima, donde se requiere una mayor resistencia mecánica. Aunque estas paredes también contienen celulosa y hemicelulosas, presentan una menor proporción de pectinas y un alto contenido de lignina, polímero que les confiere rigidez y resistencia adicional [2,3].

Gracias a esta composición y capacidad de reorganización, la pared celular vegetal no es una estructura estática, sino una barrera dinámica capaz de responder a diferentes condiciones ambientales. Las modificaciones en sus componentes permiten a las plantas mantener la integridad de sus tejidos y adaptarse frente a condiciones adversas, como el estrés ambiental o el ataque de microorganismos patógenos.

Los xiloglucanos: el escudo flexible de las plantas

Los xiloglucanos (XyG) son uno de los componentes fundamentales de la pared celular. Constituyen el esqueleto químico principal de la hemicelulosa en la mayoría de las plantas terrestres, excepto en las gramíneas. Estas moléculas están formadas principalmente por

Licenciamiento bajo el cual se publican los contenidos: CC BY-NC-ND 4.0

cadenas de glucosa decoradas con otros azúcares, como xilosa, galactosa y fucosa, que se combinan de distintas maneras (Fig. 1). En las células jóvenes en crecimiento, los XyG son muy abundantes. Estas moléculas tienen la capacidad de unirse a la celulosa para formar una red que fortalece la pared celular, confiriéndole, a la vez, flexibilidad y resistencia. De manera sencilla, la "misión" de los XyG es ayudar a mantener protegida y estable la estructura de la planta mientras esta crece o enfrenta condiciones adversas.

Aunque todos los XyG parten de una estructura básica formada por azúcares, su composición puede variar considerablemente dependiendo de la especie vegetal, el tipo de tejido o las condiciones ambientales a las que esté expuesta la planta. Estas variaciones generan distintos tipos de XyG, cada uno con propiedades particulares que contribuyen a la capacidad adaptativa de la pared celular frente a estímulos como la sequía, la salinidad, los cambios químicos del suelo o el ataque de microorganismos patógenos[3] (Fig. 1).

De manera simbólica, esta diversidad puede imaginarse como un "ejército de azúcares a medida", donde cada combinación de XyG representa un tipo distinto de soldado preparado para responder a un problema específico. Dependiendo de la amenaza, la planta puede "equipar" a estos soldados con diferentes combinaciones de azúcares para reforzar ciertas zonas de la pared celular y ayudar a aliviar el estrés.

En esta "organización militar", la planta cuenta con elementos equivalentes a oficiales o estrategas, representados por diversas enzimas encargadas de sintetizar, modificar y reorganizar los XyG. Estas enzimas trabajan principalmente, en el "aparato de Golgi", un organelo celular que funciona como un centro de ensamblaje y distribución del "ejército biológico". A diferencia de la celulosa que es ensamblada en la membrana plasmática, los XyG ya "armados" son transportados hacia regiones específicas de la pared celular, como soldados rasos desplegados hacia la primera línea de defensa, donde participan activamente en el mantenimiento de la estructura y en la respuesta frente a condiciones ambientales adversas.

La micorrización: una alianza que remodela la pared celular

Sin embargo, las modificaciones de la pared celular también ocurren en respuesta a interacciones de la planta con microorganismos benéficos, como los hongos micorrízicos arbusculares (HMA). La micorriza arbuscular es una relación simbiótica entre plantas y algunos hongos del suelo pertenecientes al filo *Mucoromycota* subfilo *Glomeromycotina*. En esta alianza, ambos socios se benefician: el hongo aporta a la planta agua y nutrientes, especialmente fósforo que toma del suelo, y la planta abastece al hongo de "alimento" en forma de azúcares y lípidos para su crecimiento y desarrollo. Esta relación benéfica se da en el 80 % de las plantas terrestres y ha sido clave para su supervivencia y adaptación a diferentes ambientes a lo largo de la evolución.

En esta asociación, el hongo invade la raíz de la planta, de tal manera que parte del hongo se encuentra en el suelo, y otra parte dentro de la raíz. Para que la simbiosis se establezca, el hongo debe penetrar la raíz y dirigirse hasta el interior de algunas células, formando una estructura similar a un arbusto, llamada arbúsculo (Fig. 2). En estas estructuras la membrana periarbuscular funciona como sitio de intercambio, donde el hongo entrega agua y nutrientes a la planta, y la planta transfiere compuestos energéticos al hongo. Para permitir la formación de los arbúsculos, la pared celular vegetal debe reorganizarse y volverse más flexible, permitiendo alojar al hongo sin que la célula pierda su integridad.

Esta asociación, mejora la nutrición de la

Licenciamiento bajo el cual se publican los contenidos: CC BY-NC-ND 4.0

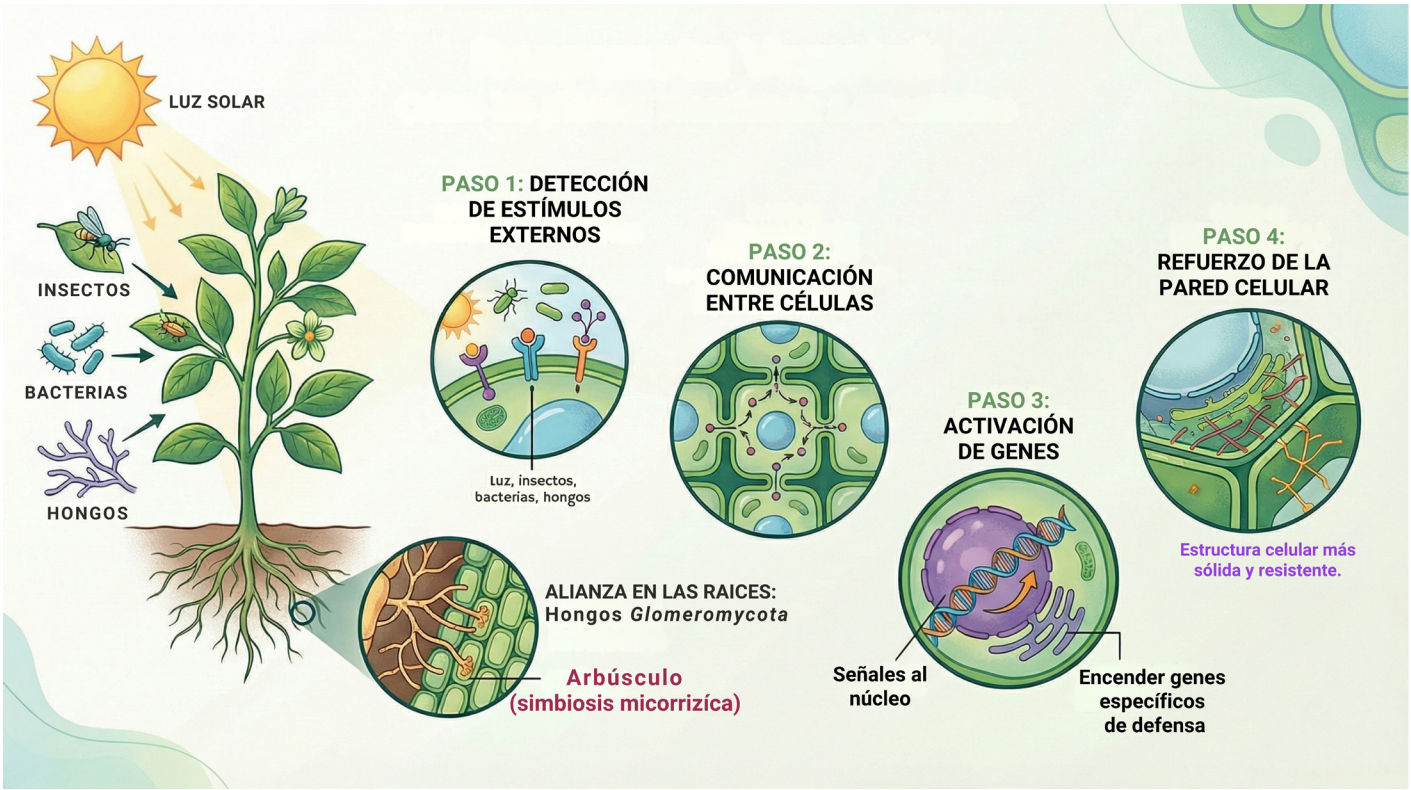


Figura 2. *Representación esquemática del proceso de señalización molecular en plantas por estímulos ambientales (luz, bacterias, insectos y hongos), destacando la interacción con hongos micorrízicos arbusculares en la raíz y la formación de arbúsculos conduciendo al refuerzo de la pared celular vegetal.*

planta, ya que el hongo capta nutrientes y agua del suelo y los transporta hasta los arbúsculos para que sean transferidos directamente a las células vegetales. Cuando el HMA es reconocido como un organismo benéfico, se generan señales celulares que viajan hasta el núcleo y activan genes específicos relacionados con la reorganización de la pared celular, el transporte de nutrientes y la adaptación al estrés (Fig. 2). Como resultado, la pared celular puede reforzarse, volverse más flexible o reorganizarse según las necesidades de la planta, preparándola para responder de manera más eficiente a diferentes condiciones ambientales.

El caso del tomate: un ejército especializado en las defensas celulares

Estudios en diversas plantas sugieren que, además de mejorar su nutrición, las plantas en simbiosis micorrízica son menos vulnerables al ataque de microorganismos patógenos. La simbiosis micorrízica funciona como un sistema de alerta que prepara a la planta para defenderse ante patógenos y situaciones de estrés. Siguiendo la analogía militar, la micorriza arbuscular puede entenderse como un líder estratégico que coordina las defensas de la planta. Aunque no combate directamente, envía señales que alertan a las células y permiten reorganizar a los "soldados" de la pared celular, como los XyG, para fortalecer las defensas antes de que ocurra un ataque.

Cuando este sistema de alerta se activa, la planta pone en marcha un "*equipo especializado*" encargado de remodelar y reforzar la pared celular. Dentro de este equipo se encuentran las expansinas (EXPA), conocidas como "*las flexibilizadoras*", que ayudan a relajar la pared celular; las xiloglucano endotransglucosidasa/hidrolasa (XTH), llamadas "*las*

Licenciamiento bajo el cual se publican los contenidos: CC BY-NC-ND 4.0

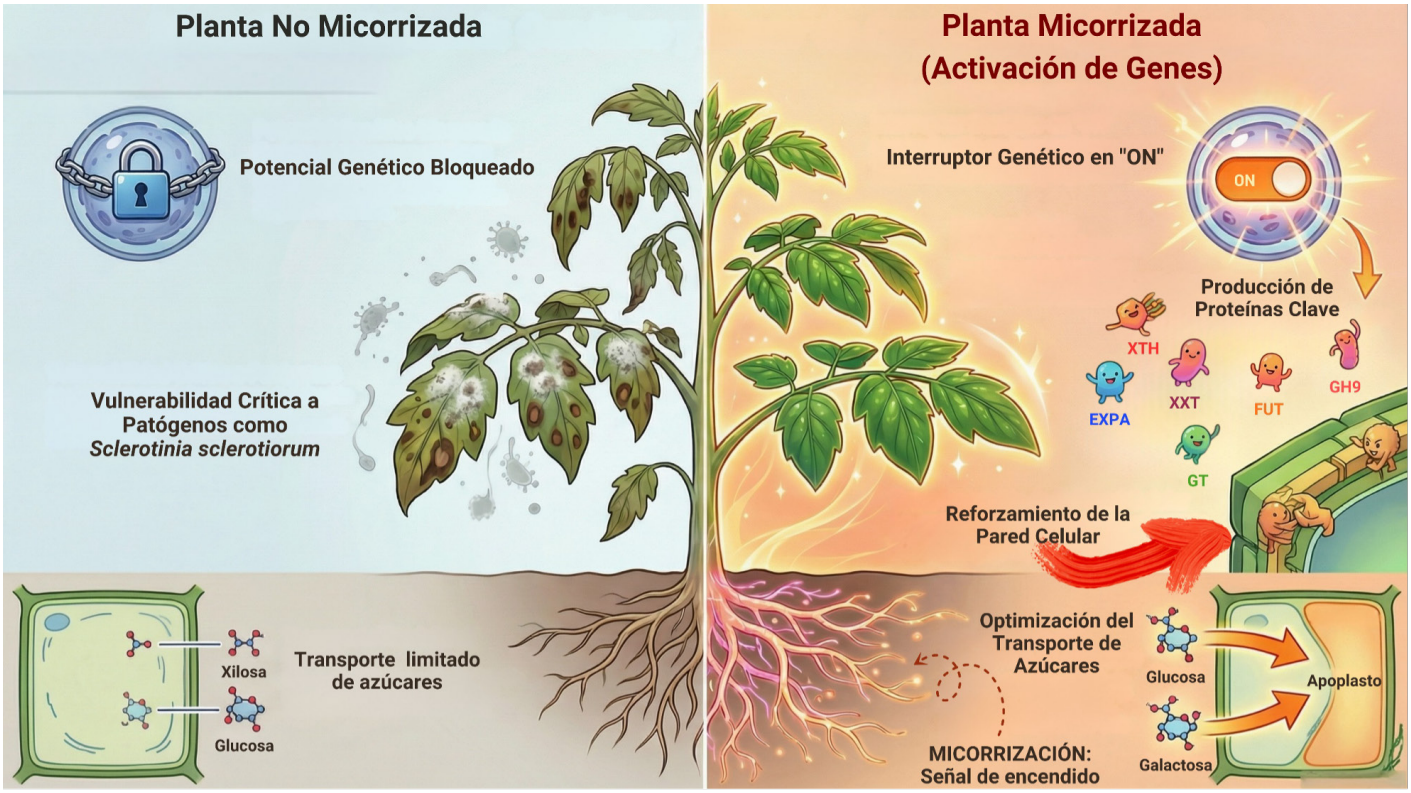


Figura 3. *Modelo hipotético del mecanismo de la señalización celular y de la inducción transcripcional asociada a la remodelación de la pared celular por micorrización. En la figura se representa la inducción de la expresión génica y la activación de enzimas remodeladoras de la pared celular (EXPA, XTH, XXT, GH9, FUT y GT), asociadas a cambios en los componentes de la pared celular (celulosa, hemicelulosa y pectina) y en la composición de azúcares (glucosa, xilosa, galactosa). Abreviaciones: XTH; xiloglucano endotransglucosidasa/hidrolasa, EXPA; expansina XXT; Xilosiltransferasas, GH9; glicosil hidrolasas de la familia 9, FUT; fucosiltransferasas y GT; galactosiltransferasas.*

cortapega", que cortan y reorganizan las cadenas de XyG; y las xilosiltransferasas (XXT), fucosiltransferasas (FUT) y galactosiltransferasas (GT), que funcionan como "*las constructoras*", ya que ensamblan nuevos componentes de azúcares (xilosa, fucosa o galactosa) para fortalecer la pared celular (Fig. 3).

Por ejemplo, en el tomate, han sido detectadas modificaciones en las cadenas de azúcares que forman los XyG gracias a la acción de este equipo especializado[4,5]. Como resultado, en plantas micorrizadas, las cadenas de azúcares que forman parte de la pared celular vegetal se reorganizan y fortalecen, dificultando que los patógenos invadan e infecten la planta. En contraste, las plantas que no establecen asociaciones micorrízicas no presentan estos cambios estructurales y, por lo tanto, carecen de este mecanismo adicional de protección (Fig. 3).

En conclusión, la micorrización no solo favorece una mejor nutrición y el crecimiento de las plantas, sino que también induce cambios estructurales que las ayudan a sobrevivir ante situaciones de estrés. La cooperación entre la planta y el hongo activa mecanismos de defensa, reorganiza a los "soldados" de la pared celular y prepara a la planta para enfrentar los desafíos de su entorno. Gracias a esta colaboración, las plantas responden de manera más eficiente al ataque de patógenos y a condiciones ambientales adversas. Comprender cómo funcionan estos mecanismos naturales de cooperación y defensa es fundamental para el desarrollo de una agricultura más sostenible.

Licenciamiento bajo el cual se publican los contenidos: CC BY-NC-ND 4.0

Referencias

[1] Cosgrove, D. J. (2022). Building an extensible cell wall. *Plant Physiology*, 189, 1246-1277. DOI: 10.1093/plphys/kiac184.

[2] Tenhaken, R. (2015). Cell wall remodeling under abiotic stress. *Frontiers in Plant Science*, 5, 1-9. DOI: 10.3389/fpls.2014.00771.

[3] Pauly, M., & Keegstra, K. (2016). Biosynthesis of the plant cell wall matrix polysaccharide xyloglucan. *Annual Review of Plant Biology*, 67, 235–259. DOI: 10.1146/annurev-arplant-043015-112222.

[4] Sarmiento-López, L. G., López-Espinoza, M. Y., Juárez-Verdayes, M. A., & López-Meyer, M. (2023). Genome-wide characterization of the xyloglucan endotransglucosylase/hydrolase gene family in Solanum lycopersicum L. and gene expression analysis in response to arbuscular mycorrhizal symbiosis. *PeerJ*, 11, e15257. DOI: 10.7717/peerj.15257.

[5] Bojórquez-Armenta, Y. d. J., Sarmiento-López, L. G., Pozo, M. J., Castro-Martínez, C., & López-Meyer, M. (2025). Characterization of endoglucanase (GH9) gene family in tomato and its expression in response to Rhizophagus irregularis and Sclerotinia sclerotiorum. *Plants*, 14(22), 3458. https://doi.org/10.3390/plants14223458

Licenciamiento bajo el cual se publican los contenidos: CC BY-NC-ND 4.0

Recibido: 06-feb-2026 Aceptado: 02-may-2026 e-ISSN 2954-4890

Sección: *Hot Science*

Neuropéptidos de mosquito: controlando la fisiología de un vector de enfermedades mortales

Mosquito neuropeptides: controlling the physiology of a deadly disease vector

Karla Karina Guzmán-Rabadán
*Salvador Hernández-Martínez**

Centro de investigaciones sobre enfermedades infecciosas, Instituto Nacional de Salud Pública, Morelos, México.

**Autor para la correspondencia: shernand@insp.mx*

RESUMEN

El mosquito *Aedes aegypti* es el principal vector global de dengue, zika y chikungunya. Históricamente, su control se ha basado en el uso de insecticidas; sin embargo, estos han generado resistencia en ellos, y daños ambientales. Ante esto, el Instituto Nacional de Salud Pública (INSP) investiga alternativas ecológicas. Este artículo describe una propuesta innovadora de control basada en el uso de allatotropina (AT), un neuropéptido presente en muchos insectos, pero de secuencia de aminoácidos específica en mosquitos. El objetivo es incrementar la concentración de AT con una sintética, para desestabilizar su fisiología sin afectar el ambiente ni la salud humana.

Palabras clave: Neuropéptido, disruptor endocrino, Aedes aegypti.

SUMMARY

Aedes aegypti mosquito is the primary global vector of dengue, Zika and chikungunya. Historically, its control has relied on use of insecticides; however, these have led to resistance in the mosquitoes and ecological damage. In light of this, National Institute of Public Health (INSP) is investigating ecological alternatives. This article describes an innovative control proposal based on the use of allatotropin (AT), a neuropeptide naturally found in many insects, but with specific amino acid sequence in mosquitoes. The aim is to increase the concentration of AT with a synthetic, to destabilize its physiology without affecting the environment or human health.

Keywords: Neuropeptide, endocrine disruptor, Aedes aegypti.

Licenciamiento bajo el cual se publican los contenidos: CC BY-NC-ND 4.0

Introducción: un enemigo de 400 millones de años

Aunque muy molestos, no todos los mosquitos que zumban cerca de tu casa y te pican pueden enfermarte, de hecho, existen 3,500 especies y solo unas cuantas representan un peligro. En México, y la mayor parte del mundo, los principales responsables de transmitir enfermedades como el dengue, zika, chikungunya y fiebre amarilla son las especies *Ae. aegypti* y *Ae. albopictus*.

Según cifras de la Organización Mundial de la Salud (2024), el problema es alarmante, se estima que tan solo por dengue hay entre 100 y 400 millones de infecciones anuales a nivel mundial. En México, en 2024 se registraron cerca de 121,000 casos de dengue, de los cuales hubo 362 defunciones. Este diminuto insecto es, sin duda, un problema gigante en la salud pública.

Los mosquitos han habitado la Tierra desde hace 400 millones de años, por lo que su presencia no es nueva. Ae. aegypti llegó a las costas americanas a finales de siglo XV, probablemente como "polizón" en los barcos de los navegantes europeos. Desde entonces, se adaptó perfectamente a las costumbres humanas, convirtiéndose en vector de enfermedades en el Golfo y el Pacífico. En México los primeros registros de epidemias de fiebre amarilla causada por *Ae. aegypti* son de 1648 [1].

El reto: cuando los métodos de control convencionales ya no son eficientes

Durante décadas, la estrategia principal para el control de estos insectos ha sido el uso de insecticidas mediante campañas de fumigación, no obstante, estas sustancias químicas ha generado mosquitos resistentes y daños colaterales como contaminación ambiental, afectaciones a la salud humana y a otros animales [2].

Por ello, actualmente la ciencia busca alternativas como la liberación de machos estériles, mosquitos modificados genéticamente, la infección de éstos con la bacteria *Wolbachia*, desarrollo de vacunas, entre otras. En el INSP, una de las líneas de investigación se centra en algo distinto y fascinante: el estudio de un neuropéptido, la allatotropina (AT, mensajero químico producido en el cerebro y cordón nervioso ventral (CNV) de los mosquitos). El objetivo es identificar un compuesto propio del mosquito factible de ser utilizado en su contra; es decir, darle al mosquito "una cucharada de su propia medicina".

La bilogía detrás del "piquete"

Si se pretende controlar biológicamente a los mosquitos, es importante conocer su biología. *Ae. aegypti* es una especie doméstica debido a su estrecho vínculo con los asentamientos humanos, tanto en entornos urbanos como rurales [3].

Tiene capacidad para colonizar debido a que se reproduce en recipientes artificiales que contenga agua, como jarrones, floreros, llantas, tanques, botes etc. Además, recipientes naturales como huecos de árboles, charcos y terrenos inundables, axilas de plantas (ángulo entre la parte superior del tallo y una hoja), entre otras, también funcionan como sitios de reproducción. Tienen preferencia por recipientes de boca ancha en tonalidades oscuras y que estén a la sombra. La presencia de mosquitos es un indicador de que en las cercanías se están reproduciendo, esto debido a que no se alejan grandes distancias del lugar en donde nacieron.

Si bien ambos sexos se alimentan de néctar de frutos, las hembras requieren de una fuente rica en proteínas (sangre) para que sus huevos maduren, y por tanto puedan reprodu-

Licenciamiento bajo el cual se publican los contenidos: CC BY-NC-ND 4.0

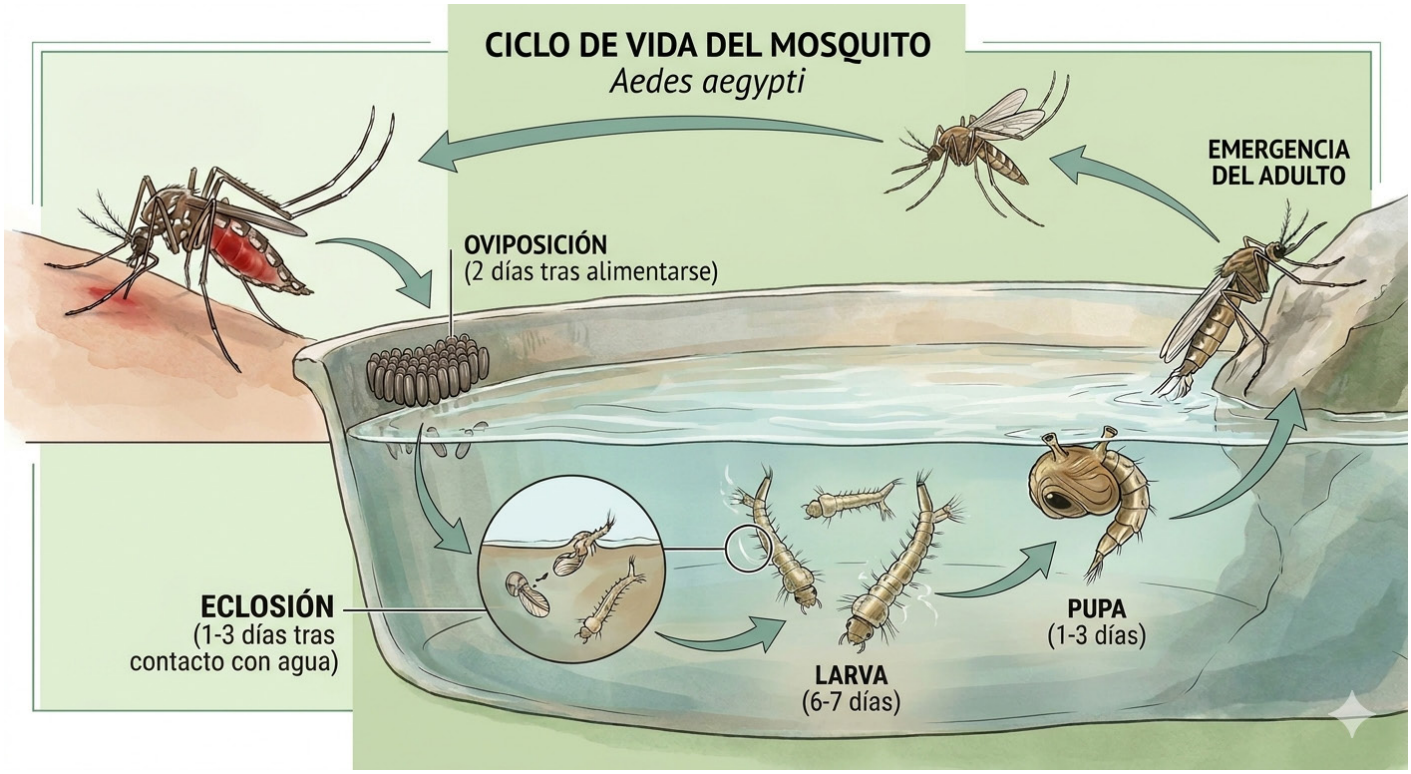


Figura 1. *Ciclo de vida del mosquito Aedes aegypti. Tras alimentarse de sangre, la hembra deposita sus huevos, los cuales eclosionan entre 1 y 3 días después de tener contacto con el agua. El ciclo continúa con la fase de larva (6 a 7 días) y la pupa (1 a 3 días), hasta la emergencia del adulto, cuya esperanza de vida es de aproximadamente un mes. Ilustración creada con apoyo de IA.*

cirse, es decir, solo ellas pican.

Las hembras mosquito son expertas rastreadoras, localizan a su presa mediante el CO_2 que exhala, calor y olor corporal. Ovipone entre 50 a 150 huevos, los cuales parecen semillas diminutas, al principio son blancos y blandos y al cabo de unas horas se tornan negros.

Los huevos de los mosquitos *Ae. aegypti* son sorprendentemente resistentes; pueden mantenerse viables hasta por un año, en condiciones de sequía esperando a que el agua los "despierte". Una vez que eclosionan, emerge una larva, la cual presenta 4 estadios de desarrollo que en total duran de 5 a 7 días. Posteriormente, se transforman a pupa (la cual dura aproximadamente 2 días), en esta fase ya no se alimenta y sufre cambios muy drásticos (metamorfosis) para pasar de estadío acuático a uno aéreo, que es cuando emergen de la pupa, entonces su exoesqueleto es blando y no pueden volar, hasta transcurridos unos minutos (Figura 1) [3].

¿Qué se hace en el laboratorio de fisiología de vectores?: Estudio de la allatotropina como candidato para el control de mosquitos

Los mosquitos sintetizan neuropéptidos que actúan como hormonas clásicas, neurotransmisores (sustancias químicas producidas por el cerebro que actúan como mensajeros, transmitiendo información entre las neuronas) y como neuromoduladores (regulan la actividad neuronal). Estas sustancias son distribuidas a todo el cuerpo del mosquito a través del sistema nervioso y son responsables de un sin número de respuestas fisiológicas controlando así todas sus funciones vitales [4]. Uno de estos neuropéptidos es la AT.

Licenciamiento bajo el cual se publican los contenidos: CC BY-NC-ND 4.0

La AT es esencial en la vida de los insectos, como los mosquitos porque regula positivamente la producción de hormona juvenil, la cual es responsable de que tengan un progreso normal del desarrollo y reproducción. Sin embargo, la AT también modula el ritmo cardiaco [5] (si, ¡los mosquitos tienen corazón!), ayuda en la absorción de los nutrientes [6], regula las contracciones del oviducto (encargado de transportar los óvulos maduros desde los ovarios al exterior) e intestino posterior, y recientemente se descubrió que este neuropéptido está involucrado en la modulación de la respuesta inmunitaria del mosquito (humoral y celular). [7]. Por lo tanto, cualquier desregulación en este, alteraría dramáticamente la fisiología del mosquito.

¿Es posible utilizar moléculas propias del mosquito para su control?

En el laboratorio de fisiología de vectores del departamento de infección e inmunidad, CISEI-INSP (Centro de Investigación Sobre Enfermedades Infecciosas, Instituto Nacional de Salud Pública) uno de los proyectos está enfocado en determinar el potencial de la AT como candidato a disruptor endocrino mediante la evaluación de su efecto en la sobrevivencia, reproducción y respuesta inmune del mosquito *Ae. aegypti*.

La estrategia general contempla ensayos de "ganancia de función" (Figura 2), que consiste en sobre activar los receptores celulares para la AT mediante la inyección de péptidos nativos (sintetizado artificialmente con estructura química idéntica a la AT producida por los mosquitos) y miméticos (modificados químicamente en sus enlaces para hacerlos más estables ante las proteasas, tijeras químicas que rompen los enlaces moleculares).

El objetivo es identificar el péptido mimético que produzca algún efecto en su tasa de supervivencia, disminuir su capacidad reproductiva (lograr que pongan menos huevos o que estos no nazcan) y/o desequilibrar su respuesta inmunológica (sobre-estimulando sus mecanismos de defensa, llevándolos a un

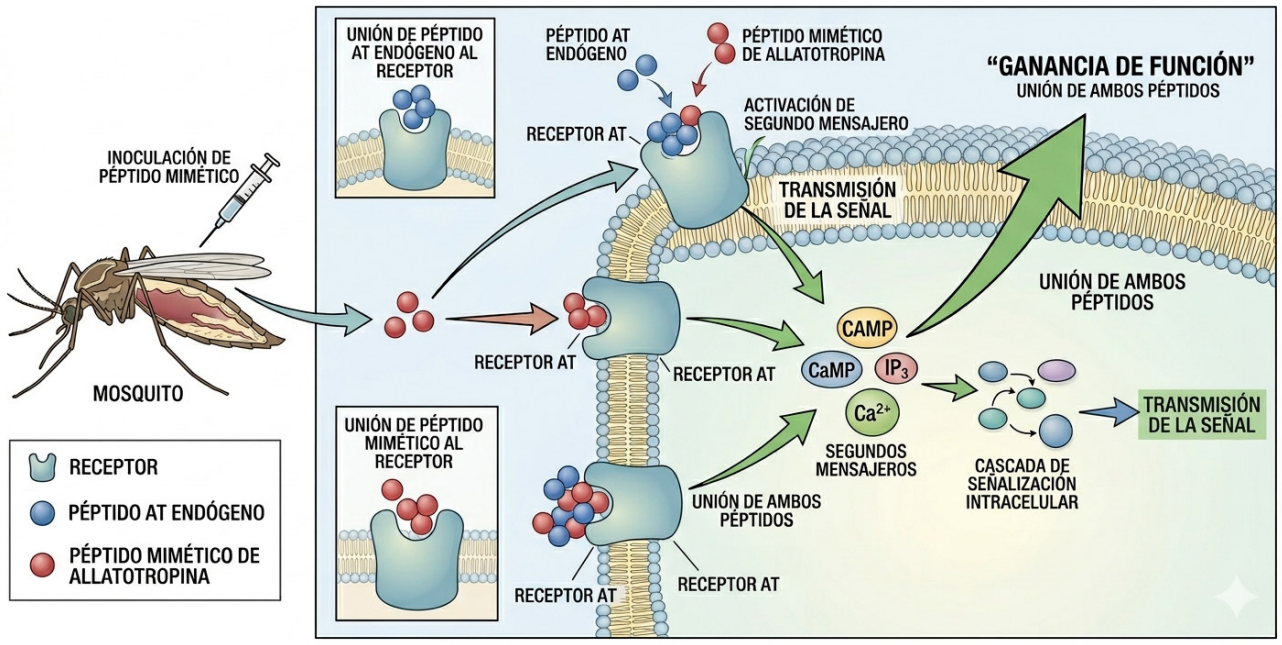


Figura 2. *Mecanismo de acción de la allatotropina a nivel celular. El péptido mimético es inoculado al mosquito y éste se une a receptores de AT al igual que lo hace el péptido AT de origen natural producido en el cuerpo del mosquito ("ganancia de función"), una vez realizada esta unión se da pie a la activación de un segundo mensajero y finalmente la transmisión de la señal. Ilustración creada con apoyo de IA.*

Licenciamiento bajo el cual se publican los contenidos: CC BY-NC-ND 4.0

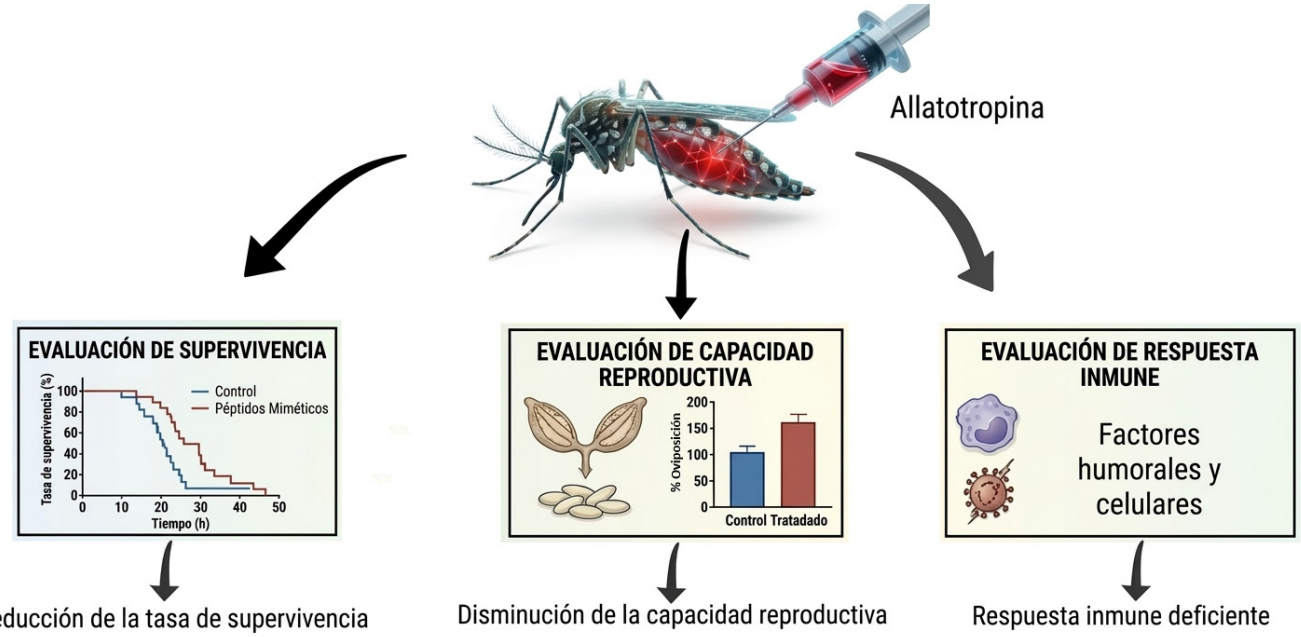


Figura 3. *Esquema de acción de los péptidos miméticos y nativos. Los neuropéptidos son inoculados y posteriormente es evaluada la supervivencia, capacidad reproductiva y respuesta inmune en hembras Aedes aegypti. Ilustración creada con apoyo de IA.*

estado de agotamiento funcional o disfunción metabólica), para que ese péptido sea en un futuro utilizado como un posible agente de control de Ae. aegypti. Inicialmente, las evaluaciones se han realizado mediante inyección directa al abdomen del mosquito, en donde circula libremente la hemolinfa (fluido que circula en el cuerpo del mosquito que cumple funciones análogas a la sangre y la linfa en vertebrados) (Figura 3).

Los resultados han sido muy alentadores, ya que al duplicar la concentración de la AT (sumando la presente en el mosquito y la inoculada) en un momento específico de la etapa adulta, la supervivencia disminuyó en un 80% a los 10 días post-inyección. Respecto a la reproducción, aunque no se observaron cambios en el porcentaje de huevos puestos con ningún tratamiento, el porcentaje de eclosión disminuyó hasta un 48% de las hembras inyectadas con los miméticos, ambos datos comparados con los grupos testigo. Estos resultados indican que un desbalance en la concentración de AT afecta la supervivencia de las hembras así como su reproducción.

Lo anterior confirma que hasta el momento uno de los neuropéptidos miméticos evaluados podría ser un candidato potencial para el control de mosquitos.

Limitaciones y desafíos: Del laboratorio a la naturaleza

A pesar del éxito en los matraces, el camino hacia la utilización de una molécula orgánica propia del mosquito tiene sus retos. El mayor desafío es elaborar e identificar el péptido mimético “ideal”, uno que sea lo suficientemente estable para resistir las condiciones del ambiente como la exposición al sol, la lluvia, cambios de humedad, sin perder su efectividad. Otro reto, es dispersarlo en el ambiente donde se desarrollan los mosquitos, para que lo incorporen a su cuerpo.

Independientemente del desarrollo de un compuesto amigable con el medio, a partir de la AT o de algún otro neuropéptido, todo el estudio que se realiza en este trabajo de investigación es un aporte importante en el campo

Licenciamiento bajo el cual se publican los contenidos: CC BY-NC-ND 4.0

de la neuroendocrinología de los insectos vectores de enfermedades.

Conclusiones: una nueva esperanza

Esta investigación aún está en sus primeras etapas, los resultados son favorables. La AT se perfila como un potencial candidato para utilizarlo como arma contra los mosquitos; una herramienta sustentable que no envenena el entorno, pero que si desequilibra la fisiología del mosquito limitando su dispersión.

Darle al mosquito "una cucharada de su propia medicina" no solo es un juego de palabras, es la base de una nueva generación de herramientas científicas para proteger la salud de millones de personas.

Referencias

[1] Adame Cerón M. Á., (2000). La conquista de México en la mundialización epidémica. [México]: Ediciones Taller Abierto.

[2] Saavedra-Rodriguez, K., Urdaneta-Marquez, L., Rajatileka, S., Moulton, M., Flores, A. E., Fernandez-Salas, I., Bisset, J., Rodriguez, M., McCall, P. J., Donnelly, M. J., Ranson, H., Hemingway, J., & Black, W. C., 4th (2007). A mutation in the voltage-gated sodium channel gene associated with pyrethroid resistance in Latin American *Aedes aegypti. Insect molecular biology*, 16(6), 785–798. https://doi.org/10.1111/j.1365-2583.2007.00774.x

[3] Carrada-Bravo , T., Vázquez-Vázquez , L., & López-García , I. . (2014). La ecología del dengue y el Aedes aegypti. Investigación preliminar. Tercera parte. Salud Pública De México, 26(3), 297-311. Recuperado a partir de https://saludpublica.mx/index.php/spm/article/view/542

[4] Predel, R., & Eckert, M. (2000). Neurosecretion: peptidergic systems in insects. *Die Naturwissenschaften*, 87(8), 343–350. https://doi.org/10.1007/s001140050737

[5] Hillyer J. F. (2018). Insect heart rhythmicity is modulated by evolutionarily conserved neuropeptides and neurotransmitters. *Current opinion in insect science*, 29, 41–48. https://doi.org/10.1016/j.cois.2018.06.002

[6] Hernández-Martínez, S., Mayoral, J. G., Li, Y., & Noriega, F. G. (2007). Role of juvenile hormone and allatotropin on nutrient allocation, ovarian development and survivorship in mosquitoes. *Journal of insect physiology*, 53(3), 230–234. https://doi.org/10.1016/j.jinsphys.2006.08.009

[7] Hernández-Martínez, S., Sánchez-Zavaleta, M., Brito, K., Herrera-Ortiz, A., Ons, S., & Noriega, F. G. (2017). Allatotropin: A pleiotropic neuropeptide that elicits mosquito immune responses. *PloS one*, 12(4), e0175759. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0175759

Licenciamiento bajo el cual se publican los contenidos: CC BY-NC-ND 4.0

Recibido: 27-dic-2024 Aceptado: 08-jun-2026 e-ISSN 2954-4890

Sección: *Hot Science*

Emerging nanoparticles as an alternative to agricultural pesticides

Nanopartículas emergentes como alternativa a los pesticidas

Luis Fernando Beltrán Villanueva[1]
Verónica Campos Ibarra[2]
Ravichandran Manisekaran[2]*

Interdisciplinary Research Laboratory (LII), [1]Ciencias Agrogenómicas, [2]Nanostructures & Biomaterials area, Escuela Nacional de Estudios Superiores (ENES) Unidad León-Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), C.P. 37689, León, Guanajuato, Mexico.

**Autor para la correspondencia: manisekaran@enes.unam.mx*

SUMMARY

Currently, the global population has surpassed 8.09 billion, increasing the demand for agricultural production worldwide. Producing healthy, sufficient, and high-quality food requires a series of practices, ranging from soil preparation to the protection of crops against plant pathogens. To meet these demands, chemical pesticides have been widely used; however, their application has led to soil and groundwater contamination, affecting both the microbial ecosystem and the quality of agricultural products. In this review, we explore the pesticidal properties of silver, copper, zinc, and titanium nanoparticles, as well as their limitations and practical applications.

Keywords: Nanoparticles, phytopathogens, pesticides.

RESUMEN

En la actualidad, la población mundial ha superado los 8.09 mil millones de personas, incrementando la demanda de producción agrícola mundial. La producción de alimentos sanos, suficientes y de calidad requiere procedimientos que abarcan desde la preparación de la tierra hasta la preservación de cultivos libres de patógenos vegetales. Para esto, se han utilizado productos químicos como plaguicidas, que han contaminado suelo y aguas subterráneas, afectando el ecosistema microbiano y la calidad de los productos agrícolas. En este artículo exploramos las propiedades plaguicidas de las nanopartículas de plata, cobre, zinc y titanio, así como sus limitaciones y aplicaciones prácticas.

Palabras clave: Nanopartículas, fitopatógenos, plaguicidas.

Licenciamiento bajo el cual se publican los contenidos: CC BY-NC-ND 4.0

Introducción

Agricultural revolution has shaped communities' ways of life by providing crops, seeds, and fruits for both humans and livestock. Currently, the challenge is to supply these products despite population growth, climate change, and soil and irrigation-water contamination. Thus, food security depends on sustainable agricultural practice. One of the major concerns in agriculture is pathogen infestation of crops, which induces annual losses of 40 billion dollars worldwide [1]. These plant pathogens (phytopathogens) infect diverse crops and are highly persistent in their attack. In contrast, the use of new technologies, such as nanotechnology, has been investigated, assessing the impact of nanoparticles used in agricultural production, particularly during plant-pathogens control [2]. In agriculture, nanoparticles offer sustained ion release kinetics, solubility efficiency, enhanced permeability, and stability, thereby increasing pathogen control efficacy over longer time intervals. Thus, the use of nanoparticles can minimize pesticide dosage to achieve increased efficacy. These features help produce more nutritious and healthy foods while keeping agricultural production free of plant pathogens.

Human-managed agricultural production systems for rice, wheat, barley, corn, soy, and crops from the *Solanaceae* family are widely used as the main commercial crops. However, these systems are highly vulnerable to phytopathogens and pests, as well as to unpredictable environmental conditions. Consequently, the global farming community has been affected, with losses of up to 40% of the total production (Figure 1) [3].

Common treatments for pathogens and plant pests include chemical pesticides, fungicides (chlorothalonil and metalaxil), herbicides (glyphosate and 2,4-dichlorophenoxyacetic acid), and arthropodal options such as malathion, which have been used against resistant pests. However, more frequent pesticide application increases water pollution in surface and/or underground soil, which jeopardizes freshwater availability and supply.

Biological and remedial applications of nanoparticles

Nanoparticles are tiny particles that are not visible to the naked eye and measure between 1 and 100 nm. Colloidal solutions (or materials containing nanoparticles) and their extraordinary characteristics in terms of optical, electronic, thermophysical, and mechanical properties have been studied [4]. Nanoparticles can be applied in different fields, such as in the agricultural sector, where they provide an innovative and novel approach to improving sustainable agricultural practices [5]. This field of science offers a wide range of applications, including but not limited to improving plant growth and development, improving crop production and quality, preventing plant diseases, and increasing plant adaptation to external stressors. The need to implement sustainable novel methodologies and achieve the highest level of crop productivity considers the avoidance of any form of pollution or harm to the agroecosystem in which these nanoparticles are utilized.

Nanoparticles against phytopathogens

Silver nanoparticles (AgNPs)

Silver is a chemical element well known for its antimicrobial properties and possesses distinctive characteristics that confer efficacy against pathogenic microorganisms. The use of these materials in plant pathogen research has yielded promising results. For example, chemically synthesized nanoparticles are 100% effective in inhibiting the growth of the fungal species *Corynespora casiicola* and *Alternaria solani*. Moreover, they demonstrated

Licenciamiento bajo el cual se publican los contenidos: CC BY-NC-ND 4.0

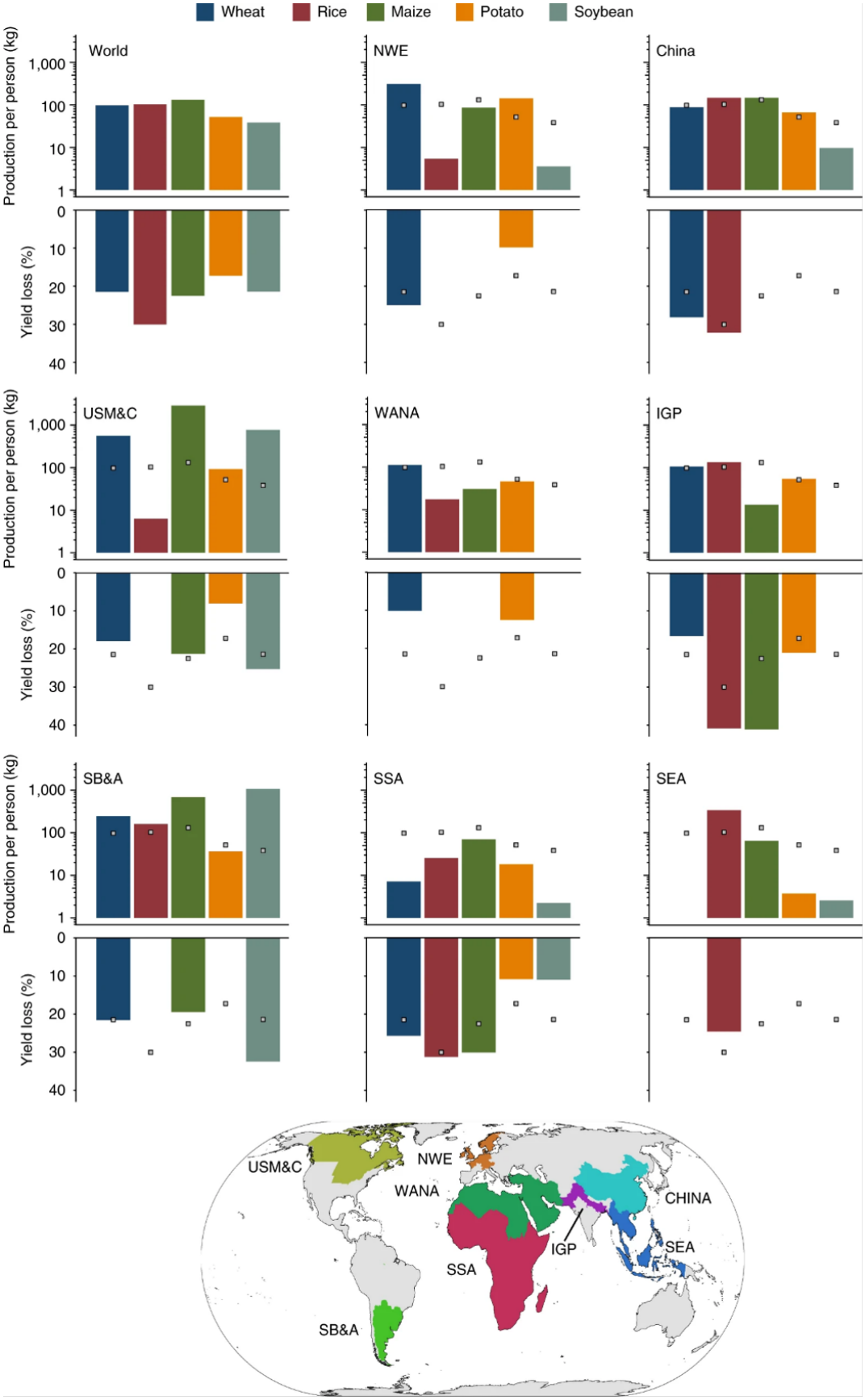


Figura 1. *An overview of the primary crops grown in various regions worldwide USM&C=US Midwest and Canada; SB&A=South Brazil, Paraguay, Uruguay, and Argentina; NWE=Northwest Europe; WANA=West Asia and North Africa; SSA=Sub-Saharan Africa; CHINA=Mainland China; IGP=Indo-Gangetic Plain; SEA=Southeast Asia [3].*

Licenciamiento bajo el cual se publican los contenidos: CC BY-NC-ND 4.0

85% efficacy against the fungal species, *Fusarium* spp. [6]. In contrast, green-synthesized nanoparticles exhibited a significant inhibitory effect of 90% against *C. casiicola*, an impressive effectiveness of 95% against *A. solani*, and 90% against *Fusarium* spp. The fabrication of AgNPs against fungal pathogens showed that the two types of nanoparticles exhibited varying degrees of effectiveness and provided valuable insights into their potential applications in the field of fungal control.

Titanium dioxide nanoparticles

Titanium dioxide nanoparticles have demonstrated antifungal properties against *Ustilago tritici*. These findings revealed that the nanoparticles were highly efficient in inhibiting fungal growth. This effect was observed using a solution of green-synthesized titanium oxide nanoparticles (0.1 mg/mL) with an average diameter of 15 nm. The combination of titanium atoms with oxygen has the potential to generate reactive oxygen species (ROS), which are highly reactive and toxic molecules capable of dismantling fungal membranes [7].

Copper nanoparticles (CuNPs)

Copper has been used by human civilization since the Bronze Age; however, its application in agro-biotechnology is relatively recent. Cu is an essential micronutrient for plants and is involved in several physiological functions and photosynthetic reactions, as it activates numerous enzymes [8]. The antifungal effect of CuNPs against plant pathogens has been explored by targeting *Curvularia lunata*, *Alternaria alternata*, *Fusarium oxysporum*, and *Phoma destructive*, with positive results. CuNPs have also been used as pesticidal agents to sustain efficiency in food production and to combat agricultural pathogens [9].

Zinc oxide nanoparticles (ZnONPs)

Zinc oxide nanoparticles possess exceptional antibacterial and antifungal properties and have been studied extensively. Previous studies have demonstrated the antifungal activity of ZnONPs against Fusarium oxysporum in tomato plants. It has been ascertained that pathogen inhibition of 81-83% requires a minimal concentration range of 1600–3000 ppm. The green synthesis of ZnONPs using Lantana camara leaf extract has been employed to enhance plant growth and antifungal activity of biosynthesized ZnONPs against *Diplodia seriata*, *Botryosphaeria dothidea*, and *Alicyclobacillus mali*, the major plant pathogens of apple orchards. In these cases, with 100 ppm of ZnONPs, fungal growth was inhibited by 76.7-55.2 % [10]. Therefore, this approach offers a vast array of prospects for exploring additional factors that provide remedies against plant pathogens of economic interest.

Table 1 describes a comparative analysis of diverse recently-reported nanoparticles that possess remarkable antifungal properties. This compilation demonstrates the efficacy of these nanoparticles in combating plant pathogens via an *in vitro* test, thus providing an interesting resource for both the general and specialized public.

Conclusions & Future perspectives

The maintenance of agroecosystems is a central issue in sustaining the global population. Nanotechnologies allow us to explore environmentally friendly alternatives to pathogen control, while remaining effective against aggressive pathogens, which, as we have seen, can diminish agricultural production. Nanoparticles have demonstrated antibacterial and antifungal activities at different concentrations, owing to their reactive properties, principally in vitro. Here, we showed that most nanoparticles exhibit an effective antimicrobial effect at 100 µg/mL, and even at the lower concentration reported of 37 µg/mL. However, additional information is still required for toxicity assessment. Although various nanoparticles are

Licenciamiento bajo el cual se publican los contenidos: CC BY-NC-ND 4.0

Tabla 1. *Description of commonly and/or recently used nanoparticles as pesticides against plant pathogens or pests.*

Nanomaterial	Plant pathogens	Nanoparticle Size (nm)	Effective concentration	Effects
Silver-based	*Aspergillus niger* *Aspergillus terreus* *Aspergillus flavus* *Aspergillus fumigatus*	27.31	500 µg/mL	Cell wall weakens, and the membrane moves into the cytoplasm, affecting the internal structure of the cell.
	Uncinula necator	10-15	100 µg/mL	Mycelium growth and spores' inhibition
Titanium-based	*Bipolaris sorokiniana*	10-100	40 mg/L	Inhibition of fungal growth
	Ustilago tritici	< 15	75 µg/mL	Production of intracellular ROS.
Copper-based	*Tribolium castaneum*	10-70	37 µg/mL	Oxidative stress and multisystem failure
Zinc-based	*Alternaria citri*	16.8	100 mg/mL	Growth inhibition

highly effective, they have certain limitations. Therefore, it is necessary to conduct extensive studies on the potential human use of these pesticides in large agricultural areas.

Acknowledgement

RM acknowledges that DGAPA-UNAM-PAPIIT grant no. TA200123 and SECIHTI (CBF-2025-I-1373).

References

[1] Jamiołkowska, A., (2020) Natural compounds as elicitors of plant resistance against diseases and new biocontrol strategies, *Agronomy*, 10, 2, 173 https://doi.org/10.3390/agronomy10020173.

[2] Houng Wang, Muhammad Jafir, Muhammad Irfan, Tanveer Sdmad, Muhammad Zia-ur-Rehman, Muhammad Usman, Muhammad Rizwan, Yousef Alhaj Hamound, Hiba Shaghaleh., (2024) Emerging trends to replace pesticides with nanomaterials: Recent experiences and future perspectives for ecofriendly environment, *Journal of Environmental Management* 360, 121178. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.121178

[3] Savary, S., Willocquet, L., Pethybridge, S. J., Esker, P., McRoberts, N., Nelson, A., (2019) The global burden of pathogens and pests on major food crops, *Nat Ecol Evol*, 3, 3, 430–439, https://doi.org/10.1038/s41559-018-0793-y.

[4] Ashwini, K., Titilope, J.J., Popat, M., et. al., (2024) Sustainable and consumer-centric nanotechnology-based materials: An update on the multifaceted applications, risks and tremendous opportunities, *Nano-Structures &Nano-Objects*, 38, 101148. https://doi.org/10.1016/j.nanoso.2024.101148

[5] Zishan, A., Shareen, N., Assima, F., et. al., (2024) Enhancing plant resilience: Nanotech solutions for sustainable agriculture. *Heliyon,* 10:23, e40735 https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e40735

[6] Garibo, D., Borbón-Nuñez, H. A., de León, J. N. D., García Mendoza, E., Estrada, I., Toledano-Magaña, Y., et al. (2020). Green Synthesis of Silver Nanoparticles Using *Lysiloma Acapulcensis* Exhibit High-Antimicrobial Activity. *Sci. Rep*. 10, 12805–12811. doi:10.1038/s41598-020-69606-7

[7] Nadiya, M.A., Muhammad A.I., et. al., (2023) Synthesis, characterization and antifungal potential of titanium

Licenciamiento bajo el cual se publican los contenidos: CC BY-NC-ND 4.0

dioxide nanoparticles against fungal disease (Ustilago tritici) of wheat (Triticum aestivum L.), *Environmental Researcha*, 28:1, 115852.

[8] Grmay, H.L., Noémie, T., et. al., (2024) Linking the key physiological functions of essential micronutrients to their deficiency symtoms in plants, *New Phytologist Fundation*, 242:3, 881-902 https://doi.org/10.1111/nph.19645.

[9] Adnan, R., Krisha, K., et. al., (2024) Exploring the potential of metallic and metal oxide nanoparticles for reinforced disease management in agricultural systems: A comprehensive review. *Environ. Nanotechnol. Monit. Manag.* 2, 100998. https://doi.org/10.1016/j.enmm.2024.100998.

[10] González-Merino, A.M., Hernández-Juárez, A., et. al., (2021). Antifungal activity of zinc oxide nanoparticles in Fusarum oxysporum-Solanum lycopersicum pathosystem under controlled conditions, *Journal of Phytopathology,* 169:9, 533-544 https://doi.org/10.1111/jph.13023

Licenciamiento bajo el cual se publican los contenidos: CC BY-NC-ND 4.0

Recibido: 04-feb-2026 Aceptado: 01-may-2026 e-ISSN 2954-4890

Sección: *Hot Science*

Reposicionamiento de fármacos: nuevos usos para medicamentos conocidos

Drug repurposing: giving drugs a second life

*Mayra Lozano-Espinosa**
Arturo Rojo-Domínguez

Departamento de Ciencias Naturales e Ingeniería, Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Cuajimalpa. Vasco de Quiroga 4871, Alcaldía Cuajimalpa de Morelos, 05348, Ciudad de México, México.

**Autor para la correspondencia: mlozano@cua.uam.mx*

RESUMEN

Algunos medicamentos no se limitan a la función para la que fueron creados. En ciertos casos, fármacos desarrollados para una enfermedad revelan efectos inesperados que los hacen útiles para tratar otras muy distintas. El reposicionamiento de fármacos aprovecha esta versatilidad para reutilizar medicamentos ya conocidos, reduciendo tiempos y costos en el desarrollo de nuevas terapias. Apoyado en herramientas computacionales, análisis de redes biológicas y modelos celulares avanzados, este enfoque cobró especial relevancia durante la pandemia de COVID-19. Así, el reposicionamiento demuestra que reutilizar el conocimiento existente puede ser una estrategia clave para la innovación en salud.

Palabras clave: Reposicionamiento de fármacos, innovación farmacéutica, salud pública.

SUMMARY

Some drugs are not limited to the function for which they were originally designed. In certain cases, drugs developed for one disease reveal unexpected effects that make them useful for treating entirely different conditions. Drug repurposing takes advantage of this versatility by reusing well-known drugs, reducing the time and cost required to develop new therapies. Supported by computational tools, biological network analysis, and advanced cellular models, this approach gained particular relevance during the COVID-19 pandemic. Drug repurposing shows that reusing existing knowledge can become a key strategy for innovation in health.

Keywords: Drug repurposing, pharmaceutical innovation, public health.

Licenciamiento bajo el cual se publican los contenidos: CC BY-NC-ND 4.0

Introducción

Vivimos rodeados de objetos que se adaptan: teléfonos que aprenden nuestros hábitos, aplicaciones que anticipan lo que necesitamos. En ciencia y medicina ocurre algo muy similar. Algunos medicamentos, lejos de limitarse a una sola función, esconden propiedades adicionales que se revelan al observarlos desde otra perspectiva.

Tradicionalmente, un fármaco se diseña con un objetivo específico, pero el cuerpo humano es un sistema complejo, formado por redes de interacciones donde una misma molécula puede influir en múltiples procesos al mismo tiempo. Por ello, un medicamento creado con un propósito puede generar efectos inesperados en otras rutas biológicas.

Desarrollar un fármaco desde cero requiere años y grandes inversiones, con una alta tasa de fracaso. Paradójicamente, este proceso también genera información clínica valiosa que rara vez se aprovecha por completo. Surge entonces la pregunta inevitable: ¿y si algunos medicamentos conocidos pueden servir para algo más? De esta inquietud nace el reposicionamiento farmacológico, una estrategia que propone que cambiar de misión puede ser tan valioso como crear algo nuevo.

Darle una segunda vida a lo que ya existe

El reposicionamiento farmacológico parte de una idea sencilla: aprovechar lo que ya

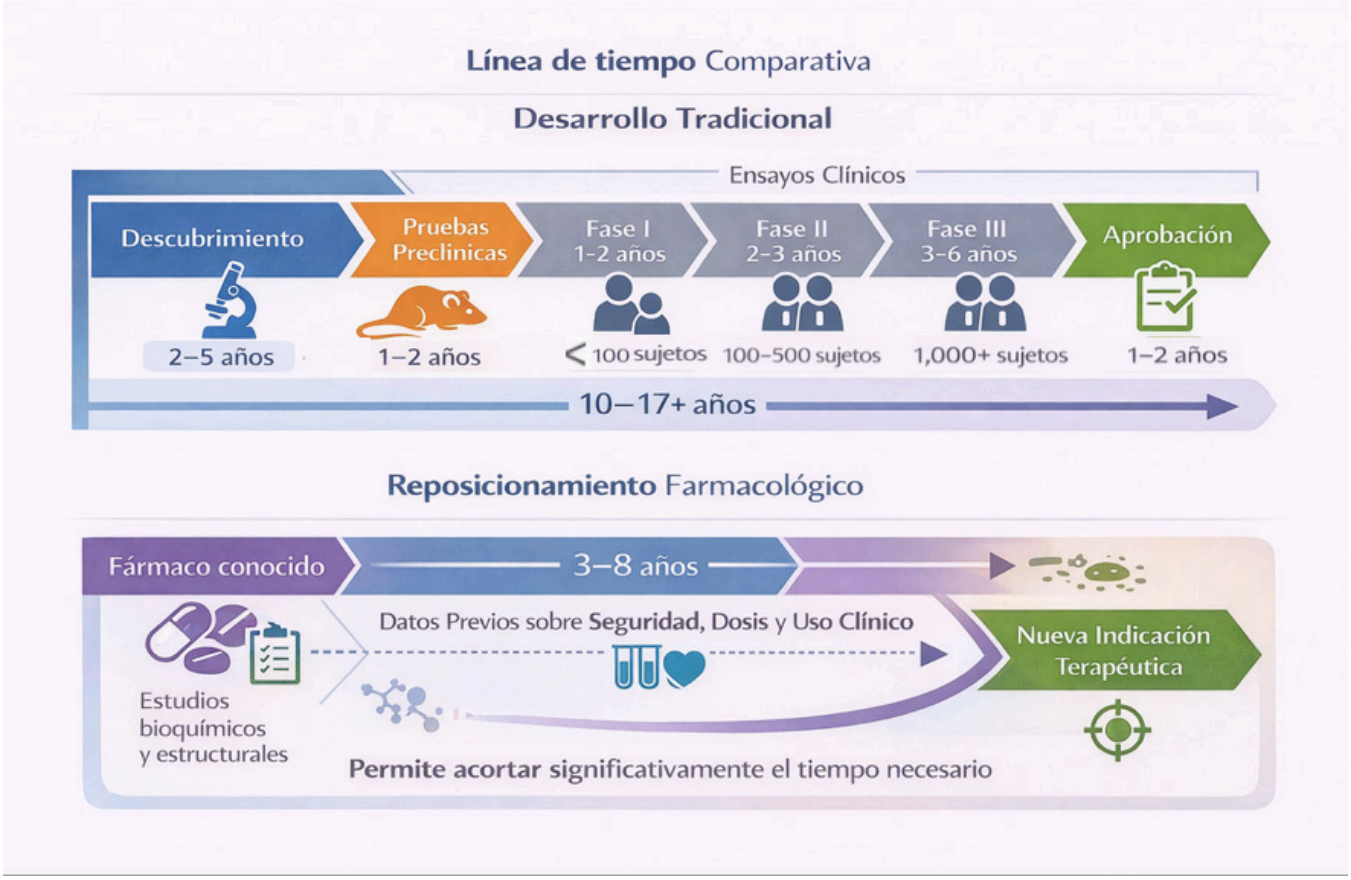


Figura 1. *Comparación entre el desarrollo tradicional de fármacos y el reposicionamiento farmacológico. Representación general de las principales etapas del desarrollo clásico de un medicamento frente al enfoque de reposicionamiento, destacando la reducción de tiempo, costos y riesgos al aprovechar información previa de seguridad y eficacia clínica. Imagen Elaborada con ChatGPT 5.1.*

Licenciamiento bajo el cual se publican los contenidos: CC BY-NC-ND 4.0

sabemos. Se reutilizan fármacos estudiados en humanos para buscar nuevas aplicaciones, incluso muy distintas de las originales. Esto incluye medicamentos aprobados o compuestos archivados por razones comerciales o estratégicas, no por problemas de seguridad.

La gran ventaja es el conocimiento acumulado: dosis seguras, efectos secundarios y comportamiento en el organismo ya documentados. Esto reduce la incertidumbre sobre el desarrollo de un nuevo medicamento [1] y acorta tiempos. Mientras que el desarrollo tradicional puede tomar entre 12 y 17 años, un medicamento reposicionado puede avanzar en apenas tres a ocho años, con una mayor probabilidad de éxito clínico.

Esta diferencia entre ambos enfoques se ilustra en la Figura 1, que compara las etapas del desarrollo clásico de fármacos frente al proceso del reposicionamiento farmacológico. Para los pacientes, esto significa acceder antes a tratamientos, especialmente en enfermedades raras, crónicas o desatendidas. Así, el reposicionamiento no solo es eficiente, sino también responsable en el uso de recursos para nuevas terapias.

Cuando el reloj corre en contra

La pandemia de COVID-19 llevó al desarrollo farmacéutico a su límite. Frente a un virus desconocido, esperar años para nuevos medicamentos no era una opción. En ese escenario, el reposicionamiento farmacológico dejó de ser una estrategia secundaria y se convirtió en una herramienta esencial para responder a una emergencia sanitaria global.

Evaluar fármacos existentes con perfiles de seguridad conocidos permitió descartar rápidamente opciones ineficaces y rescatar otras con beneficios reales [2].

La lección es clara: cuando el tiempo apremia, reutilizar conocimiento y combinarlo con datos clínicos y modelos computacionales puede marcar la diferencia entre reaccionar a tiempo o llegar demasiado tarde.

Computadoras que ven lo que nosotros no

Hoy, el reposicionamiento farmacológico ya no depende solo de la intuición clínica o de hallazgos fortuitos. Las computadoras se han convertido en aliadas clave para explorar posibilidades que, de otro modo, pasarían desapercibidas. Herramientas como el cribado virtual, la inteligencia artificial y el análisis de redes biológicas permiten examinar grandes volúmenes de datos clínicos y moleculares en busca de conexiones ocultas entre medicamentos y enfermedades.

Para identificar nuevas aplicaciones terapéuticas se emplean estrategias experimentales y computacionales. Entre ellas destacan el cribado fenotípico, que evalúa el efecto de compuestos sin conocer su blanco molecular; los métodos basados en blancos terapéuticos, que buscan interacciones con proteínas específicas; y los enfoques basados en conocimiento, que integran datos clínicos, farmacológicos y genómicos. También existen firmas moleculares y redes biológicas, para analizar cómo un fármaco puede influir en múltiples rutas celulares.

Además, la inteligencia artificial permite analizar datos de pacientes para identificar patrones y correlaciones invisibles a simple vista, revelando posibles nuevos usos de medicamentos existentes.

En lugar de analizar un medicamento de forma aislada, estos enfoques lo sitúan dentro del interactoma humano, la red de interacciones entre proteínas, genes y rutas metabólicas. Como un mapa de conexiones biológicas; si un medicamento afecta a una proteína, seguir sus enlaces permite identificar otros procesos que podrían verse influenciados, sugiriendo nuevas aplicaciones terapéuticas [3].

Licenciamiento bajo el cual se publican los contenidos: CC BY-NC-ND 4.0

En este contexto, herramientas como el cribado virtual y el docking molecular simulan la interacción de miles de moléculas con proteínas específicas, permitiendo priorizar compuestos prometedores antes de su evaluación experimental.

Así, las computadoras no sustituyen a los ensayos clínicos, pero funcionan como una brújula: orientan decisiones, reducen pruebas innecesarias y aceleran la búsqueda de nuevas aplicaciones terapéuticas para medicamentos ya conocidos.

Historias que nadie esperaba

Algunas de las mejores historias del reposicionamiento farmacológico parecen escritas por accidente. No nacieron de un plan maestro, sino de la capacidad de observar con atención y preguntarse "¿y si este efecto sirve para algo más?". En estos casos, un aparente fracaso se transforma en un descubrimiento que termina modificando la práctica médica.

La Figura 2 muestra algunos de los casos más conocidos del reposicionamiento farmacológico, en los que un efecto inesperado observado durante el desarrollo o uso clínico de un medicamento condujo a una nueva indicación terapéutica.

El caso más conocido es el del **sildenafil**, diseñado originalmente para tratar la angina de pecho. Aunque no cumplió su objetivo inicial, durante los ensayos clínicos surgió un efecto secundario tan consistente que condujo a su reposicionamiento como tratamiento para la disfunción eréctil y, posteriormente, para la hipertensión pulmonar. Un medicamento descartado para su primer propósito terminó convirtiéndose en uno de los fármacos más utilizados en el mundo.

Otras historias provienen de medicamentos de uso cotidiano cuyo alcance rara vez se cuestiona. Los inhibidores de la **bomba de protones**, como el omeprazol, conocido por



Figura 2. *Casos representativos de reposicionamiento farmacológico. Ejemplos de medicamentos que, tras ser desarrollados para una indicación original, encontraron nuevas aplicaciones terapéuticas en áreas distintas. Imagen Elaborada con ChatGPT 5.1.*

Licenciamiento bajo el cual se publican los contenidos: CC BY-NC-ND 4.0

Tabla 1. *Ejemplos representativos de reposicionamiento de fármacos.*

Fármaco	Uso original	Nueva aplicación
Sildenafil	Angina de pecho	Disfunción eréctil e hipertensión pulmonar
Talidomida	Sedante y antiemético	Mieloma múltiple, Enfermedad de Hansen (Lepra)
Metformina	Diabetes tipo 2	Investigación en cáncer y envejecimiento
Remdesivir	Virus del Ébola	COVID-19
Itraconazol	Antifúngico	Investigación en terapias anticancerígenas
Disulfiram	Tratamiento del alcoholismo	Investigación en cáncer y enfermedad de Alzheimer
Nitazoxanida	Antiprotozoario	Influenza y otras infecciones virales
Losartán	Hipertensión	Investigación en enfermedad de Alzheimer
Doxorrubicina	Antibiótico antitumoral aislado de *Streptomyces peucetius*	Tratamiento de diversos tipos de cáncer (vejiga, mama, estómago, pulmón y tiroides)
Lorazepam	Ansiolítico (benzodiacepina)	Actividad contra biopelículas fúngicas

Las nuevas aplicaciones indicadas corresponden a distintos niveles de evidencia (desde estudios experimentales hasta uso clínico consolidado).
Fuente: Adaptado de [5].

Tabla 2. *Clasificación del reposicionamiento farmacológico según el nivel de evidencia científica.*

Nivel de evidencia (DREL)	Tipo de evidencia científica
0	Sin evidencia experimental. Incluye predicciones obtenidas mediante métodos *in silico* sin confirmación experimental.
1	Estudios *in vitro* con valor limitado para predecir efectos en organismos vivos o en humanos.
2	Estudios en modelos animales con posible relevancia biológica para humanos.
3	Evidencia clínica preliminar en humanos (por ejemplo, estudios de prueba de concepto, pocos casos clínicos o inferencias a partir de registros médicos).
4	Evidencia clínica sólida con resultados documentados en pacientes, utilizando dosis dentro de los límites de seguridad.

Fuente: Adaptado de [6].

tratar la acidez gástrica, han mostrado efectos inesperados al inhibir enzimas clave en parásitos como Giardia lamblia y Entamoeba histolytica, lo que abre la posibilidad de reutilizarlos como agentes antiprotozoarios [4]. Lo que comenzó como un tratamiento digestivo podría convertirse en una herramienta contra enfermedades parasitarias que afectan a millones de personas.

Incluso el **ácido acetilsalicílico**, uno de los medicamentos más antiguos y utilizados del planeta, continúa revelando sorpresas. Más allá de su efecto analgésico y antiinflamatorio, hoy se investiga su posible actividad antiviral en infecciones respiratorias. Aunque estas aplicaciones aún se encuentran en estudio, muestran que incluso los fármacos "de siempre" pueden esconder funciones inesperadas cuando se observan desde otra perspectiva.

Más allá de estos ejemplos clásicos, el reposicionamiento ha generado numerosos

Licenciamiento bajo el cual se publican los contenidos: CC BY-NC-ND 4.0

Tabla 3. *Ejemplos de reposicionamiento farmacológico clasificados según el nivel de evidencia.*

Nivel de evidencia (DREL)	Fármaco	Comentario
0	Diversos compuestos	Predicciones obtenidas principalmente mediante estudios computacionales o bioinformáticas sin validación experimental.
1	Benzbromarona	Mostró actividad *in vitro* como inhibidor de *quorum sensing*, pero el efecto no se confirmó en modelos animales.
2	Astemizol	Presentó actividad como radiosensibilizador en estudios en ratones con tumores xenoinjertados.
3	Ketorolaco	Evidencia in vitro e in vivo como inhibidor de Rac1 y Cdc42 GTPasa; actualmente evaluado clínicamente en cáncer de ovario.
4	Sildenafil	Desarrollado originalmente para angina de pecho, posteriormente reposicionado para disfunción eréctil y más tarde aprobado para hipertensión pulmonar.

Fuente: Adaptado de [6].

casos adicionales en distintas áreas terapéuticas. La Tabla 1 presenta una selección de estos ejemplos reportados en la literatura científica [5].

En conjunto, estos ejemplos ilustran una idea central: en ciencia, un medicamento no siempre se define por su primer uso. A veces, basta con cambiar la pregunta para descubrir que un viejo conocido aún tiene mucho que ofrecer. Sin embargo, no todas estas propuestas cuentan con el mismo nivel de evidencia ni se encuentran en la misma etapa de investigación.

Para organizar este panorama se ha propuesto la clasificación **Drug Repurposing Evidence Level (DREL)**, que evalúa el grado de evidencia que respalda cada caso de reposicionamiento. Este sistema distingue diferentes niveles de evidencia que van desde predicciones computacionales o estudios experimentales preliminares hasta aplicaciones respaldadas por ensayos clínicos y uso terapéutico consolidado. La Tabla 2 resume esta clasificación, y la Tabla 3 presenta algunos ejemplos de fármacos reposicionados según su nivel de evidencia [6].

Este marco permite que investigadores, médicos, la industria farmacéutica y las autoridades regulatorias compartan un mismo lenguaje, y distingue entre ideas prometedoras y aquellas que aún requieren validación experimental antes de llegar a los pacientes. En un campo tan dinámico como el reposicionamiento farmacológico, contar con criterios así es esencial para transformar hallazgos inesperados en tratamientos confiables.

Ventajas claras, retos inevitables

El reposicionamiento farmacológico ofrece ventajas importantes: reduce de manera significativa el tiempo y los costos de desarrollo, aumenta la probabilidad de éxito al trabajar con fármacos ya estudiados en humanos y permite aprovechar herramientas computacionales avanzadas para identificar nuevas aplicaciones terapéuticas. Sin embargo, estos hallazgos siempre deben confirmarse mediante estudios experimentales, ya que la complejidad de los sistemas biológicos puede generar resultados inesperados.

En un mundo donde las enfermedades emergentes avanzan con rapidez y los padecimientos crónicos aumentan, aprender a reutilizar lo que ya tenemos es una ventaja estratégica. El reposicionamiento farmacológico nos

Licenciamiento bajo el cual se publican los contenidos: CC BY-NC-ND 4.0

recuerda que la innovación no siempre implica empezar de cero. A veces, basta con mirar de nuevo, hacer las preguntas correctas y permitir que los medicamentos encuentren una segunda misión.

Agradecimientos

Durante la elaboración se recurrió al uso de una herramienta de inteligencia artificial (ChatGPT-5.1, OpenAI) únicamente como apoyo para la revisión del lenguaje y la mejora de la claridad del texto. Asimismo, las imágenes incluidas fueron elaboradas con apoyo de herramientas digitales de inteligencia artificial. Las ideas, el contenido y la responsabilidad del trabajo presentado corresponden exclusivamente a las personas autoras.

Referencias

[1] Pushpakom, S., Iorio, F., Eyers, P. A., Escott, K. J., Hopper, S., Wells, A., Doig, A., Guilliams, T., Latimer, J., McNamee, C., Norris, A., Sanseau, P., Cavalla, D., & Pirmohamed, M. (2019). Drug repurposing: progress, challenges and recommendations. *Nature Reviews Drug Discovery*, 18, 41–58. https://doi.org/10.1038/nrd.2018.168

[2] Ashburn, T. T., & Thor, K. B. (2004). Drug repositioning: identifying and developing new uses for existing drugs. *Nature Reviews Drug Discovery*, 3(8), 673–683. https://doi.org/10.1038/nrd1468

[3] Zhou, Y., Hou, Y., Shen, J., Huang, Y., Martin, W., & Cheng, F. (2020). Network-based drug repurposing for novel coronavirus 2019-nCoV/SARS-CoV-2. *Cell Discovery*, 6, 14. https://doi.org/10.1038/s41421-020-0153-3

[4] García-Torres, I., de la Mora-de la Mora, I., Marcial-Quino, J., Gómez-Manzo, S., Vanoye-Carlo, A., Navarrete-Vázquez, G., Colín-Lozano, B., Gutiérrez-Castrellón, P., Sierra-Palacios, E., López-Velázquez, G., & Enríquez-Flores, S. (2016). Proton pump inhibitors drastically modify triosephosphate isomerase from Giardia lamblia at functional and structural levels, providing molecular leads in the design of new antigiardiasic drugs. *Biochimica et Biophysica Acta (BBA) – General Subjects*, 1860(1), 97–107. https://doi.org/10.1016/j.bbagen.2015.10.021

[5] Kulkarni, V. S., Alagarsamy, V., Solomon, V. R., Jose, P. A., & Murugesan, S. (2023). Drug Repurposing: An Effective Tool in Modern Drug Discovery. *Russian journal of bioorganic chemistry*, 49(2), 157–166. https://doi.org/10.1134/S1068162023020139

[6] Oprea, T. I., & Overington, J. P. (2015). Computational and practical aspects of drug repositioning. *Assay and Drug Development Technologies*, 13(6), 299–306. https://doi.org/10.1089/adt.2015.29011.tiodrrr

Licenciamiento bajo el cual se publican los contenidos: CC BY-NC-ND 4.0

Recibido: 28-abr-2026 Aceptado: 14-jun-2026 e-ISSN 2954-4890

Sección: Concientifica

CRISPR-Cas: el nuevo superdetective del cáncer

CRISPR-Cas: cancer's new superdetective

Katherine Del Socorro Luna Abundis
Órfil González Reynoso
*Javier Alejandro Delgado Nungaray**

Departamento de Ingeniería Química, Centro Universitario de Ciencias Exactas e Ingenierías, Universidad de Guadalajara, Jalisco, México.

**Autor para la correspondencia: javier.dnungaray@alumnos.udg.mx*

RESUMEN

En la búsqueda de nuevas alternativas diagnósticas para enfermedades como el cáncer, los microARNs se comienzan a utilizar para identificar la presencia o ausencia de una enfermedad según su concentración, mediante técnicas miniaturizadas que permiten diagnósticos menos invasivos. Al no requerir equipos especializados y emplear muestras de fluidos corporales, estas herramientas pueden ser más accesibles para personas de distintas regiones, favoreciendo diagnósticos oportunos a través del tamizaje. Además, tecnologías emergentes como CRISPR-Cas13 pueden integrarse en estas plataformas para detectar microARNs con alta especificidad, impulsando el desarrollo de métodos diagnósticos tempranos, portátiles y accesibles para la detección y monitoreo del cáncer.

Palabras clave: Diagnóstico clínico, cáncer, microARNs.

SUMMARY

In the search for new diagnostic alternatives for diseases such as cancer, microRNAs are increasingly used to identify the presence or absence of a disease based on their concentration, through miniaturized techniques that enable less invasive diagnostics. Since they do not require specialized equipment and use samples of bodily fluids, these tools can be more accessible to people in different regions, enabling timely diagnosis through screening. Furthermore, emerging technologies such as CRISPR-Cas13 can be integrated into these platforms to detect microRNAs with high specificity, driving the development of early, portable, and accessible methods for cancer detection and monitoring.

Keywords: Clinical diagnosis, cancer, microRNAs.

Licenciamiento bajo el cual se publican los contenidos: CC BY-NC-ND 4.0

Introducción

¿Sabes cuál es una de las enfermedades que más preocupa a nivel mundial? Si pensaste en el cáncer estás en lo correcto. Esta enfermedad es una de las que más atención genera debido al gran número de muertes que ocasiona. En hombres, el cáncer de próstata es el más diagnosticado y el cáncer de pulmón el que más muertes provoca; en el caso de las mujeres, los cánceres más diagnosticados y con mayor mortalidad son el de mama y el cervicouterino [1].

El aumento de diagnósticos y de muertes continúa a nivel global y México no es la excepción. Tan solo en 2023, los tumores malignos fueron las principales causas de muerte en el país. Además, el tipo de cáncer más frecuente cambia dependiendo de factores como la edad y el sexo; por ejemplo, la leucemia es uno de los cánceres más comunes en jóvenes, mientras que en adultos predominan otros tipos como el cáncer de mama, colorrectal o de próstata [2]. Ante esto, la comunidad científica se ha dedicado a la búsqueda de herramientas que permitan comprender, monitorear y detectar el cáncer incluso antes de que aparezcan los síntomas.

Pequeñas moléculas para diagnosticar el cáncer: microARNs

Y te preguntarás: ¿qué se ha descubierto? Los avances científicos han identificado factores relacionados con los procesos cancerígenos. Dentro de estos factores, un tipo de moléculas pequeñas, llamadas microARNs (miARNs), se ha asociado con el control de diversos procesos biológicos, así como con el inicio del cáncer.

Para entender cómo es que funcionan estas moléculas, debemos conocer una cuestión biológica conocida como el dogma central de la biología molecular, en el que nuestro cuerpo funciona a través de una serie de procesos llevados a cabo en sus células, es decir, la uni-

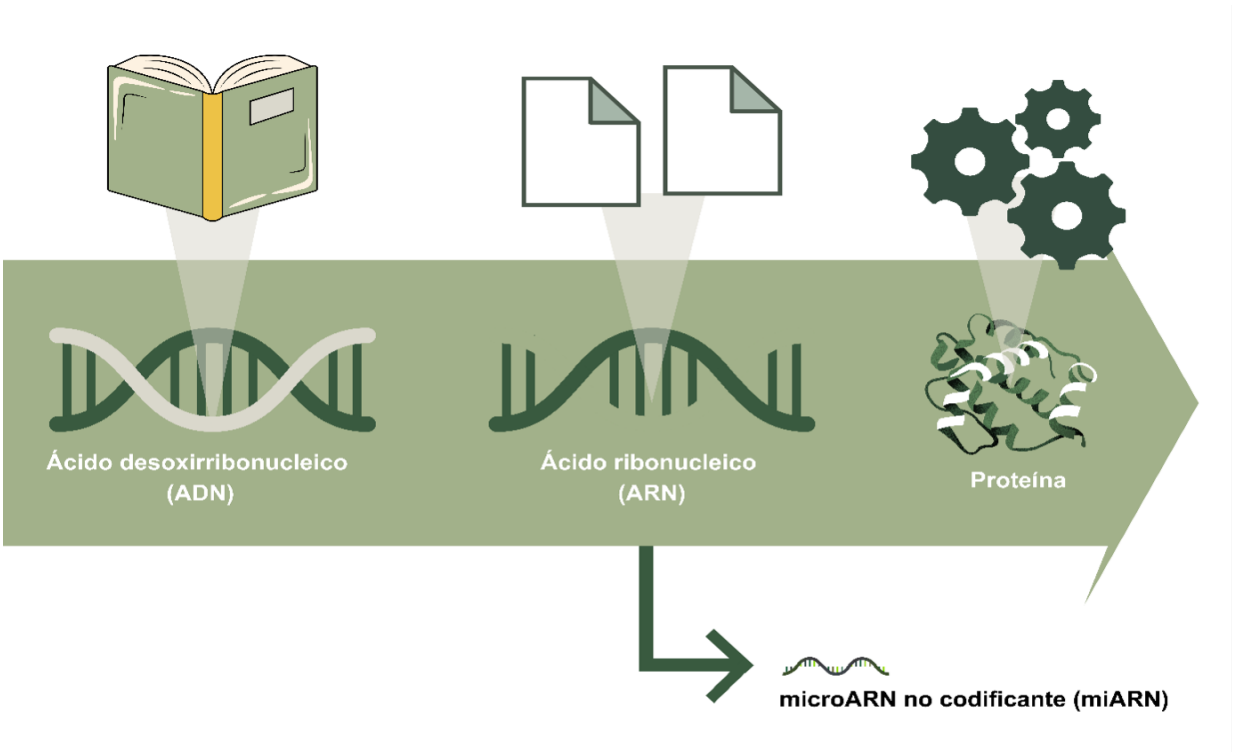


Figura 1. *Dogma central de la biología molecular.*

Licenciamiento bajo el cual se publican los contenidos: CC BY-NC-ND 4.0

dad más pequeña, básica y funcional de todos los seres vivos. El primer paso es la replicación, que se da cuando la información que determina quiénes somos biológicamente, cómo estamos constituidos y cómo funcionamos se duplica. Esta información se encuentra contenida en moléculas de ADN (ácido desoxirribonucleico): es como si fuera un gran libro con las instrucciones específicas para saber cómo existir (Figura 1).

Dado que nuestro cuerpo requiere de diversos andamios para su existencia, para utilizar la información contenida en el ADN sucede un proceso en el que se necesita "leer las instrucciones", pero que a su vez no se tenga el riesgo de perder dicha información, por lo que del ADN se hacen múltiples "respaldos" de acuerdo a lo que se necesite producir en nuestro cuerpo, a este otro tipo de moléculas se le conoce como ARN (ácido ribonucleico). Este proceso de ADN a ARN se conoce como transcripción. Una vez que la información se encuentra disponible en forma de ARN, las células de nuestro cuerpo pueden generar las proteínas necesarias para vivir (es decir, moléculas complejas que funcionan como máquinas diminutas que hacen la mayoría de las funciones en el cuerpo humano). Este proceso, mediante el cual la información contenida en el ARN se utiliza para producir proteínas, se conoce como traducción.

Una vez que hemos comprendido este proceso en el que del ARN normalmente se "producen" proteínas, podemos adentrarnos en sus otros tipos de funciones. Hay algunas moléculas pequeñas de ARN que no se convierten en proteínas; en cambio, estas moléculas regulan diferentes funciones biológicas, desde procesos celulares normales hasta procesos cancerígenos. Lo hacen uniéndose a otras moléculas de ARN e impidiendo que se produzcan determinadas proteínas o disminuyendo su cantidad. A estas moléculas se les conoce como miARNs, las cuales pueden variar en sus concentraciones presentes en nuestro cuerpo (Figura 1).

Debido a que los miARNs participan en la regulación de procesos como el crecimiento, la división y la muerte celular, alteraciones en sus niveles se han asociado con el desarrollo de distintos tipos de cáncer. Por ejemplo, el miARN-21 puede encontrarse aumentado en pacientes con distintos tipos de cáncer, como lo es el de estómago. Esto sembró la idea en los científicos de que dichas moléculas podrían ser utilizadas para detectar el cáncer.

Lo interesante es que estos miARNs se pueden detectar y medir en la sangre, y de acuerdo con el tipo de molécula en específico y en qué cantidad está presente, un médico puede determinar si las personas presentan o no un tipo de cáncer [3,4]. En otras palabras, los cambios en la concentración de ciertos miARNs pueden funcionar como señales biológicas que alertan sobre la presencia o progresión de la enfermedad. Esto abre la capacidad en un futuro muy cercano de utilizar los miARNs como formas de tamizaje que no solo sean fáciles de detectar, sino que también permitan a las personas tener un diagnóstico oportuno a través de métodos menos invasivos.

Detectar el cáncer es una tarea difícil, los biomarcadores lo facilitan

Actualmente, nos enfrentamos a problemas con las formas de diagnóstico tradicionales para el cáncer, como las endoscopias, biopsias, ultrasonidos endoscópicos, así como marcadores tumorales. El problema con algunas de estas técnicas es que son invasivas, es decir, que se requiere introducir sondas y/o tomar muestras, ya sea a través de cortes o punciones, para poder analizarlas y así comprobar la presencia o ausencia de algún tipo de cáncer, y que por lo mismo son percibidas como incómodas. Además, lamentablemente, son utilizadas hasta en etapas avanzadas del cáncer [4].

Licenciamiento bajo el cual se publican los contenidos: CC BY-NC-ND 4.0

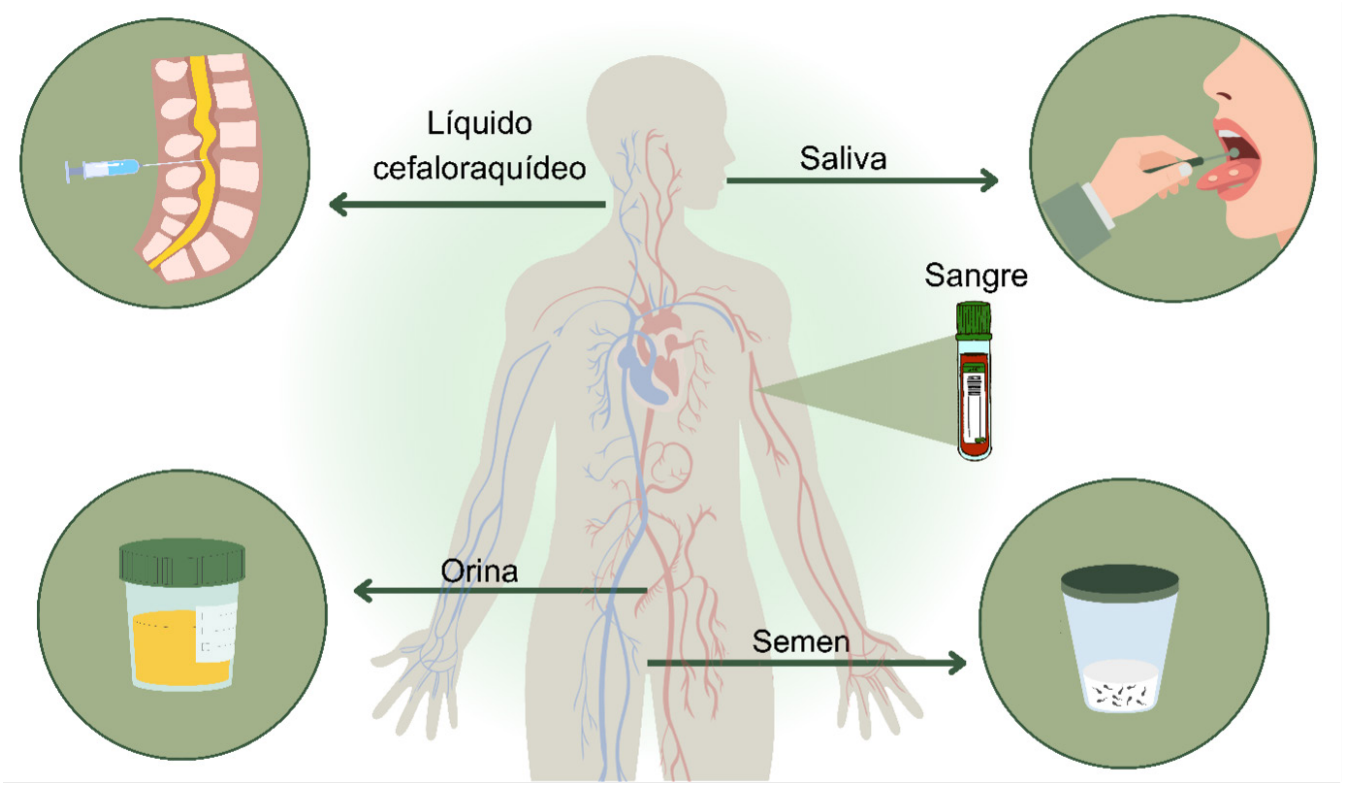


Figura 2. *Fluidos en los que se pueden detectar los miARNs.*

Te preguntarás ¿entonces qué alternativas tenemos para detectarlo? Dentro de estas formas de detección, los marcadores en sangre han sobresalido; al ser moléculas provenientes de un organismo vivo, se les da el nombre de biomarcadores. Un biomarcador puede definirse como cualquier característica medible que refleja un proceso biológico en el cuerpo. En este sentido, el aumento o la disminución de los miARNs se ha relacionado con diversos procesos fisiológicos y patológicos, entre ellos el cáncer [3]. La detección de miARNs ofrece una mejor alternativa, ya que pueden detectarse en fluidos como la sangre, orina, saliva, semen y líquido cefalorraquídeo (Figura 2).

A pesar de esto, aún existen algunas limitaciones, como la necesidad de utilizar técnicas adicionales de biología molecular que requieren tiempos prolongados e infraestructura especial [5]. Para paliar esta problemática, se ha optado por utilizar tecnología miniaturizada, lo cual permite utilizar equipos de tamaño pequeño, portátiles y que permiten disminuir el costo de los análisis sin descuidar la sensibilidad y especificidad de los resultados y el tiempo de procesamiento.

El futuro de la detección de miARNs con biotecnología de punta: CRISPR-Cas13

La tendencia actual en el diagnóstico es diseñar equipos que sean portátiles, de bajo costo y capaces de entregar resultados rápidos y precisos, además de trasladarlos fuera de los laboratorios y que lleguen a zonas de difícil acceso. A causa de esto, en los últimos años surgió la idea de crear equipos llamados laboratorios en un chip, los cuales, cuando están destinados a la detección o seguimiento de una enfermedad, se conocen como puntos de atención. Imagina lo siguiente: un laboratorio que quepa en la palma de tu mano capaz de

Licenciamiento bajo el cual se publican los contenidos: CC BY-NC-ND 4.0

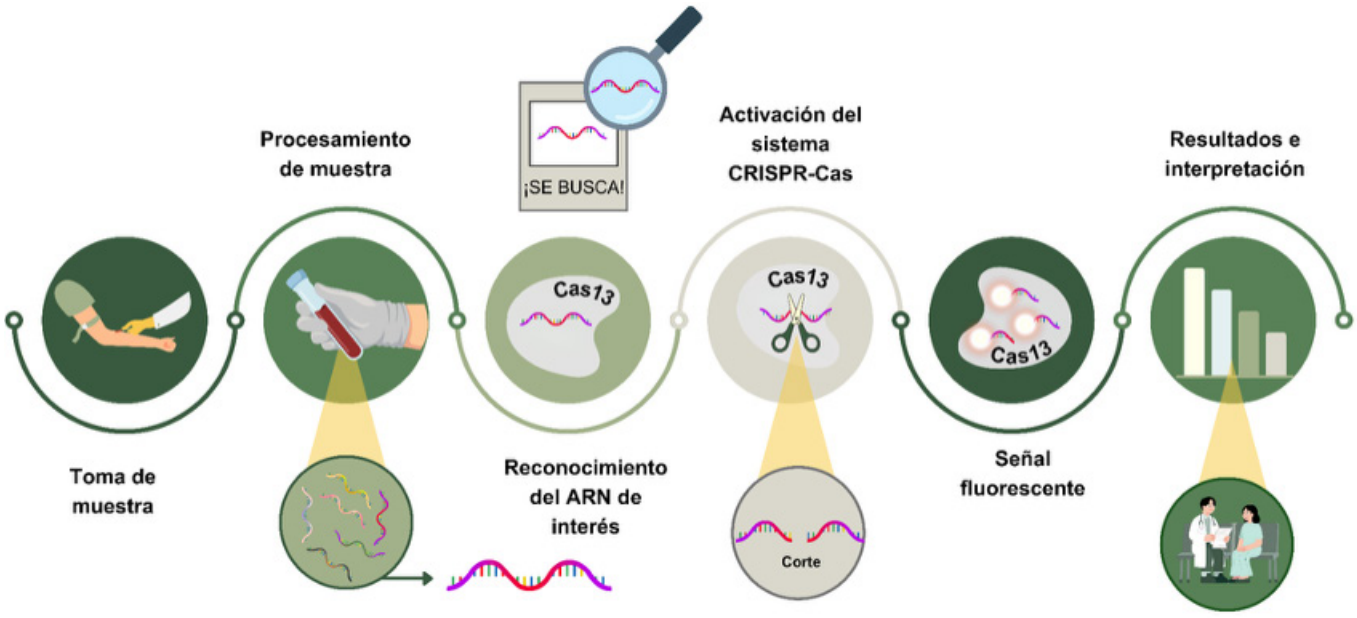


Figura 3. *Laboratorio en un chip: uso de CRISPR-Cas13 para la detección de miARNs.*

detectar el cáncer. Y te preguntarás: ¿cómo es posible esto? Recordarás que los miARNs están presentes en el cáncer en diferentes cantidades, por lo que estos laboratorios en un chip pueden detectarlos. Para lograr la detección de los miARNs se necesitan herramientas moleculares rápidas y avanzadas como CRISPR-Cas13.

CRISPR-Cas13 es una técnica que utiliza un ARN guía, el cual es responsable de dirigir a la proteína Cas13 a un miARN muy específico del cáncer de interés (Figura 3). El sistema funciona a través de dos componentes: el ARN guía, que actúa como un buscador, mientras que Cas13 funciona como una "tijera". Lo que hace que CRISPR-Cas13 sea útil para el diagnóstico es una característica llamada actividad colateral. Cuando el ARN guía reconoce y se une al miARN objetivo, la proteína Cas13 se activa y comienza a cortar de manera indiscriminada otras moléculas de ARN cercanas. Esta propiedad se aprovecha utilizando moléculas reporteras (compuestas por un "colorante") diseñadas para generar una señal cuando son cortadas. De esta manera, una sola molécula de miARN puede activar una proteína Cas13 que corta múltiples moléculas reporteras, produciendo una señal fluorescente o un cambio de color mucho más intenso y fácil de detectar. A través de esta amplificación de señal, es posible identificar cantidades muy pequeñas del miARN objetivo, mejorando la sensibilidad de la detección.

Esta capacidad de CRISPR-Cas13 se puede incorporar en un laboratorio en un chip, un tipo de dispositivo diseñado como punto de atención para el tamizaje de diversas patologías. Un ejemplo concreto es el desarrollo de chips electroquímicos microfluídicos diseñados para la detección de cáncer de cerebro. Al combinar la especificidad de CRISPR-Cas13 y la automatización a través de estos nuevos equipos que ofrecen una alta sensibilidad, se crean herramientas de diagnóstico capaces de dar resultados rápidos y precisos sin necesidad de una infraestructura grande y especializada, facilitando al médico el monitoreo constante del cáncer, esperando que en un futuro este tipo de técnicas sean accesibles a todas las comunidades [5,6].

Este tipo de dispositivos nos puede acercar al diagnóstico temprano de enfermedades

Licenciamiento bajo el cual se publican los contenidos: CC BY-NC-ND 4.0

como el cáncer a través del tamizaje, de manera accesible y cómoda para la población. Imagina lo siguiente: CRISPR es el superdetective, los miARNs son las pistas y el cáncer es el crimen.

Conclusión

El uso de miARNs como biomarcadores nos da la posibilidad de tener mejores formas de detección del cáncer, no solo porque ofrece gran especificidad, sino que también es una forma menos invasiva para el tamizaje de los pacientes. El uso de sistemas miniaturizados como los laboratorios en un chip puede integrar la detección de los miARNs automatizando las técnicas y utilizando cantidades muy pequeñas de reactivos. Estos avances conducen a menores tiempos de procesamiento y facilitan la detección del cáncer. Una vez más, la biotecnología es un aliado que favorece el bienestar de las personas, esta vez enfocado en el diagnóstico clínico.

Agradecimiento

Se agradece a la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI) por otorgar las Becas Nacionales de Posgrado a Katherine Del Socorro Luna Abundis y Javier Alejandro Delgado Nungaray con los números de CVU 2181280 y 1267568, respectivamente.

Referencias

[1] Bray, F., Laversanne, M., Sung, H., Ferlay, J., Siegel, R. L., Soerjomataram, I., Jemal, A. (2024). Global cancer statistics 2022: GLOBOCAN estimates of incidence and mortality worldwide for 36 cancers in 185 countries. *CA: a cancer journal for clinicians* 74(3), 229–263. https://doi.org/10.3322/caac.21834

[2] González-Zago, A., Fierro-Atondo, F. A., Ramírez-Juárez , N., Pérez-Corro , M. Ángel, Anaya-Ruiz , M., Maycotte, P. (2025). Tendencias 2018-2024 de cáncer en patología de un hospital de México oriente. *Revista Médica Del Instituto Mexicano Del Seguro Social* 63(6), e6735. https://doi.org/10.5281/zenodo.17342455

[3] Smolarz, B., Durczyński, A., Romanowicz, H., Szyłło, K., Hogendorf, P. (2022). miRNAs in cancer (review of literature). *International journal of molecular sciences* 23(5), 2805. https://doi.org/10.3390/ijms23052805

[4] Cuellar-Gomez, H., Ocharán-Hernández, M. E., Calzada-Mendoza, C. C., Comoto-Santacruz, D. A. (2021). Serum miRNA profile as a potential tool for non-invasive gastric cancer diagnosis in Mexican patients. Perfil de miARNs séricos como una potencial herramienta para el diagnóstico de cáncer gástrico no invasivo en pacientes mexicanos. *Cirugia y cirujanos* 89(6), 748–754. https://doi.org/10.24875/CIRU.20000963

[5] Habib, A. H., Sain, Z. M., Rafeeq, M., Karami, M. M., Alsufyani, H. A., Iqbal, J., Chaieb, K.,Altayb, H. N., Nadeem, M. S., Al-Abbasi, F. A., Kazmi, I. (2026). MicroRNA-CRISPR biosensors for cancer diagnostics. *Clinica chimica acta* 583, 120837. https://doi.org/10.1016/j.cca.2026.120837

[6] Wang, Y., Jiang, H., Zhang, Y., Yang, Q., Song, Y., Gao, Y. (2026). Microfluidic platforms for CRISPR-based biosensing advancing molecular diagnostics from benchtop to point-of-care. *Sensors and Diagnostics*, 5(2), 116–135. https://doi.org/10.1039/d5sd00176e

Licenciamiento bajo el cual se publican los contenidos: CC BY-NC-ND 4.0

Recibido: 25-nov-2025 *Aceptado: 24-may-2026* *e-ISSN 2954-4890*

Sección: *¿Cómo funciona?*

Genes reporteros: linternas en el laboratorio

Reporter genes: flashlights in the laboratory

Dennia Fabiola Gómez Acosta
Antonia Gutiérrez Mora
*Rafael Urrea López**

Unidad de Biotecnología Vegetal, Centro público de Investigación CIATEJ, Jalisco, México.

**Autor para la correspondencia: rurrea@ciatej.mx*

RESUMEN

Los genes reporteros se han convertido en aliados indispensables para la biotecnología vegetal. Gracias a ellos, los científicos pueden "ver" lo que ocurre dentro de las plantas: cómo se activan los genes, cómo crecen las raíces o cómo responden al estrés. Ejemplos como la proteína verde fluorescente (GFP), la enzima GUS, la luciferasa o el pigmento *RUBY*, provenientes de organismos como medusas o luciérnagas, iluminan literalmente procesos biológicos invisibles. Actualmente, estas herramientas son clave en la investigación agrícola, el mejoramiento genético y la edición del genoma vegetal.

Palabras clave: Genes reporteros, biotecnología vegetal, expresión génica.

SUMMARY

Reporter genes have become indispensable allies in plant biotechnology. They allow scientists to "see" what happens inside plants—how genes are activated, how roots grow, or how plants respond to stress. Examples such as the green fluorescent protein (GFP), the GUS enzyme, luciferase, and the *RUBY* pigment—originating from jellyfish and fireflies—literally illuminate otherwise invisible processes. Today, these tools are key to agricultural research, genetic improvement, and genome editing, enabling real-time visualization of cellular dynamics and gene regulation in plants.

Keywords: Reporter genes, plant biotechnology, gene expression.

Licenciamiento bajo el cual se publican los contenidos: CC BY-NC-ND 4.0

Conceptos clave para leer como un experto:

- **Gen:** Fragmento de ADN que contiene la información para producir una proteína.
- **Proteína:** Molécula que realiza funciones estructurales o metabólicas en las células.
- **Fluorescencia:** Emisión de luz por una molécula al ser excitada por otra fuente luminosa.
- **Promotor:** Región del ADN que controla cuándo y dónde se expresa un gen.
- **Transformación genética:** Proceso mediante el cual se introduce ADN externo en un organismo.

Introducción

Hace cinco siglos, la invención del microscopio abrió una ventana al mundo de la vida que nos era invisible y marcó el inicio de una nueva era en la biología. Desde entonces, las técnicas de observación e imagen han evolucionado de forma extraordinaria y, junto a los avances en biología molecular e ingeniería genética, han permitido visualizar, caracterizar y cuantificar procesos biológicos a nivel celular y molecular en organismos vivos. Te invitamos a descubrir una de las herramientas más fascinantes de esa evolución: los genes reporteros, que literalmente han permitido iluminar la biología de las plantas. Gracias a esto, los investigadores pueden "ver" procesos que antes eran invisibles: el crecimiento de una raíz, la respuesta de una hoja al estrés o la manera en que una planta reacciona ante un patógeno.

Desde su descubrimiento, los genes reporteros han despertado un gran interés por su contribución en el estudio de plantas (Figura 1), en las siguientes páginas se presenta una síntesis de cuatro de los genes reporteros más utilizados en biotecnología vegetal. Para los interesados en profundizar sobre el tema

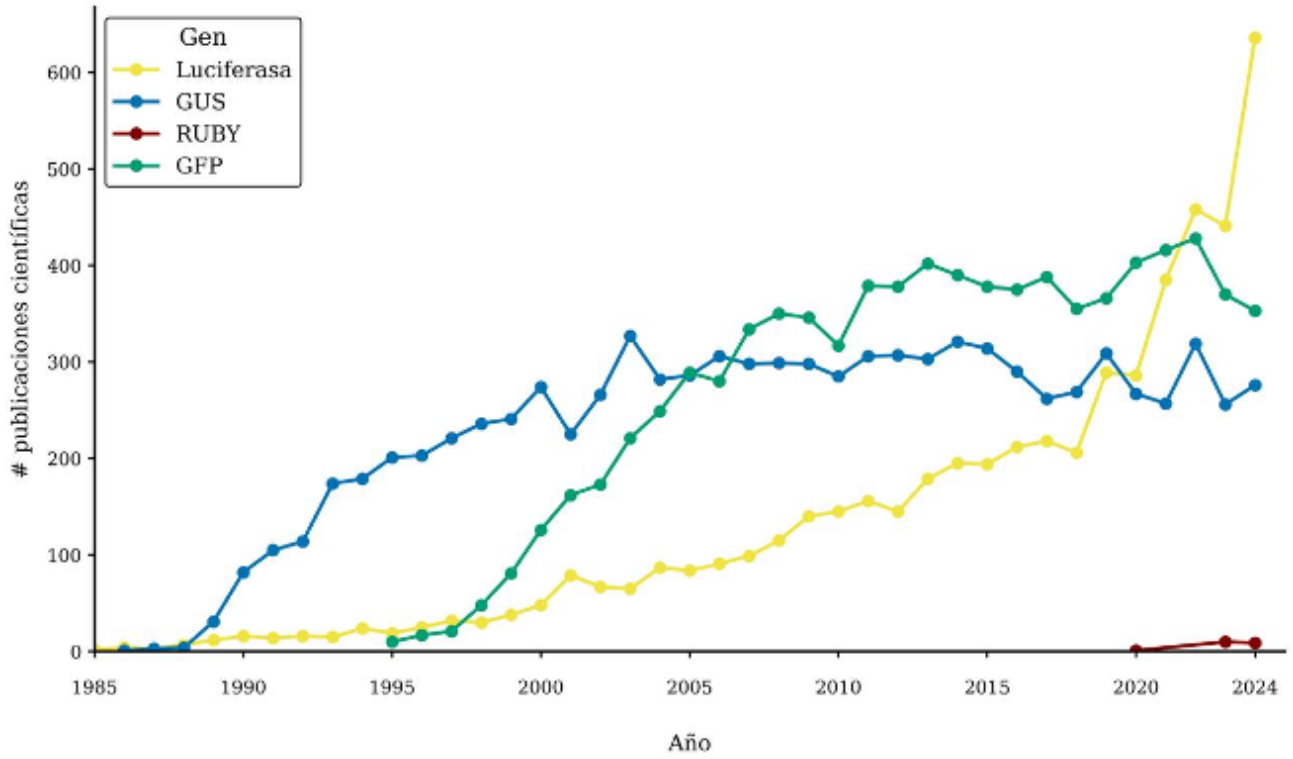


Figura 1. *Tendencia en el número de publicaciones científicas en las que se usan genes reporteros (GUS, GFP, luciferasa y RUBY) en estudios de plantas en los últimos 40 años. Información obtenida de la base de datos de referencias bibliográficas y citas multidisciplinar, Scopus.*

Licenciamiento bajo el cual se publican los contenidos: CC BY-NC-ND 4.0

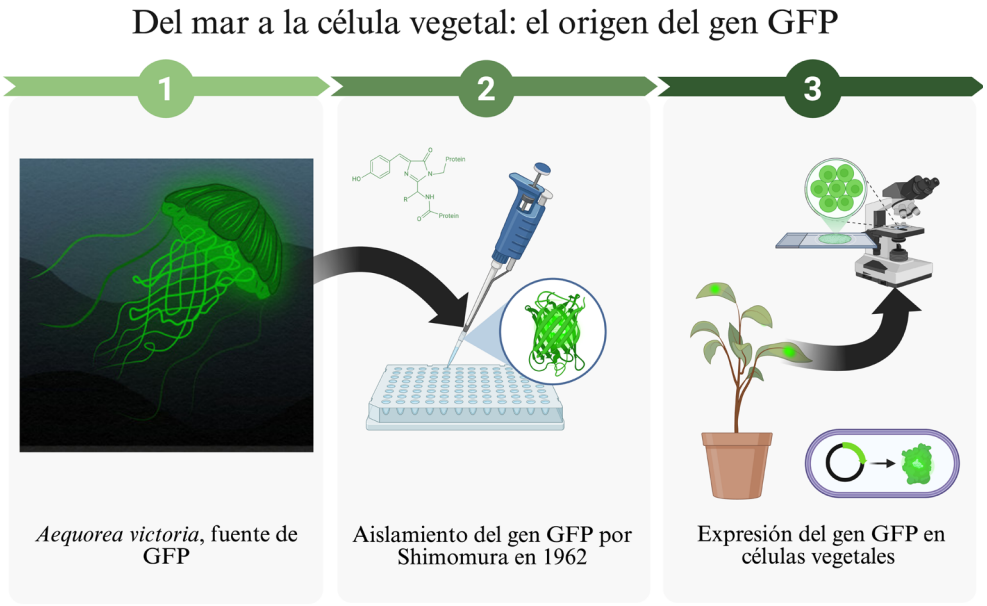


Figura 2. *Origen y aplicación del gen GFP, aislado de la medusa Aequorea victoria e introducido posteriormente en células vegetales. Elaboración propia con BioRender.*

recomendamos leer la revisión de literatura de Súnico et al., 2024 [1].

De las profundidades del mar a los laboratorios de biotecnología

Uno de los más famosos genes reporteros es la proteína verde fluorescente (GFP, por sus siglas en inglés, Green Fluorescent Protein), que emite una luz verde brillante al ser excitada con luz azul o ultravioleta. Esta proteína proviene de una medusa transparente del océano Pacífico llamada *Aequorea victoria*, capaz de producir un resplandor verde para comunicarse y defenderse de sus depredadores. Durante los años sesenta, el investigador Osamu Shimomura logró aislar la sustancia responsable de ese brillo: una proteína que emitía una intensa luz verde cuando era iluminada con luz azul o ultravioleta [2].

Décadas después, el científico Martin Chalfie tuvo una idea brillante: ¿y si ese gen que codifica la proteína fluorescente de la medusa pudiera introducirse en otro organismo? En 1994 demostró que el gen de *GFP* podía introducirse y expresarse en bacterias y nemátodos, y que las células que producían la proteína emitían fluorescencia verde sin necesidad de añadir otras sustancias [3]. Este hallazgo probó que *GFP* funcionaba como un indicador natural dentro de las células, una especie de linterna biológica que podía introducirse en casi cualquier organismo vivo, incluidas las plantas, donde hoy se utiliza como una herramienta para observar procesos celulares en tiempo real (Figura 2).

Más tarde, Roger Tsien perfeccionó la proteína y desarrolló versiones con distintos colores (amarillo, cian, rojo), lo que permitió seguir múltiples procesos celulares al mismo tiempo [4]. Este trabajo conjunto revolucionó la biología moderna, motivo por el cual en 2008 les fue otorgado a los tres científicos, Shimomura, Chalfie y Tsien el Premio Nobel de Química, por el descubrimiento y desarrollo de la proteína verde fluorescente, GFP.

A partir de entonces, los genes reporteros fluorescentes se convirtieron en una herramienta indispensable para estudiar la vida. En el caso de las plantas, su adopción fue un paso natural: los investigadores pudieron observar directamente cómo las raíces crecen, cómo las hojas responden al estrés o cómo un patógeno se propaga dentro de los tejidos vegetales.

¿Cómo funciona la magia fluorescente?

La luz verde que emite la proteína GFP no proviene de magia, sino de química y biología

Licenciamiento bajo el cual se publican los contenidos: CC BY-NC-ND 4.0

en acción. La proteína fluorescente contiene en su interior una estructura especial llamada cromóforo, formada por unos pocos aminoácidos que, al absorber luz ultravioleta o azul, emiten luz verde. Es un proceso muy similar al que ocurre con los colores fluorescentes insertados como elementos de seguridad en el reverso de todos los billetes de México que brillan al ser expuestas a la luz ultravioleta, pero aquí sucede dentro de una célula viva.

Para que una planta produzca esa proteína, los científicos primero deben introducir el gen *GFP* en el ADN de la planta mediante técnicas de biotecnología. Uno de los métodos más comunes consiste en usar una bacteria natural del suelo (*Agrobacterium tumefaciens*), que actúa como una "catapulta" capaz de transferir el gen a las células vegetales. Cuando la planta incorpora el gen, lo traduce y fabrica la proteína fluorescente como si fuera propia (Figura 3A).

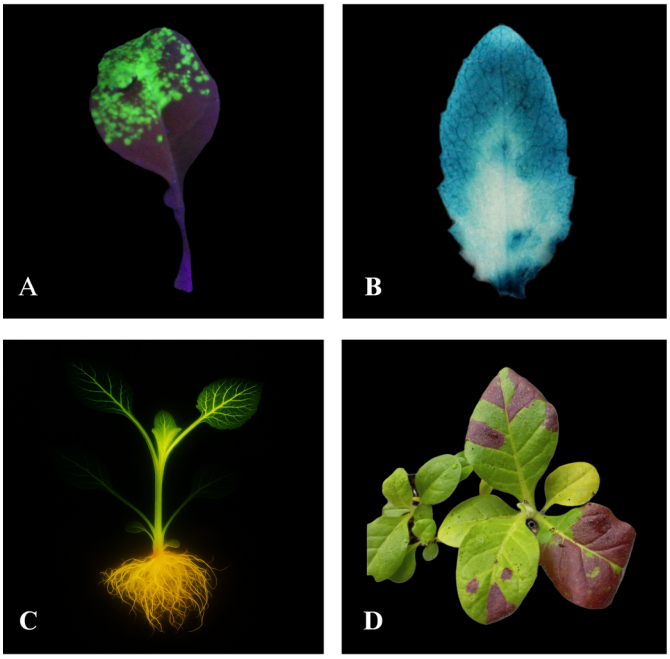


Figura 3. *Visualización de genes reporteros en plantas: (A) Sobreexpresión de GFP en hoja de Nicotiana benthamiana al ser expuesta en oscuridad a luz UV, en ensayos de transformación transitoria; (B) Actividad del reportero GUS en hoja de Arabidopsis thaliana, en el análisis de activación de un promotor inducido por auxina mediante tinción histoquímica azul (imagen adaptada de Guo et al., 2015, Frontiers in Plant Science, licencia CC BY 4.0); (C) luciferasa en Nicotiana tabacum utilizada para detectar la actividad de un gen mediante emisión de luz tras la adición de luciferina (imagen recreada a partir de Ow et al., 1986, Science); y (D) Acumulación de betalainas en hojas de Nicotiana tabacum debido a la sobreexpresión de RUBY.*

Al exponer las plantas transformadas con una lámpara de luz ultravioleta, las partes donde el gen está activo emiten una luz verde intensa. Así, los investigadores pueden observar directamente fenómenos invisibles: cómo se forman los tejidos, cómo se distribuyen las proteínas o qué zonas responden a una señal ambiental.

Otras luces y colores: más allá de la GFP

Después del éxito de la proteína GFP, los científicos comenzaron a crear proteínas fluorescentes de distintos colores, modificando su estructura o tomando genes de otras especies marinas. Hoy existe una auténtica paleta de fluorescencias:

- YFP (amarilla) y CFP (cian), ideales para estudiar dos procesos al mismo tiempo.
- RFP (roja), derivada de corales, útil para visualizar tejidos más profundos.

Además, existen otros genes reporteros no fluorescentes, pero igual de importantes, el gen *GUS*, proveniente de la bacteria *Escherichia coli* que codifica una enzima (β-glucuronidasa) que transforma un sustrato incoloro (X-Gluc) en un compuesto azul visible [5]. Esta reacción permite identificar los tejidos o zonas donde un gen está activo. En las plantas, el sistema GUS se ha convertido en una herramienta clásica para estudiar los promotores, regiones del DNA que controlan cuándo y dónde se activa un gen y analizar la expresión génica. Es decir, mediante este sistema es posible observar en qué tejidos (expresión espacial) y en qué momento del desarrollo, o bajo qué condiciones (expresión temporal) un gen está activo. Por ejemplo, se utiliza para evaluar qué partes de una planta expresan un gen bajo

Licenciamiento bajo el cual se publican los contenidos: CC BY-NC-ND 4.0

condiciones de estrés (Figura 3B). Su principal ventaja es su alta sensibilidad, bajo costo y facilidad de uso; sin embargo, la limitación más importante es que el ensayo es destructivo: el tejido debe sacrificarse para revelar la coloración.

Otro sistema reportero es la luciferasa (*LUC*), derivado de las luciérnagas, permite la detección de luz visible producida por una reacción bioluminiscente. La enzima luciferasa cataliza la oxidación de la luciferina, generando luz sin requerir excitación externa (Figura 3C). Este sistema permite estudiar la expresión génica en tiempo real, en tejidos vivos y sin destruir la muestra. En plantas, LUC se usa para investigar ritmos circadianos, regulación por hormonas, o respuesta a factores ambientales [6]. Aunque requiere añadir luciferina y equipo sensible para detectar la señal, su capacidad de monitoreo continuo lo hace invaluable. Con el tiempo, la biotecnología ha dado origen a nuevas variantes de luciferesas, incluso provenientes de hongos, que ofrecen mayor estabilidad y eficiencia luminosa, ampliando su aplicación en el estudio de organismos vegetales y sistemas complejos.

Uno de los sistemas reporteros más recientes es *RUBY*, en el que tres enzimas biosintetizan el pigmento natural betalaína, responsable del color rojo en algunas plantas capaces de producir este pigmento, como el betabel [7]. Cuando se introduce el sistema *RUBY* en un tejido vegetal, este se vuelve visiblemente rojo, lo cual puede observarse a simple vista, sin microscopio ni reactivos (Figura 3D). *RUBY* representa una nueva generación de genes reporteros visuales, de bajo costo y completamente no destructivos. Esta simplicidad convierte a RUBY en una herramienta ideal para identificar tejidos transformados. Lo cual permitirá avanzar rápidamente en el estudio de la biología de plantas, caracterización funcional de genes y mejoramiento genético.

Cada tipo de reportero tiene ventajas: los fluorescentes permiten observar células vivas en tiempo real, mientras que los enzimáticos ofrecen gran sensibilidad y precisión en experimentos a gran escala (Tabla 1). Gracias a esta diversidad, los científicos pueden combi-

Tabla 1. *Principales genes reporteros empleados en biotecnología vegetal y sus características.*

Gen reportero	Origen	Tipo de señal	Ventajas	Desventajas
GFP (green fluorescent protein)	*Aequorea victoria*	Fluorescencia verde bajo luz UV o azul	Permite observar células vivas; no requiere sustrato; alta resolución espacial. Localización celular.	Al observar en microscopio la autofluorescencia vegetal puede interferir.
GUS (β-glucuronidasa)	*Escherichia coli*	Colorimétrica; color azul tras reacción con X-Gluc	Alta sensibilidad; útil para estudios de expresión espacial.	Ensayo destructivo; no apto para seguimiento en tiempo real.
LUC (luciferasa)	*Photinus pyralis*	Bioluminiscencia (luz visible sin excitación externa) por luciferina	Permite medición en tiempo real y cuantitativa; no destructivo.	Requiere adición de luciferina; señal débil sin cámara sensible.
RUBY	Sistema sintético vegetal	Pigmento visible (betalaínas)	Señal visible a simple vista; no requiere equipo especializado ni sustratos exógenos.	No permite estudios de localización celular. Requiere de sustratos endógenos (tirosina) para la síntesis de betalaínas.

Licenciamiento bajo el cual se publican los contenidos: CC BY-NC-ND 4.0

nar colores y señales para “pintar” la actividad genética en las plantas para seguir el ritmo de la vida.

Genes reporteros en acción: ¿para qué se usan en plantas?

La expresión de genes está regulada por los promotores, que son regiones del ADN, ubicadas antes del gen, capaces de atraer la maquinaria celular necesaria para la transcripción del gen. Para saber en qué momento se expresa un gen son de utilidad los genes reporteros. Añadiendo un reportero como *GFP* a la secuencia de un promotor podemos identificar las condiciones espaciales y temporales en las cuales se activa la expresión del gen.

De esta forma se han identificado genes que aumentan su expresión bajo condiciones de estrés. Por ejemplo, en la Figura 4, se muestra como al agregar *GFP* después de un promotor que estemos estudiando, y someter la planta a condiciones de déficit hídrico se puede identificar si ese promotor regula un gen importante en la respuesta de la planta a la sequía. Es decir, los genes reporteros son como detectives del mundo molecular.

Gracias a estas herramientas es posible estudiar diversos procesos biológicos en plantas, como:

- Desarrollo vegetal: cómo se forman raíces, hojas o flores.
- Respuestas al ambiente: cómo las plantas reaccionan a la sequía, la salinidad o las infecciones.

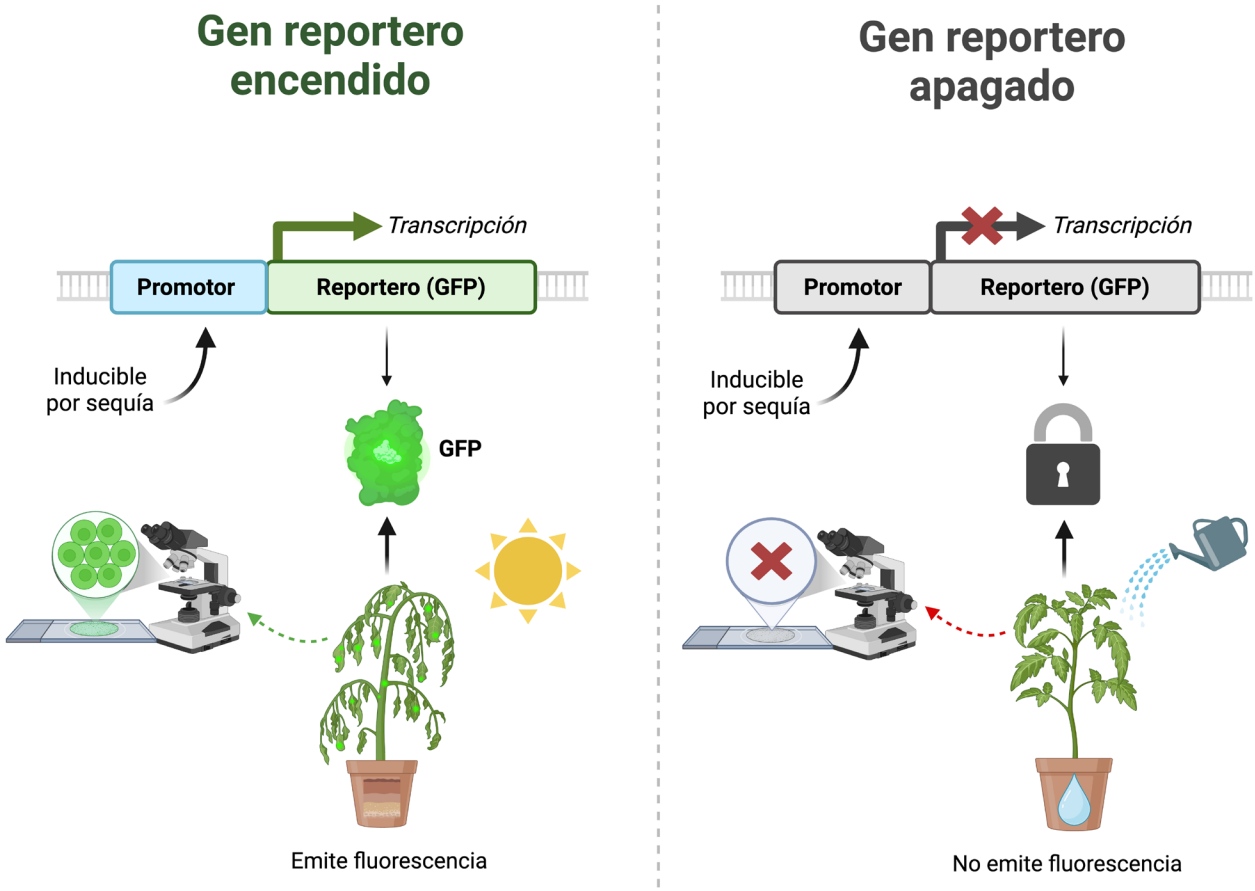


Figura 4. *Detección de la actividad de un promotor inducible mediante un gen reportero fluorescente (GFP).*

Licenciamiento bajo el cual se publican los contenidos: CC BY-NC-ND 4.0

- Interacciones planta-microorganismo: seguimiento de bacterias o hongos marcados con GFP.
- Optimización de protocolos de transformación genética: identificación de células que incorporaron ADN externo.

Del laboratorio al campo: contribuciones al mejoramiento vegetal

Más allá de su valor experimental, los genes reporteros son una herramienta clave para el mejoramiento genético. En la investigación agrícola moderna, se utilizan para:

- Verificar transformaciones exitosas: las células que brillan son las que incorporaron correctamente el nuevo gen.
- Evaluar promotores específicos: por ejemplo, promotores que sólo se activan en raíces o bajo calor extremo.

En cultivos como arroz, maíz o tomate, estos marcadores han ayudado a acelerar el desarrollo de plantas resistentes a enfermedades, más productivas o adaptadas a condiciones difíciles. Además, al reemplazar marcadores antibióticos por genes reporteros fluorescentes, se logra una biotecnología más segura y ambientalmente responsable.

Conclusiones

Desde una medusa marina hasta un invernadero moderno, la historia de los genes reporteros muestra cómo la curiosidad puede transformar la ciencia. Los genes reporteros permiten visualizar lo invisible: el lenguaje genético que dirige cada etapa de la vida vegetal.

Gracias a ellos, hoy sabemos cuándo una planta siente sed, cómo responde al calor o cómo se defiende ante un hongo. Los genes reporteros simbolizan el poder de la observación, la imaginación y la colaboración científica, recordándonos que, en ciencia, la curiosidad siempre enciende la luz del conocimiento.

Referencias

[1] Súnico V, Piunti I, Bhattacharjee M, Mezzetti B, Caballero JL, Muñoz-Blanco J, et al. Overview on Current Selectable Marker Systems and Novel Marker Free Approaches in Fruit Tree Genetic Engineering. *Int J Mol Sci* 2024;25. https://doi.org/10.3390/ijms252211902

[2] Shimomura O, Johnson FH, Saiga Y. Extraction, Purification and Properties of Aequorin, a Bioluminescent Protein from the Luminous Hydromedusan, Aequorea. *J Cell Comp Physiol* 1962;59:223–39. https://doi.org/10.1002/jcp.1030590302

[3] Chalfie M, Tu Y, Euskirchen G, Ward WW, Prasher DC. Green Fluorescent Protein as a Marker for Gene Expression. *Science* (1979) 1994;263:802–5. https://doi.org/10.1126/science.8303295

[4] Tsien RY. The green fluorescent protein. *Annu Rev Biochem* 1998;67:509–44. https://doi.org/10.1146/annurev.biochem.67.1.509

[5] Jefferson RA, Kavanagh TA, Bevan MW. GUS fusions: beta-glucuronidase as a sensitive and versatile gene fusion marker in higher plants. *EMBO J* 1987;6:3901–7. https://doi.org/10.1002/j.1460-2075.1987.tb02730.x

[6] Millar AJ, Short SR, Hiratsuka K, Chua N-H, Kay SA. Firefly luciferase as a reporter of regulated gene expression in higher plants. *Plant Mol Biol Report* 1992;10:324–37. https://doi.org/10.1007/BF02668909

[7] He Y, Zhang T, Sun H, Zhan H, Zhao Y. A reporter for noninvasively monitoring gene expression and plant transformation. *Hortic Res* 2020;7. https://doi.org/10.1038/s41438-020-00390-1

Licenciamiento bajo el cual se publican los contenidos: CC BY-NC-ND 4.0

Recibido: 16-abr-2026 Aceptado: 22-jun-2026 e-ISSN 2954-4890

Sección: *¿Cómo funciona?*

El mundo a través de una hoja de luz: La microscopía lightsheet

The world through a sheet of light: Lightsheet microscopy

*Gonzalo González-Domínguez[1]**
Javier Rodrigo Prado-Baeza[2]

[1]Posgrado de ciencias bioquímicas de la UNAM.
[2]Posgrado de ciencias biológicas de la UNAM.

**Autor para la correspondencia: gonzalo030793@gmail.com*

RESUMEN

La curiosidad humana siempre nos ha impulsado a querer saber más del mundo que nos rodea, particularmente sobre aquello que escapa a nuestra visión, ver el mundo microscópico siempre ha sido algo de gran interés para nosotros. Esto nos llevó a la creación de una herramienta maravillosa, conocida como microscopio, el cual a lo largo del tiempo se ha evolucionado, adquiriendo una sin fin de aplicaciones, y quizá, entre los microscopios más avanzados hoy día, encontramos al microscopio lightsheet, una herramienta sumamente útil en el campo de la biomedicina y del cual se hablará más a fondo en este trabajo.

Palabras clave: Microscopía, lightsheet, biomedicina.

SUMMARY

Human curiosity has always driven us to learn more about the world around us, particularly about what lies beyond our vision. Observing the microscopic world has always been of great interest to us. This led to the creation of a remarkable tool known as the microscope, which over time has evolved, acquiring countless applications. Among the most advanced microscopes today is the light-sheet microscope, an invaluable tool in the field of biomedicine, which will be discussed in greater detail in this work.

Keywords: Microscopy, lightsheet, biomedicine.

Licenciamiento bajo el cual se publican los contenidos: CC BY-NC-ND 4.0

Introducción

Los humanos somos curiosos por naturaleza, siempre estamos tratando de saber más de todo lo que nos rodea, tocamos, probamos, escuchamos, pero sobre todo observamos. Nuestros ojos son nuestra mayor fuente de información. Gracias a ellos, logramos apreciar todo nuestro entorno, desde un pequeño grano de sal hasta la gran luna que nos cuida por la noche. Sin embargo, tienen un límite, y con el fin de superarlo, hemos desarrollado herramientas fantásticas que nos permiten "ver más allá de lo evidente".

Los planetas, estrellas y galaxias; todo eso que está fuera de nuestro planeta, muy lejos en el cosmos, lo observamos gracias a algo llamado telescopio. Sin embargo, ¿qué hay acerca de todo ese universo tan pequeño que escapa a nuestra visión? El mundo microscópico se abrió ante nosotros con la llegada del microscopio, un aparato que utilizaba un sistema de lentes simple y las propiedades básicas de la luz, para permitirnos ver cosas tan pequeñas como una bacteria.

Desde su invención, cerca del siglo XVI, y su perfeccionamiento por Antonie Van Leeuwenhoek, en el siglo XVII, el microscopio ha cambiado drásticamente, innovándose, utilizando nuevas tecnologías e integrándose en su desarrollo para ampliar su capacidad de aplicaciones. Esta innovación constante ha dado como resultado el surgimiento de diferentes tipos de microscopios que sirven para alcanzar múltiples objetivos. Esto permitió el desarrollo de diferentes técnicas de microscopía útiles en diferentes campos del conocimiento, por ejemplo: de campo claro, electrónica, de fluorescencia, confocal y de superresolución.

Dentro de las técnicas de microscopía más versátiles actualmente, destaca la microscopia conocida como microscopía de iluminación por plano selectivo o de hoja de luz, a la que nos referiremos como microscopia lightsheet, la cual tiene aplicaciones en geología, diferentes ramas de la biología, como biología celular y biología del desarrollo, y diferentes ramas de la biomedicina, como búsqueda de biomoléculas de importancia diagnóstica, determinación de poblaciones celulares en una muestra, visualización de estructuras internas de tumores y muchas más. Esta variedad de aplicaciones que tiene la microscopía lightsheet la hace una herramienta sumamente valiosa actualmente, pero ¿cómo funciona? ¿Qué es la microscopía lightsheet? ¿Por qué llama tanto la atención? Acompáñennos a averiguarlo.

El poder de la luz en la palma de nuestras manos

El microscopio es un instrumento que nos permite observar cosas diminutas o aquellas que no podemos observar a simple vista. El microscopio más sencillo actualmente es el microscopio óptico compuesto (figura 1), denominado así por usar 3 sistemas de lentes y una fuente de luz artificial (llámese también lámpara) para realizar la amplificación de la imagen, dando como resultado un mayor aumento. Estos tres sistemas son: el condensador, el cual concentra y regula los rayos de luz de la lámpara; los objetivos, un conjunto de lentes que se encargan de captar la luz una vez que esta incide en la muestra y generan la imagen; finalmente, los oculares, los cuales se encargan de formar una segunda imagen, y a través de los cuales podemos observar la imagen amplificada.

El funcionamiento básico es el siguiente: la muestra se coloca en la platina y es iluminada por un haz de luz blanca generado por la lámpara y concentrado gracias al condensador. La luz pasa por la muestra y es captada por los objetivos que generan una primera imagen aumentada. La luz sigue su camino y llega a los oculares donde es nuevamente captada y se genera una segunda imagen amplificada.

Licenciamiento bajo el cual se publican los contenidos: CC BY-NC-ND 4.0



Figura 1. *Componentes generales de un microscopio óptico compuesto.*

Es en este punto en donde nosotros podemos ver la imagen. Algo importante es que la luz, a pesar de ser concentrada por el condensador, ilumina toda la muestra y no puede ser dirigida sólo a una parte de esta.

El desarrollo del microscopio óptico compuesto fue un gran avance científico y nos ha permitido desarrollar otro tipo de microscopías que aprovechan otras propiedades de la luz, como, por ejemplo, la fluorescencia. La fluorescencia es el proceso en el que una sustancia tiene la propiedad de absorber y liberar (emitir) luz casi inmediatamente. Esta luz liberada puede ser captada y detectada por diferentes instrumentos, y gracias a esta propiedad, hemos aprendido a usarla para nuestro beneficio en la microscopía de fluorescencia para poder observar estructuras o moléculas específicas de nuestro interés con mayor facilidad.

Los microscopios de fluorescencia se consideran microscopios ópticos modificados. La fuente de luz no es una lámpara de luz blanca, sino una luz LED, lámpara de mercurio, lámpara de xenón o láser, capaz de producir luz que permita que las moléculas fluorescan. Esta luz pasa por un filtro que hace que solo cierta parte de esta se dirija hacia la muestra, a través del sistema de objetivos. Este sistema concentra la luz sobre la muestra y a la vez capta la fluorescencia emitida por la muestra para generar la imagen. La luz emitida es filtrada por un segundo filtro, el cual permite pasar solo la luz liberada por la muestra hacia los oculares, para finalmente observar la señal fluorescente en la muestra.

La microscopía de fluorescencia convencional es conocida como microscopía de epifluorescencia, donde la luz incide en una gran parte de la muestra, aun en las zonas que no entran dentro del campo de visión de los oculares, dañándose y comprometiendo la calidad de la imagen total. La iluminación de toda la muestra le genera diversos daños. El primero es conocido como fototoxicidad, un daño a la muestra producido por la luz, causado por la generación espontánea de moléculas conocidas como radicales libres, las cuales son capaces de degradar diferentes componentes celulares. Otro de los daños es el fotoblanqueo, que consiste en la degradación irreversible de moléculas capaces de emitir fluorescencia (fluoróforos), debido a una exposición prolongada de estas moléculas a la luz, causando que los fluoróforos pierdan su capacidad de

Licenciamiento bajo el cual se publican los contenidos: CC BY-NC-ND 4.0

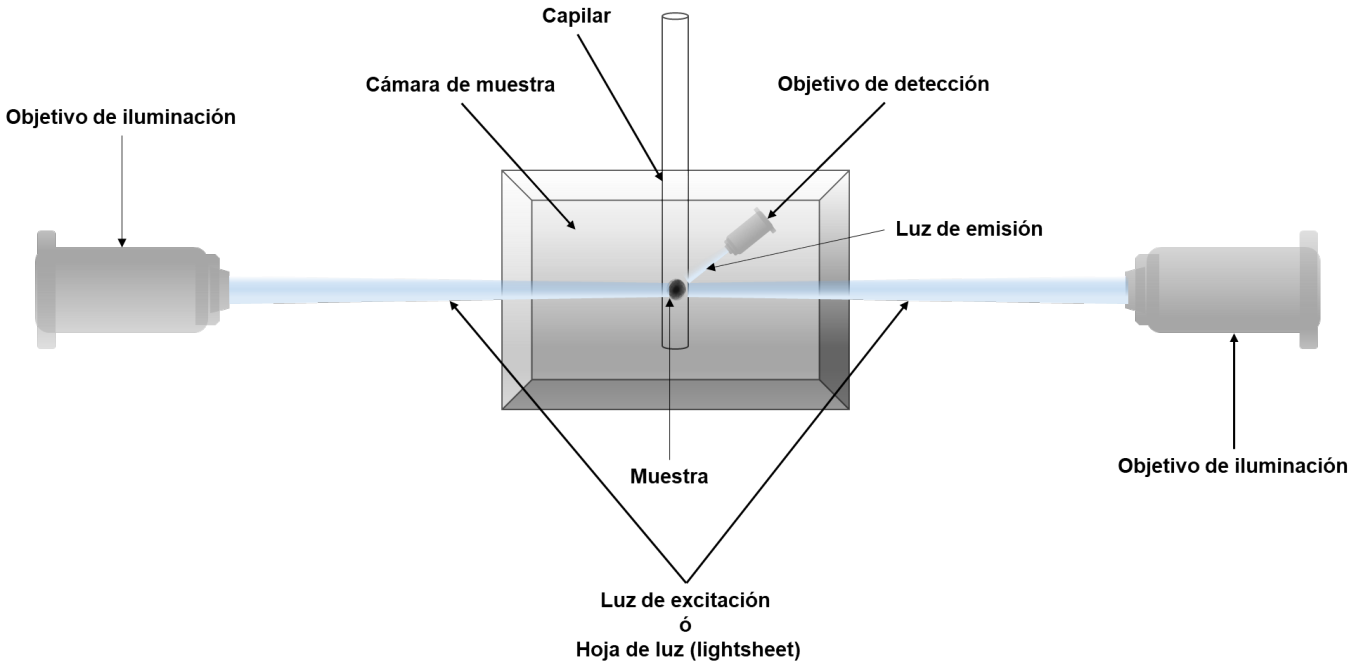


Figura 2. *Esquema general del sistema de objetivos de un microscopio lightsheet. Se muestran los diferentes componentes básicos para la observación de una muestra. Un microscopio de hoja de luz puede tener uno o más objetivos de iluminación , los cuales son los encargados de generar el haz de luz, Estos objetivos están posicionados uno frente al otro, de tal manera que iluminan planos opuestos de la muestra a observar. El capilar es un dispositivo utilizado para contener la muestra de interés, está hecho de un gel especial que fija a la muestra sin dañarla, y se ubica dentro de la cámara de la muestra, una pequeña cámara metálica diseñada para que en ella embonen los diferentes objetivos, esta cámara se llena con un líquido (agua o alguna solución) que en conjunto con el capilar tienen un índice de difracción igual, evitando que el haz de luz se distorsione y afecte la captura de la imagen. El objetivo de detección se encuentra en un ángulo de 90° con respecto al o a los objetivos de iluminación y capta la luz emitida por la muestra contenida en el capilar.*

emitir la luz en una diferente longitud de onda.

Para remediar este problema surgieron adaptaciones en los microscopios, dando lugar a otras tecnologías como lo es la microscopía confocal y más actualmente la microscopía lightsheet. que tratan de evitar la iluminación completa. La microscopía confocal, cuya aplicación es la visualización de muestras fluorescentes, ha optado por utilizar un sistema de iluminación por láser y la integración de un sistema que permite controlar el paso del haz de luz, estas adecuaciones reducen el área de la muestra expuesta a la luz, y se reduce la fototoxicidad y el fotoblanqueo, logrando obtener imágenes nítidas, aumentando la resolución. Es importante resaltar que este tipo de microscopía permite reconstruir una imagen de la muestra en 3 dimensiones, debido a un método de captura de imágenes en el cual se hace un escaneo de la muestra generando "rebanadas ópticas", que después serán utilizadas para una reconstrucción de la muestra generando la imagen.

Microscopía Lightsheet, más allá de la luz

Este es uno de los tipos de microscopía que más popularidad ha tenido en los últimos años debido a su gran poder de resolución y a sus aplicaciones en diversos campos de estudio, no sólo en el área biológica o biomédica. Similar a la microscopía confocal en ciertos aspectos, la microscopía lightsheet ha revolucionado la manera en que visualizamos muestras de interés biológico, permitiéndonos obtener mucha mayor información de ellas.

El sistema de iluminación utilizado en la

Licenciamiento bajo el cual se publican los contenidos: CC BY-NC-ND 4.0

Tabla 1. *Microscopía lightsheet versus microscopía confocal.*

Características	Lightsheet	Confocal
Velocidad de captura	Rápida, por la disposición ortogonal de los objetivos.	Lenta, pues el seccionamiento y reconstrucción de la imagen se hace punto por punto.
Fototoxicidad	Mínima, solo en la zona expuesta a la luz.	Mayor, por la iluminación total del eje Z
Fotoblanqueo	Mínimo, sólo en la zona expuesta a la luz.	Mayor, por la iluminación total del eje z
Tipo de iluminación	Plano selectivo por la hoja de luz.	Campo amplio, se genera un cono de luz

microscopía lightsheet (figura 2) difiere de la microscopía convencional. Se basa en un sistema de objetivos con funciones distintas. Por un lado, uno de estos es el encargado de generar el haz de luz, este haz, es sumamente delgado, y tiene la particularidad de que sólo incide en una parte específica de la muestra que es iluminada, de ahí viene su nombre: microscopía de hoja de luz o de iluminación de plano selectivo. Al ser tan delgada la hoja de luz, debe moverse hacia arriba y hacia abajo de la muestra (eje Z) para poder hacer un escaneo y lograr visualizar toda la muestra de interés, por tal, esta iluminación selectiva implica un seccionamiento óptico generando "rebanadas" para una posterior reconstrucción 3D de la imagen.

El segundo objetivo tiene como finalidad capturar la luz emitida por la muestra posterior a ser iluminada. Está posicionado perpendicularmente con respecto al objetivo que es emisor de luz, exactamente a 90°. Este ángulo formado minimiza que la luz quede fuera de foco, garantizando una mayor resolución y nitidez de la imagen. Además de esto, esta microscopía es utilizada para visualizar muestras fluorescentes, gracias a la implementación de un sistema de filtros que se puede montar y desmontar con facilidad, haciendo de estos microscopios de lightsheet, equipos de gran utilidad.

Las ventajas de una hoja de luz

Es probable que aún con lo anterior, las ventajas de la microscopía lightsheet sigan sin quedar totalmente claras, sobre todo, cuando la comparamos con la microscopía confocal. La microscopía lightsheet tiene un mayor poder de resolución en el eje Z que la microscopía confocal; sin embargo, en cuanto a los ejes X e Y, la microscopía confocal es mejor; esto último debido a la manera en que la imagen es reconstruida en ambos sistemas. Además de esto, quizá la mayor ventaja de la microscopía lightsheet es la fototoxicidad y fotoblanqueo reducidos gracias a su sistema de iluminación selectiva, haciendo que las muestras puedan ser manipuladas por más tiempo, permitiendo que se lleven a cabo ensayos por largos periodos de tiempo. Otras de las ventajas de la iluminación selectiva se enlistan adelante, no sin antes recordar, que cada tipo de microscopía tiene su aplicación y su uso, de ahí que existan tantas, y sigan siendo utilizadas.

Esferoides

En el campo de la investigación para tratamientos contra el cáncer, una de las etapas realizadas en el laboratorio es experimentar con células derivadas de diferentes tipos de cáncer, las cuales denominamos líneas celulares. Estas células pueden proliferar prácticamente de forma ilimitada, y son usadas con múltiples propósitos. Algunas tienen la capacidad de formar estructuras tridimensionales pequeñas parecidas a una esfera, denominadas esferoides. Estos esferoides son parecidos en su organización estructural y metabolismo a los tumores sólidos, lo que los hace

Licenciamiento bajo el cual se publican los contenidos: CC BY-NC-ND 4.0

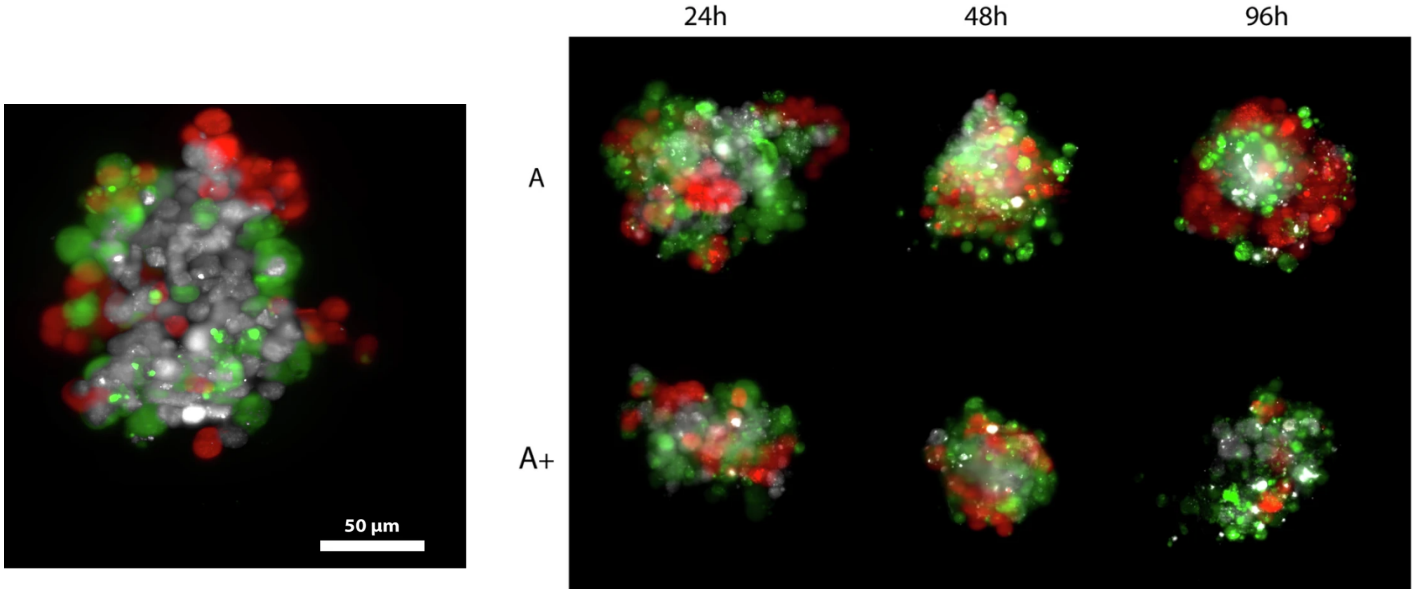


Figura 3. *Visualización de esferoides a través de la microscopía de hoja de luz. Efecto del fármaco (A) en la estructura del esferoide a lo largo del tiempo. En rojo se muestran las células tumorales, mientras que en verde y gris se muestran otro tipo de células que forman parte del esferoide. Tomado y modificado de Diosdi et al., Nature, 2025.*

muy útiles para estudiar y desarrollar nuevos fármacos para el tratamiento del cáncer, previo a usar modelos animales. No obstante, estudiarlos no es tan sencillo, y esto es debido a la limitante que presentan algunas herramientas o equipos para analizar estructuras en tres dimensiones, aun cuando su tamaño no sea mayor a algunos milímetros. Ahí es donde entra la microscopía de hoja de luz, la cual nos ha permitido superar numerosas limitaciones, como aumentar la penetración de la luz en la muestra, captar imágenes con mayor velocidad y provocar menos fototoxicidad, e iluminar la muestra desde diferentes ángulos.

Un ejemplo de cómo estos esferoides y la microscopía de hoja de luz se utilizan en la investigación es el siguiente. En un estudio publicado en 2025, a las y los investigadores les interesaba entender cómo los diferentes tipos de células que forman un tumor interactúan entre ellas, y a su vez, cómo las células del tumor interactúan con las células no tumorales. Con esta idea en mente, usaron varias líneas celulares de diferentes tipos de cáncer, así como, otros tipos de células no tumorales que participan en el desarrollo tumoral. Tiñeron las células con moléculas fluorescentes que liberaron luz captada en diferentes rangos del espectro visible, y analizaron la composición del esferoide a nivel celular con la microscopía de hoja de luz. Tal y como se muestra en la figura, este tipo de microscopio permitió determinar a nivel celular la composición del esferoide, determinada por colores para cada tipo de célula: tumorales (rojo) y no tumorales (gris y verde), y luego permitió hacer una reconstrucción tridimensional de la muestra (A), mostrando cómo se alteraba la formación de la estructura cuando añadieron algún fármaco anticancerígeno (A+) conforme pasaban los días.

De estructuras multicelulares sencillas a órganos y tumores completos

La microscopía de hoja de luz no solo se limita a poder adquirir imágenes de alta resolución de estructuras celulares complejas como los esferoides. Como segunda instancia, tiene la bon-

Licenciamiento bajo el cual se publican los contenidos: CC BY-NC-ND 4.0

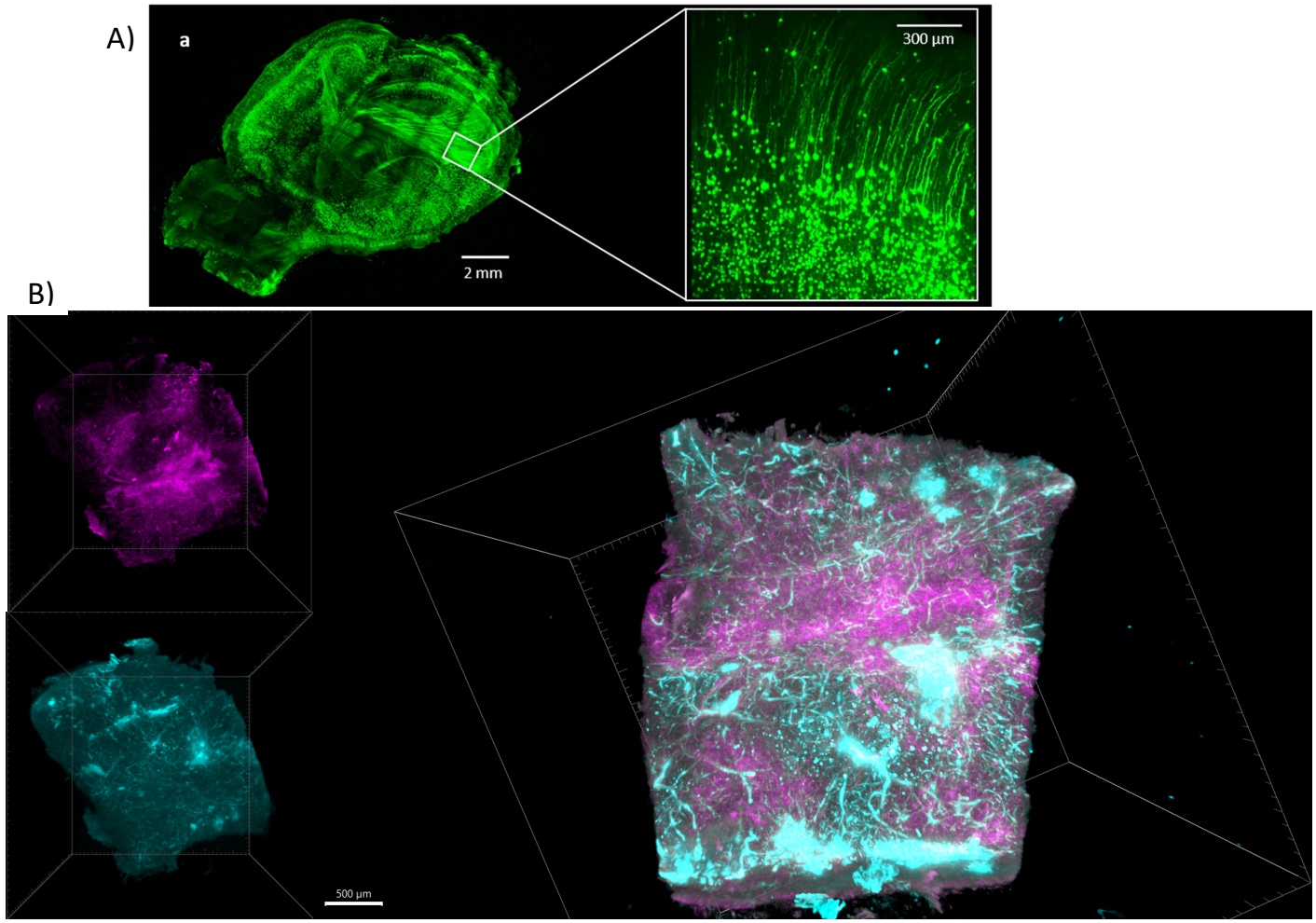


Figura 4. *Muestras de cerebro de ratón y tumor escaneados por microscopía de hoja de luz. A) Cerebro completo de ratón que expresa una proteína verde fluorescente. B) Tumor compuesto por células fluorescentes (cían) obtenido de un ratón infiltrado con células humanas (morado). Tomado y modificado de Di Giovanna et al., Nature, 2019.*

dad de capturar imágenes de órganos pequeños completos, así como muestras de tumores generados en algunos modelos animales, como ratones. De manera tradicional, las muestras de tejidos y tumores son cortadas en rebanadas muy delgadas, de un rango de grosor aproximado de 5 micrómetros, hasta aproximadamente 0.5 milímetros. Estas rebanadas evitan que podamos estudiar el tumor completo, haciendo que solo se pueda estudiar una porción limitada de una muestra de tumor. No obstante, la microscopía de hoja de luz permite observar el tumor completo, sin necesidad de cortarlo, siempre y cuando su tamaño no sea mayor a unos cuantos milímetros, de esta manera, podemos obtener detalles a nivel celular del tumor completo, o de algún cerebro obtenido de un ratón, por ejemplo.

En el laboratorio, realizamos un proyecto donde inyectamos células del sistema inmune humano a ratones, con el objetivo de que estas acabaran con un tumor que se indujo de forma artificial. Como parte de los resultados, evaluamos la capacidad de que las células humanas llegaran al tumor. En la figura pueden observar cómo hay zonas del tumor (cian) repletas de estas células (magenta).

De lo sencillo a lo complejo, escaneando peces y ratones completos

Por si escanear órganos pequeños com-

Licenciamiento bajo el cual se publican los contenidos: CC BY-NC-ND 4.0

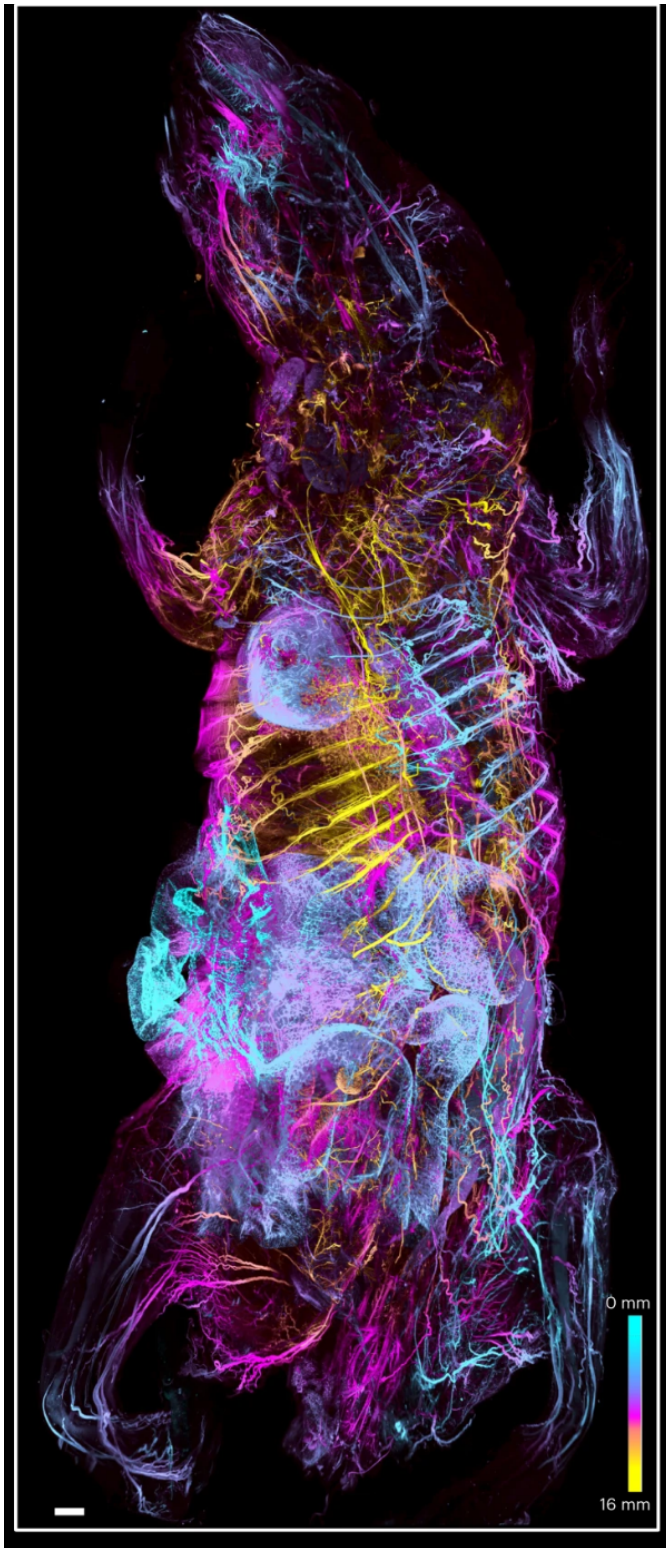


Figura 5. *Escaneo completo de un cuerpo de ratón a través de microscopía de hoja de luz. Distribución de una proteína implicada en el sistema nervioso central a través de todo el cuerpo de un ratón. Tomado y modificado de Mai et al., Nature, 2023.*

pletos o tumores les pareciera poco, las nuevas metodologías empleadas han permitido usar la microscopía de hoja de luz para poder obtener imágenes de organismos completos. Dentro de los modelos de estudio más utilizados en la ciencia se encuentran el pez cebra y, por supuesto, los ratones. Inicialmente, debido a su morfología y tamaño, los peces cebra eran los organismos por excelencia para estudiar con esta técnica. Sin embargo, en los últimos años se han desarrollado protocolos que permiten escanear ratones completos sin necesidad de separar o disectar órganos, no obstante, el trabajo con estas muestras requiere un paso adicional, que es la aclaración del tejido, para que haya una completa iluminación. En la figura se muestra un gradiente de colores que en su conjunto indica la presencia de una proteína implicada en el sistema nervioso del ratón.

Como podrán ver, la microscopía de hoja de luz nos permite seguir explorando un mundo microscópico a gran resolución que existe dentro del mundo macroscópico. Desde analizar muestras diminutas, como los esferoides, hasta poder escanear especímenes completos del tamaño de un ratón. Consideramos que es una herramienta sumamente poderosa con potencial de aplicación en diferentes ámbitos, como la biomedicina, permitiendo ir más allá de los límites y barreras a los que se enfrentan otras técnicas.

Referencias

[1] Diosdi A. et al. Single-cell light-sheet fluorescence 3D images of tumour-stroma spheroid multicultures. Sci Data. 2025 Mar 24;12(1):492.

[2] Di Giovanna A. et al. Whole-Brain Vasculature Reconstruction at the Single Capillary Level. Sci Rep. 2018 Aug 22;8(1):12573.

[3] Mai H. et al. Whole-body cellular mapping in mouse using standard IgG antibodies. Nat Biotechnol. 2024 Apr;42(4):617-627.

Licenciamiento bajo el cual se publican los contenidos: CC BY-NC-ND 4.0

Recibido: 15-jul-2025 Aceptado: 01-may-2026 e-ISSN 2954-4890

Sección: *¿Cómo funciona?*

¿Cómo 'traducimos' el ADN? La ciencia detrás de la lectura de nuestro código

How do we 'translate' DNA? The science behind reading our genetic code

*Valentín Pérez-Hernández**
Mario Hernández-Guzmán

Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada (CICESE), Baja California, México.

**Autor para la correspondencia: vperezhdez@hotmail.com*

RESUMEN

La información hereditaria, que nos transmiten nuestros padres biológicos, como la estatura o la predisposición a ciertas enfermedades, se almacena en el ADN de nuestras células. Nuestro ADN funciona como un manual de instrucciones escrito en un alfabeto de cuatro letras llamadas nucléotidos (adenina (A), citocina (C), guanina (G) y timina (T)), y que está protegido en el núcleo de cada célula: Para leerlo e interpretarlo requerimos de técnicas moleculares y cómputo avanzado (bioinformática); sólo así nos es posible entender las instrucciones para identificar posibles enfermedades hereditarias, y potencial uso de tratamientos tempranos.

Palabras clave: Bioinformática, secuenciación, salud humana.

SUMMARY

Hereditary information, such as height or predisposition to diseases, is contained in our DNA. DNA, made of four chemical building blocks called (A)denine, (C)ytose, (G)uanine, and (T)hymine, is stored safely inside the nucleus, a small compartment found in each cell. To read the "instructions" stored in DNA, scientists first collect it from cells, then use special tools and computers to examine the order of its building blocks to understand what the DNA says. The final goal is to identify whether our DNA have mutations associated with hereditary diseases, which in turn might enable future early human treatments.

Keywords: Bioinformatic, sequencing, human health.

Licenciamiento bajo el cual se publican los contenidos: CC BY-NC-ND 4.0

Introducción

El ADN se descubrió a finales del siglo XIX, sin embargo, su estructura en espiral o doble hélice no fue descrita hasta 1953 gracias al trabajo de Rosalind Franklin, Watson y Crick. Hoy en día, el ADN se ha convertido en una herramienta cotidiana con su regular empleo que va desde la detección temprana de enfermedades y pruebas de paternidad, hasta su aplicación en asuntos forenses (resolución de crímines). Esto nos lleva a preguntas fascinates: ¿qué es el ADN? ¿cómo leemos la información que resguarda? y, más importante aún, ¿cómo podemos interpretarla?

El ADN está contenido en las células de todos los organismos vivos, desde los microscópicos como las bacterias y arqueas, hasta animales, plantas y hongos. El ADN contiene la información necesaria para el desarrollo y funcionamiento de los seres vivos [1]. Es una molécula compleja (o "macromolécula"), cuya composición está basada en cuatro moléculas referidas como "nucleótidos": adenina (A), citosina (C), guanina (G) y timina (T); estos se emparejan de manera complementaria: la adenina se une con timina (A–T), y la guanina con citosina (G–C), formando una estructura de doble hélice (Figura 1). El orden específico de los nucleótidos (secuencia) determina nuestros genes, las instrucciones para construir y mantener a una célula viva, y el conjunto de todos ellos conforma nuestro genoma. Para darnos una idea, dos genes de importancia mayor en los seres humanos son "BRCA1" (por sus siglas en inglés: "*breast cancer gene* 1") y "BRCA2". Ambos están involucrados en la producción de proteínas que reparan errores en el ADN; en caso de daño, errores, o ausencia de alguno, aumenta la probabilidad de desarrollar diferentes tipos de cáncer, por ejemplo, cáncer de mama [2].

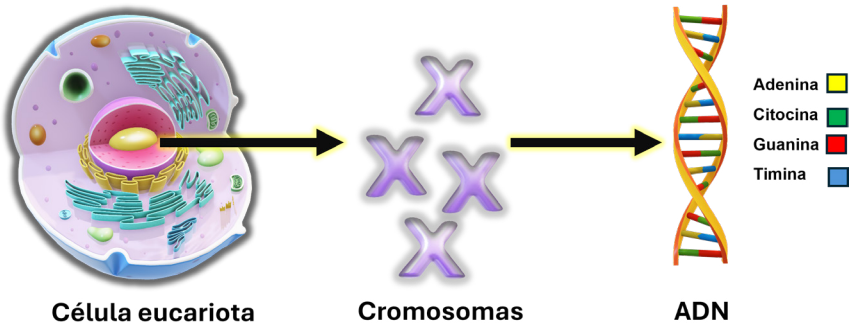


Figura 1. *La célula y la estructura de doble hélice de su ADN. Diagrama de localización de los cromosomas y el ADN en el núcleo de una célula eucariota.*

El ADN está dentro de las células, pero ¿cómo logramos sacarlo de ahí con el mínimo daño?

El ADN se encuentra en el núcleo de las células eucariotas o en el nucleoide en las células procariotas. Para poder recuperarlo, se suelen emplear diversos compuestos químicos que permiten la ruptura de la célula y liberación del ADN (Figura 2). Al romper la membrana, que está conformada por lípidos, fosfolípidos y proteínas, se liberan los organelos celulares, y moléculas varias; esta mezcla se conoce como debris o residuos celulares. Estos residuos necesitan ser eliminados para poder separar el material genético necesario. En este paso logramos "purificar" el ADN, recuperándolo con la menor cantidad de contaminantes posibles.

Comercialmente se pueden adquirir *kits* (conjunto de reactivos y material de plástico de uso en biología molecular) que permiten la extracción semi-automatizada del ADN. La elección de éste depende del tipo de material biológico inicial que se está manejando; por ejemplo, para extraer ADN de células (o una muestra) de cabello o tejidos se puede usar el "Kit de extracción de tejido y cabello" de la empresa Promega. Por su parte, para la extracción de ADN de células bacterianas se puede usar el kit para ADN genómico bacteriano "GenElute" de la empresa Sigma-Aldrich.

Licenciamiento bajo el cual se publican los contenidos: CC BY-NC-ND 4.0

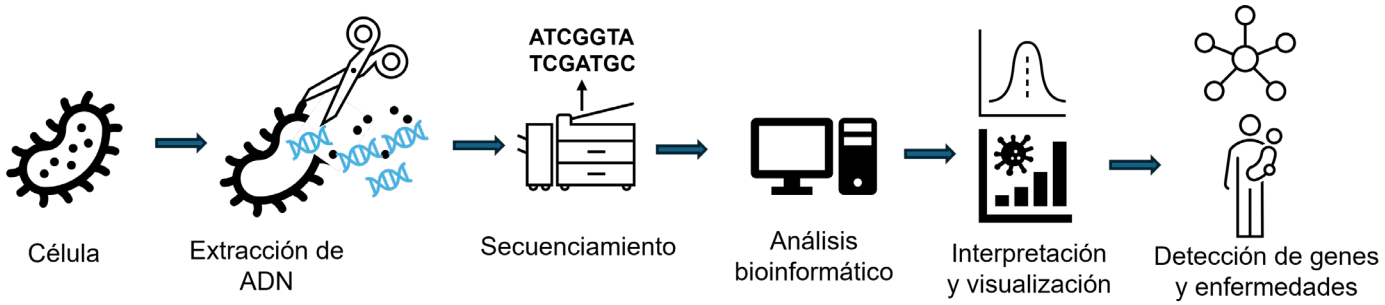


Figura 2. *Flujo general del procesamiento para análisis de ADN: desde una célula (o cultivo), hasta su análisis e interpretación. El diagrama simplifica cómo a apartir de una célula (o tejido) logramos extraer el DNA, secuenciarlo, analizarlo e interpretarlo.*

Leyendo el ADN ¿Qué nos dicen los "nucleótidos"?

Tras obtener el material genético de un organismo, o de una muestra biológica (tejido, cabello, de un hospedero o del ambiente), el siguiente paso es procesarlo para conocer el orden (o secuencia) exacto de los nucleótidos. Este proceso es conocido como secuenciación y se lleva a cabo en equipos conocidos como secuenciadores, quienes emplean un proceso similar al de la replicación biológica del ADN [3].

En la actualidad, compañías como Illumina®, Oxford Nanopore™ Technologies, y Pacific Biosciences® (PacBio) dominan el mercado global de tecnologías de secuenciación. La secuenciación es un proceso que varía dependiendo de la plataforma y tecnología empleados. Por ejemplo, una de las razones para seleccionar una plataforma es el tamaño de gen objetivo o la aplicación o fin del porqué se está secuenciando (por ej. la secuenciación del genoma completo de un microorganismo, o la identificación taxonómica de un microorganismo o grupo microbiano mediante uno o más genes).

La información genómica está formada desde decenas a millones de nucleótidos que se almacenan en archivos de texto plano denominados archivos "FASTA" o "FASTQ" [4]. Esta información no puede ser leída con herramientas computacionales comunes. Son archivos con gran tamaño regularmente, que van desde los megabytes (MB) hasta los gigabytes (un GB es aprox. 1024 MB) por unidad, y dependiendo su tamaño, puede contener una cantidad enorme de información que suele congelar herramientas como Microsoft© Word o el block de notas en una computadora personal. Para poder acceder, leer y traducir las secuencias de ADN contenida en estos archivos requerimos programas especializados; ¡aquí da inicio parte del área de la "bioinformática"!

De letras (nucleótidos) a funciones y taxones con ayuda de la bioinformática

A través de la bioinformática logramos traducir los patrones del ADN (ATGC---TGAT--GGCAT..., etc), o secuencias de nucleótidos (A, T, G, C), a información entendible por el humano. En este paso podemos identificar una secuencia y averiguar que función cumple o qué gen es, por ejemplo, puede ser una región que codifica una enzima o proteína. Este proceso es conocido como "anotación"; si identificamos uno o más genes funcionales, le decimos "anotación funcional". Si anotamos o identificamos un grupo taxonómico, le llamamos "anotación taxonómica". En la actualidad, existen diferentes programas (y metodologías) bioinformáticas para analizar secuencias de ADN. Herramientas como SPAdes, CANU, Kraken2, Prodigal, y RStudio son algunos ejemplos de software que se emplean

Licenciamiento bajo el cual se publican los contenidos: CC BY-NC-ND 4.0

para analizar ambos tipos de anotación. En este sentido, es importante visualizar que estas herramientas se emplean sobre datos de ADN ya secuenciados, es decir, un paso previo a la interpretación biológica final.

Para lograr la anotación, las secuencias son comparadas contra otras ya conocidas y que están almacenadas en bases de datos públicas (ver Tabla 1); este proceso, que se repite con cada una de nuestras miles (hasta millones) de secuencias, es conocido como "alineamiento" y se basa en la búsqueda de homologías (similitud) entre las secuencias ya conocidas en las bases de datos y nuestra secuencia desconocida o de interés. El alineamiento de un número grande de secuencias contra una base de datos de referencia, que también suele ser grande, es un proceso exhaustivo que requiere software especializado y gran esfuerzo computacional, es decir, equipo de cómputo con grandes niveles de procesamiento (memoria RAM y número de procesadores) y almacenamiento.

Mediante alineamientos múltiples logramos entonces identificar casos especiales. Por ejemplo, para identificar la secuencia de los 23 pares de cromosomas humanos (proyecto conocido como "Genoma humano", en el año 2003) se necesitó de cerca de 13 años para su éxito; este dio inició en 1990 y finalizó en 2003. Para lograr su ensamble y anotación, se necesitó de supercomputadoras con más de 500 procesadores, y de forma global, el proyecto tuvo un costo aproximado de $2,700 millones de dólares [5].

Actualmente, las tecnologías de secuenciación han reducido su costo substancialmente que, a su vez, ha permitido ampliar las áreas de estudio en biología molecular y (bio) medicina. Además, dichas tecnologías han mejorado en las últimas décadas. Como ejemplo, en los años 1990 se empleaba como única tecnología la secuenciación conocida como "Sanger". Ésta fue substituida por la secuenciación de nueva generación ("NGS", por sus siglas en inglés: *next generation sequencing*) como la "pirosecuenciación" (454 *Life Sciences sequencing*) en 2005 y posteriormente por Oxford Nanopore en 2014 [6].

Tabla 1. *Bases de datos publicas empleados en el análisis de secuencias de ADN.*

Base de datos	País	Tipo de datos biológicos	Página web
GenBank (NCBI)	EE.UU.	ADN, ARN y proteínas	https://www.ncbi.nlm.nih.gov/genbank/
UniProt (EMBL-EBI)	Suiza	Secuencias y funciones de proteínas	https://www.ebi.ac.uk/uniprot/index
ClinVar (NCBI)	EE.UU.	Variantes genéticas y su relación con enfermedades	https://www.ncbi.nlm.nih.gov/clinvar/
dbSNP (NCBI)	EE.UU.	Polimorfismos de un sólo nucleótido (SNPs)	https://www.ncbi.nlm.nih.gov/snp/
GISAID	Internacional	Datos genómicos de virus de la influenza	https://gisaid.org/

Las bases de datos de referencia usadas en los análisis bioinformáticos contienen la información de los genes (o genomas completos) de un número grande de organismos (incluyendo bacterias, animales, plantas, hongos, eucariontes microscópicos, etc.) que los científicos alrededor del mundo han estudiado, secuenciado y publicado hasta la actualidad. En caso de que las secuencias que estamos estudiando correspondan a un nuevo organismo, como lo fue el virus causante de COVID-19, estas se comparan con las variantes más cercanas y se propone un nuevo organismo (o virus, como fue el caso). Para identificar el virus causante de COVID-19, primero se obtuvieron muestras biológicas de personas con síntomas de la enfermedad (p. ej. exudados nasofaríngeos) para así recuperar el material genético viral para posterior secuenciación. En algunos casos, el virus fue previamente cul-

Licenciamiento bajo el cual se publican los contenidos: CC BY-NC-ND 4.0

tivado (con el fin de enriquecer la carga viral) en distintas líneas celulares para su posterior análisis [7]. Al comparar, mediante alineamiento con variantes de virus cercanas y virus ya conocidos como el SARS-CoV-1 (cuyas siglas en inglés se traducen como "síndrome respiratorio agudo grave"), se detectó que era una nueva variante y se nombró SARS-CoV-2 [8]. Los genomas de los virus de SARS-CoV-2 se publicaron en bases de datos públicas como GISAID o GenBank (Cuadro 1).

Conclusión: unión de la biología molecular y la bioinformática

La bioinformática ha permitido la identificación y estudio de una gran variedad de microorganismos, genes y enzimas de interés para la humanidad. Esta disciplina está en constante crecimiento con la creación de nuevos programas y algoritmos para mejorar el proceso de análisis. Se espera que, en un futuro próximo, a través del secuenciamiento y análisis del ADN humano, se logre personalizar tratamientos médicos y la posible prevención de enfermedades. La adición, y actualización, de herramientas con inteligencia artificial (p. ej. AlphaFold-3) permitiría el modelado y síntesis de nuevas proteínas y fármacos *in silico*.

Referencias

[1] Bencurova, E., Akash, A., Dobson, R. C. J., & Dandekar, T. (2023). DNA storage—From natural biology to synthetic biology. *Computational and Structural Biotechnology Journal*, 21, 1227–1235. https://doi.org/10.1016/j.csbj.2023.01.045

[2] Oh, M., McBride, A., Yun, S., Bhattacharjee, S., Slack, M., Martin, J. R., Jeter, J., & Abraham, I. (2018). BRCA1 and BRCA2 Gene Mutations and Colorectal Cancer Risk: Systematic Review and Meta-analysis. *JNCI: Journal of the National Cancer Institute*, 110(11), 1178–1189. https://doi.org/10.1093/jnci/djy148

[3] Tan, S. C., & Yiap, B. C. (2009). DNA, RNA, and Protein Extraction: The Past and The Present. *BioMed Research International*, 2009(1), 574398. https://doi.org/10.1155/2009/574398

[4] Pucker, B., Schilbert, H. M., & Schumacher, S. F. (2019). Integrating Molecular Biology and Bioinformatics Education. *Journal of Integrative Bioinformatics*, 16(3). https://doi.org/10.1515/jib-2019-0005

[5] Hood, L., & Rowen, L. (2013). The Human Genome Project: Big science transforms biology and medicine. *Genome Medicine*, 5(9), 79. https://doi.org/10.1186/gm483

[6] Satam, H., Joshi, K., Mangrolia, U., Waghoo, S., Zaidi, G., Rawool, S., Thakare, R. P., Banday, S., Mishra, A. K., Das, G., & Malonia, S. K. (2023). Next-Generation Sequencing Technology: Current Trends and Advancements. *Biology*, 12(7). https://doi.org/10.3390/biology12070997

[7] Wurtz, N., Penant, G., Jardot, P., Duclos, N., & La Scola, B. (2021). Culture of SARS-CoV-2 in a panel of laboratory cell lines, permissivity, and differences in growth profile. *European Journal of Clinical Microbiology & Infectious Diseases*, 40(3), 477–484. https://doi.org/10.1007/s10096-020-04106-0

[8] Zhu Na, Zhang Dingyu, Wang Wenling, Li Xingwang, Yang Bo, Song Jingdong, Zhao Xiang,et al. (2020). A Novel Coronavirus from Patients with Pneumonia in China, 2019. *New England Journal of Medicine*, 382(8), 727–733. https://doi.org/10.1056/NEJMoa2001017

Licenciamiento bajo el cual se publican los contenidos: CC BY-NC-ND 4.0

Recibido: 05-feb-2026 Aceptado: 03-jun-2026 e-ISSN 2954-4890

Sección: *¿Cómo funciona?*

Aplicaciones de los surfactantes producidos por bacterias

Applications of surfactants produced by bacteria

Luis Alfonso Cruz Acevedo[1]
Eric Pascal Houbron[2]*
Michel de la Cruz Canul Chan[2]†

[1]*Departamento de Bioprocesos, UPIBI-IPN, Ciudad de México, México.*
[2]*Laboratorio de Gestión y Control de la Contaminación Ambiental. FCQ, Universidad Veracruzana, Veracruz, México.*

†*En reconocimiento a la contribución del Dr. Michel de la Cruz Canul Chan, fallecido antes de la publicación de este artículo.*

**Autor para la correspondencia: ehoubron@uv.mx*

RESUMEN

Los surfactantes son moléculas utilizadas en productos de limpieza por su capacidad para eliminar grasas y suciedad hidrofóbica, por lo que forman parte de detergentes empleados en usos cotidianos. Sin embargo, muchos se producen a partir de derivados del petróleo y pueden causar impactos ambientales, como proliferación de algas y bacterias en ambientes acuáticos, así como emisiones de gases de efectos invernaderos. Ante ello, los biosurfactantes producidos por organismos vivos, como bacterias, representan una alternativa viable a los surfactantes convencionales, al presentar propiedades similares, ser biodegradables, biocompatibles y ambientalmente amigables. También contribuyen a remover contaminantes presentes en agua y suelo.

Palabras clave: Surfactantes, bacterias, biológicos detergentes.

SUMMARY

Surfactants are molecules used in cleaning products because of their ability to remove grease and hydrophobic contaminant making them part of everyday detergents. However, many are produced from petroleum-derived compounds, and made cause environmental impacts, such as proliferation of algae and bacteria in aquatic ecosystems as well as greenhouse gases emissions. For this reason, biosurfactants produced by living organisms such as bacteria can be considered an alternative to conventional surfactants, since they possess similar properties. In addition, they are biodegradable, biocompatible, and environmentally friendly. Their main applications include contribution to the removal of pollutants from water and soil.

Keywords: Surfactants, bacteria, biological detergents.

Licenciamiento bajo el cual se publican los contenidos: CC BY-NC-ND 4.0

Los surfactantes

Los surfactantes son compuestos ampliamente utilizados en productos de limpieza gracias a su capacidad para facilitar la eliminación de grasas, aceites y otro tipo de suciedad que no se disuelven fácilmente en el agua [1]. La palabra surfactante proviene del término en inglés *surface active agent*, que significa "agente activo de superficie". Este nombre hace referencia a la capacidad de estas sustancias para actuar sobre la superficie de los líquidos y debilitar la fuerza con la que sus moléculas se mantienen unidas. Al disminuir la tensión superficial del agua, permiten que esta entre en contacto con la grasa y la suciedad hidrofóbica (que no se mezcla con el agua), facilitando su eliminación durante la limpieza. Muchos surfactantes químicos se fabrican a partir de moléculas derivadas del petróleo como benceno, propileno o etileno, combinados con grupos químicos como sulfatos o sulfonatos [2, 3]. Entre los más utilizados a nivel mundial se encuentran los alquilbenceno sulfonatos, los alcoholes etoxilados, los sulfatos y los éter-sulfatos. La mayoría de los productos de limpieza que se venden hoy en día contienen uno o más tipos de surfactantes, razón por la cual comúnmente se asocian con el termino detergentes [1].

¿Cómo funcionan los surfactantes?

Los surfactantes son capaces de eliminar la suciedad hidrofóbica y las grasas, gracias a que están compuestos por moléculas con una "doble afinidad": tienen una parte hidrofílica, que se asocia al agua, y otra hidrofóbica, que se une a las grasas y aceites. Debido a esta combinación, los surfactantes suelen representarse con una estructura formada por una cabeza y una cola (Figura 1A). Esta característica permite que, al mezclarse con el agua, los surfactantes puedan rodear la suciedad y formar pequeñas esferas llamadas micelas (Figura 1B). Las micelas atrapan y encapsulan la grasa en su interior, permitiendo que el agua las arrastre y se las lleve por el drenaje. Por esta razón, aunque el agua parezca suficiente para limpiar, por sí sola no puede eliminar la grasa, ya que el agua y los aceites no se mezclan de manera natural [3].

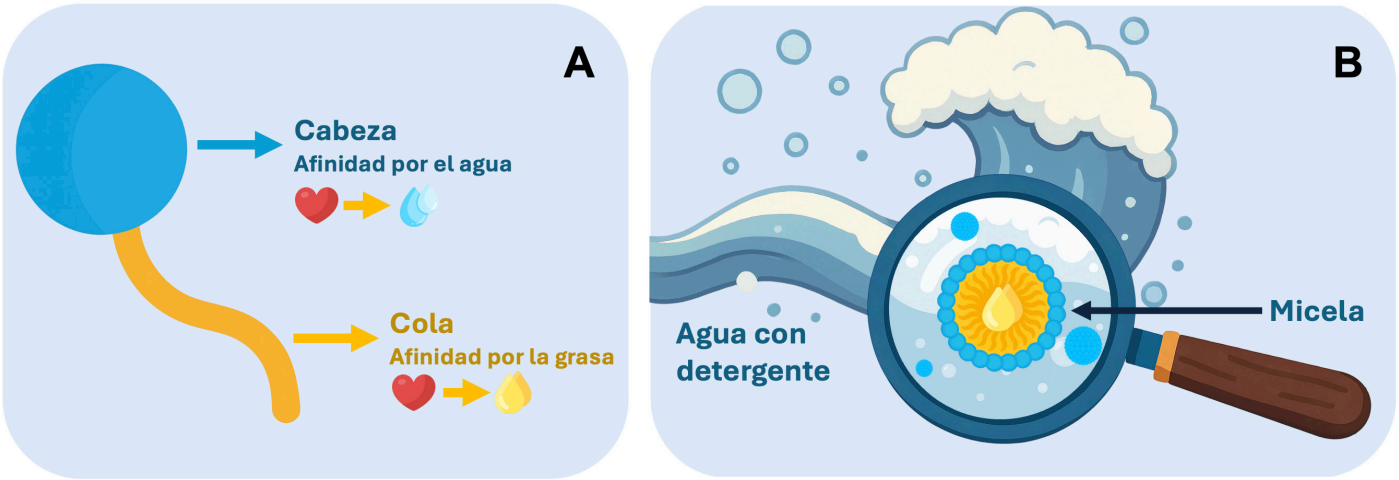


Figura 1. *(A) Estructura de doble afinidad de los surfactantes: una parte hidrofílica (afín al agua) y una parte hidrofóbica (afín a las grasas). (B) Representación de la formación de micelas en presencia de agua con detergentes (surfactantes). En este proceso, los surfactantes rodean la suciedad y las grasas, formando pequeñas esferas llamadas micelas.*

Licenciamiento bajo el cual se publican los contenidos: CC BY-NC-ND 4.0

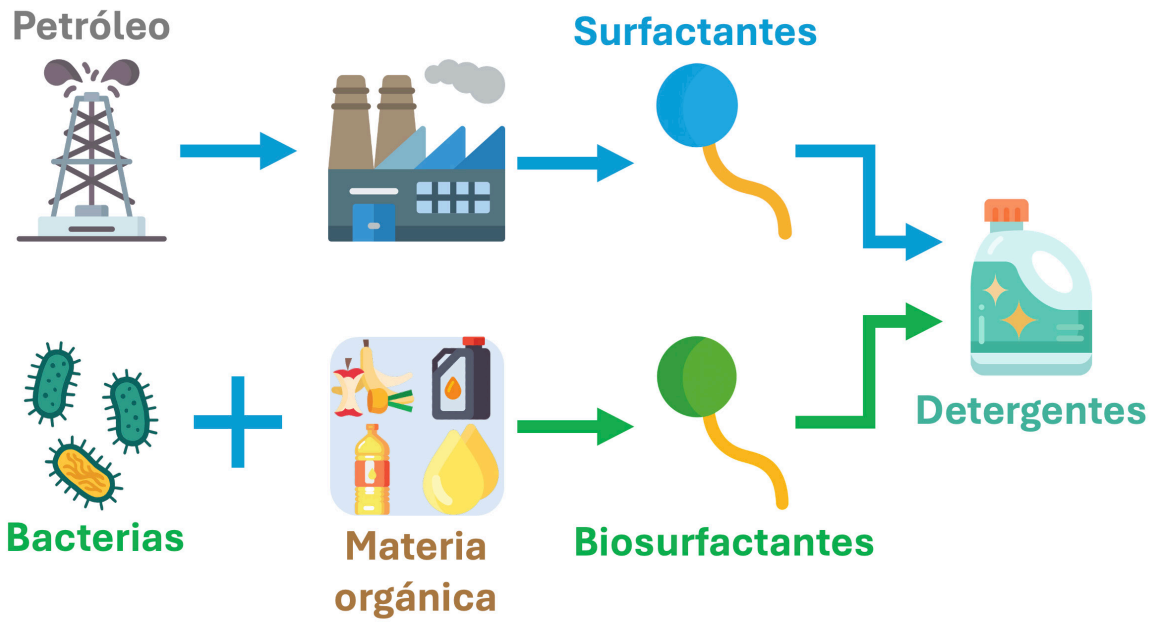


Figura 2. *Los surfactantes convencionales se producen comúnmente a partir de derivados del petróleo, mientras que los biosurfactantes son sustancias elaboradas de forma natural por bacterias a partir de materia orgánica. Ambos tipos pueden utilizarse como ingredientes de detergentes para la limpieza de distintos materiales y superficies.*

Los surfactantes de origen biológico

La comunidad científica ha mostrado un gran interés en desarrollar o identificar moléculas con propiedades limpiadoras similares a las de los surfactantes convencionales, pero obtenidas a partir de fuentes alternas y sustentables [4]. En esta búsqueda, se descubrió que algunos microorganismos son capaces de producir moléculas con propiedades similares a las de los surfactantes convencionales. Estas sustancias reciben el nombre de surfactantes de origen biológico o biosurfactantes. A diferencia de los surfactantes convencionales, los biosurfactantes se obtienen mediante procesos biológicos y, en muchos casos, pueden producirse sin la necesidad de utilizar compuestos químicos sintéticos (Figura 2) [5, 6]. Entre los más estudiados se encuentran los producidos por bacterias, las cuales los generan de forma natural al consumir materia orgánica como grasas y aceites.

Los biosurfactantes bacterianos están compuestos generalmente por la unión de una cadena de ácido graso con otras moléculas como proteínas, lípidos o carbohidratos. Dependiendo de cómo se combinen estas moléculas, pueden presentar estructuras simples o complejas, lo que influye en sus propiedades y en sus aplicaciones. Entre los géneros bacterianos más estudiados por su capacidad para producir biosurfactantes se encuentran *Bacillus*, *Pseudomonas* y *Acinetobacter* [6].

Para producir los biosurfactantes en laboratorio o a escala industrial, se han estudiado distintas fuentes de materia orgánica como son la melaza de caña, glicerol, aceite de cocina usado e incluso agua contaminada con hidrocarburos, es decir, materiales provenientes de residuos orgánicos. Dependiendo de la especie bacteriana y el tipo de materia orgánica utilizada, se pueden generar distintos tipos de biosurfactantes. Entre los más conocidos se encuentran los lipopéptidos, formados por un ácido graso unido a una pequeña cadena de aminoácidos y producidos principalmente por bacterias del género *Bacillus* y *Pseudomonas*. Otro grupo importante son los glicolípidos,

Licenciamiento bajo el cual se publican los contenidos: CC BY-NC-ND 4.0

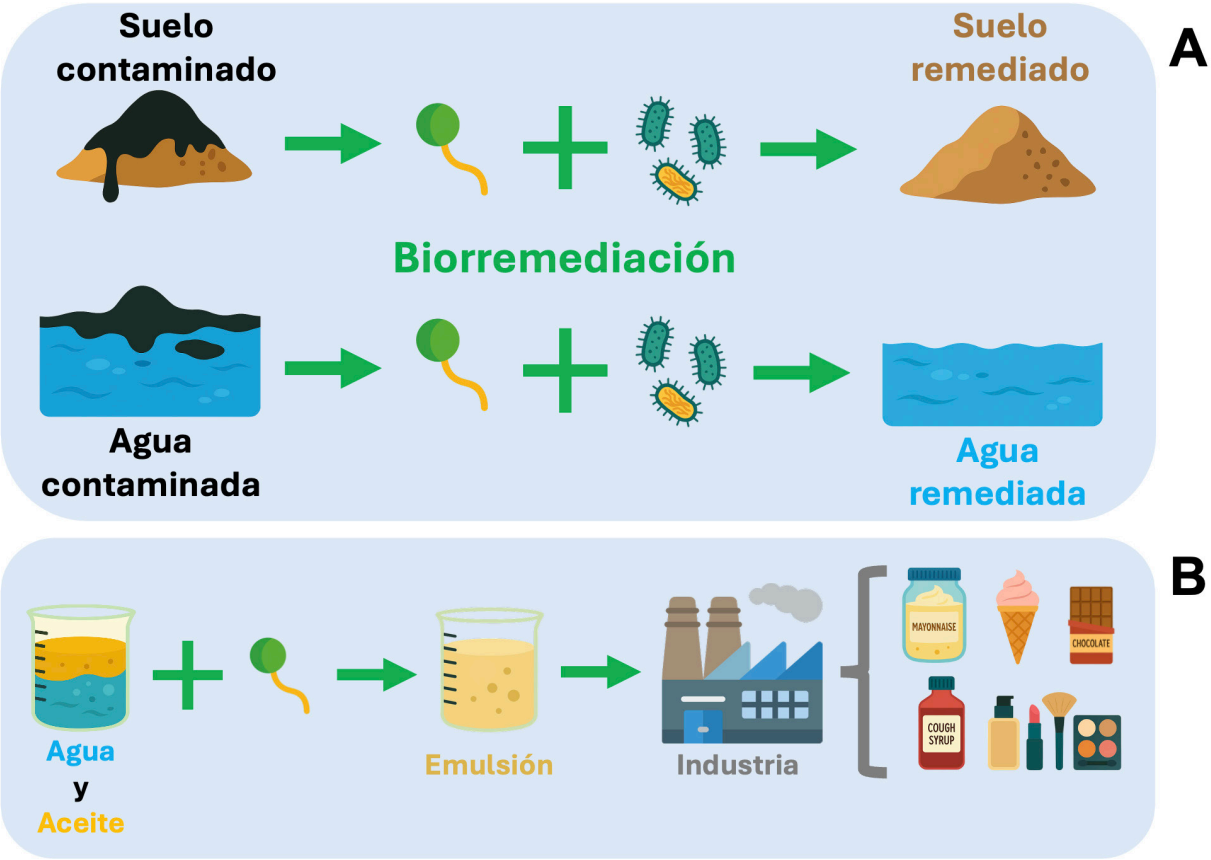


Figura 3. *(A) Uso de biosurfactantes en procesos de biorremediación. Las bacterias y los biosurfactantes pueden ser adicionados al suelo y agua contaminada para remediar la contaminación del suelo y el agua. (B). Los biosurfactantes permiten mezclar líquidos como agua y aceite, dando lugar a emulsiones, que son fundamentales en muchas industrias. Algunos de los productos que dependen de estas mezclas son los helados, aderezos, medicamentos y otros productos de uso cotidiano.*

que presentan en su estructura un ácido graso unido a azúcares simples y pueden ser producidos por bacterias del género Acinetobacter y Pseudomonas [1].

Características y usos de los biosurfactantes

Entre las características más importantes de los biosurfactantes destacan su baja toxicidad para plantas y animales, y su alta biodegradabilidad, lo que significa que otros microorganismos pueden descomponerlos de manera natural [5, 6]. Además, muchos de ellos funcionan incluso en condiciones adversas, como altas temperaturas, elevada salinidad o ambientes muy ácidos o alcalinos, además de incluso ser eficaces en pequeñas cantidades. Gracias a estas propiedades, los biosurfactantes se utilizan en la limpieza de aguas y suelos contaminados con petróleo, grasas y aceites, contaminantes que representan un grave problema ambiental por los daños que causan a plantas y animales [5].

Aunque existen microorganismos capaces de asimilar los hidrocarburos del petróleo, este proceso suele ser lento porque estas sustancias tienden a flotar y no se mezclan fácilmente con el agua. Aquí es donde entra en acción la adición de biosurfactantes como los lipopéptidos, ya que estos atrapan a los contaminantes hidrofóbicos, permitiendo que se mezclen con el agua y sean más accesibles para las bacterias. De esta manera se facilita

Licenciamiento bajo el cual se publican los contenidos: CC BY-NC-ND 4.0

su degradación natural, a través de un proceso de biorremediación, el cual es utilizado para reducir el daño ambiental y recuperar suelos y cuerpos de agua (Figura 3A) [1, 5].

Los biosurfactantes no solo se utilizan en la limpieza o en la biorremediación de suelos y aguas; sino que también tienen aplicaciones en diversas industrias como la industria cosmética, farmacéutica, alimentaria y agrícola. Gracias a su capacidad para mezclar sustancias que normalmente no se combinan, como el agua y las grasas, pueden formar emulsiones, las cuales están presentes en productos de uso cotidiano como aderezos, helados, jarabes, pinturas, maquillaje y chocolates (Figura 3B). En la agricultura se ha estudiado la adición de biosurfactantes en el suelo por su capacidad para inhibir el crecimiento de algunos hongos y microorganismos dañinos, además de favorecer la absorción de nutrientes por las raíces de las plantas. También, en la industria cosmética, se utilizan como emulsionantes y estabilizadores en productos como jabones, cremas hidratantes, lociones y champús, mientras que en el sector farmacéutico algunos biosurfactantes han mostrado propiedades antimicrobianas [5].

A pesar de su gran potencial, su producción aún enfrenta algunos desafíos. Al ser compuestos generados por microorganismos, su obtención depende del crecimiento de bacterias capaces de transformar distintos nutrientes en biosurfactantes, un proceso que puede tardar varios días y producir cantidades limitadas. Sin embargo, el interés por estas moléculas ha crecido rápidamente, debido a que pueden obtenerse a partir de residuos orgánicos, lo que reduce costos y aprovecha materiales que de otro modo serían desechados. Actualmente, empresas internacionales como Dow, Clariant y Unilever participan en la investigación, producción o uso de estos compuestos, impulsando un mercado global en crecimiento. En este contexto, los biosurfactantes representan una alternativa prometedora para disminuir el uso de surfactantes sintéticos derivados del petróleo y avanzar hacia procesos industriales sostenibles [2, 5].

Conclusión

Los biosurfactantes producidos por bacterias pueden considerarse como una alternativa prometedora para sustituir algunos surfactantes convencionales, ya que presentan propiedades similares a las de sus contrapartes sintéticas. Además, tienen aplicaciones en diversos sectores, como el alimentario, agrícola y cosmético, e incluso en la solución de problemas ambientales ocasionados por la contaminación del suelo y agua. Debido a esto, resulta importante impulsar la investigación relacionada a su producción mediante diversas bacterias, así como el desarrollo de procesos eficientes y escalables que aumente su rentabilidad. De esta manera, sería posible reemplazar gradualmente algunos surfactantes químicos presentes en los detergentes y avanzar hacia productos más amigables con el ambiente.

Agradecimientos

Los autores expresan su más sincero agradecimiento a la Dra. Elvia Inés García Peña, del Departamento de Bioprocesos de la Unidad Profesional Interdisciplinaria de Biotecnología del Instituto Politécnico Nacional, por su destacada participación y valiosa contribución en la elaboración de este artículo de divulgación. Su orientación, comentarios críticos y apoyo constante fueron de gran importancia para asegurar el rigor científico y la claridad del contenido, así como para fortalecer la calidad de la información presentada al público general.

Los autores desean dedicar este artículo a la memoria del Dr. Michel de la Cruz Canul Chan, coautor de este trabajo, quien lamentablemente falleció durante el proceso editorial. Reconoce-

Licenciamiento bajo el cual se publican los contenidos: CC BY-NC-ND 4.0

mos con profundo respeto su valiosa contribución científica, su compromiso académico y su calidad humana. Sirva esta publicación como testimonio de gratitud y reconocimiento a su legado.

Se declara que se empleó la herramienta de Inteligencia Artificial ChatGPT-5 únicamente para la generación de elementos gráficos, así como apoyo en la revisión ortográfica y de estilo en algunas secciones del texto, sin comprometer la originalidad ni el rigor científico del manuscrito.

Referencias

[1] Melikoglu, M. (2025). Biosurfactants for enhanced oil recovery and bioremediation in the modern petroleum industry: A global review. *JCIS Open*, 100168. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jciso.2025.100168.

[2] V Nagtode, V. S., Cardoza, C., Yasin, H. K. A., Mali, S. N., Tambe, S. M., Roy, P., ... & Pratap, A. P. (2023). Green surfactants (biosurfactants): a petroleum-free substitute for sustainability— comparison, applications, market, and future prospects. *ACS omega*, 8(13), 11674-11699. https://doi.org/10.1021/acsomega.3c00591.

[3] Shah, S. K., Bhattarai, A., & Chatterjee, S. K. (2013). Applications of surfactants in modern science and technology. *Modern Trends Sci Technol*, 147-58.

[4] Premathilake, D. S., Silva, A. A. M. P., Illankoon, W. A. M. A. N., Rosatelli, A., Beltrametti, F., Bava, A., ... & Vaccari, M. (2026). Environmental, Economic, and Social Trade-Offs in Biochar and Biosurfactant-Based Soil Remediation: A Critical Review Based on Mass Flow Analysis. *Energy Nexus*, 100644. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.nexus.2026.100644.

[5] Hsu, C. Y., Mahmoud, Z. H., Hussein, U. A. R., Abduvalieva, D., Alsultany, F. H., & Kianfar, E. (2025). Biosurfactants: Properties, applications and emerging trends. *South African Journal of Chemical Engineering*, 53(1), 21-39. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.sajce.2025.04.002.

[6] Cui, J., & Dörmann, P. (2025). Microbial degradation of hydrocarbons from petroleum assisted by biosurfactants: pathways and bioremediation potential. *Biochimie*.https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.biochi.2025.09.011.

Licenciamiento bajo el cual se publican los contenidos: CC BY-NC-ND 4.0

Recibido: 18-mar-2026 Aceptado: 17-jun-2026 e-ISSN 2954-4890

Sección: *¿Cómo funciona?*

Frutos de Latinoamérica con potencial cosmético: una mirada desde la bioprospección

Latin American fruits with cosmetic potential: a view from bioprospecting

Camilo Monroy-Forero
Ludy Pabón
*Vanessa Gómez**

Escuela de Ciencias Básicas y Aplicadas, Universidad de la Salle, Bogotá, Colombia.

**Autor para la correspondencia: mvgomez@unisalle.edu.co*

RESUMEN

Latinoamérica, una de las regiones más biodiversas del mundo, alberga frutos con metabolitos de interés para el cuidado de la piel, como polifenoles, carotenoides y vitaminas. Estos compuestos aportan propiedades antioxidantes y fotoprotectoras complementarias frente al estrés oxidativo. Sin embargo, transformar un fruto en ingrediente cosmético exige una ruta de bioprospección que integre selección de especies, revisión de antecedentes, validación experimental, sostenibilidad, regulación, escalabilidad y articulación con comunidades y actores productivos. Este artículo presenta una mirada divulgativa sobre frutos latinoamericanos con potencial cosmético y propone una ruta general para orientar su estudio desde la bioprospección responsable.

Palabras clave: Fotoprotección, biodiversidad latinoamericana, cosméticos naturales, bioprospección.

SUMMARY

Latin America, one of the most biodiverse regions in the world, is home to fruits containing metabolites of interest for skincare, such as polyphenols, carotenoids, and vitamins. These compounds provide antioxidant properties and complementary photoprotective effects against oxidative stress. However, transforming a fruit into a cosmetic ingredient requires a bioprospecting pathway that integrates species selection, literature review, experimental validation, sustainability, regulatory considerations, scalability, and collaboration with communities and productive stakeholders. This article presents a science communication perspective on Latin American fruits with cosmetic potential and proposes a general pathway to guide their study through responsible bioprospecting.

Keywords: Photoprotection, Latin American biodiversity, natural cosmetics, bioprospecting.

Licenciamiento bajo el cual se publican los contenidos: CC BY-NC-ND 4.0

Aumento del interés por ingredientes naturales en el sector cosmético

El sector cosmético se renueva constantemente y busca ingredientes funcionales a los productos para el cuidado de la piel. El interés de los consumidores por elegir productos naturales se encuentra relacionado con la creciente preocupación sobre los posibles efectos negativos de algunos ingredientes sintéticos, prefiriendo sustancias naturales, ya que se asocian con bienestar, seguridad ambiental y sostenibilidad [1].

La expansión del mercado de productos naturales se observa tanto en emprendimientos como en grandes compañías. Sin embargo, también se ha descrito una "brecha de compra ecológica", que consiste en que, las personas pueden expresar interés por productos sostenibles, pero no siempre los compran debido a barreras como precio, disponibilidad o confianza en el desempeño [2]. Para los desarrolladores, el reto también es técnico, por ejemplo, un extracto vegetal debe conservar su estabilidad, mezclarse adecuadamente con otros ingredientes, mantener su actividad funcional, evitar interacciones no deseadas y cumplir los requisitos regulatorios aplicables [3].

Por esta razón, la bioprospección ofrece un camino útil para pasar de la observación de la biodiversidad a la identificación de ingredientes con valor cosmético. En lugar de seleccionar especies solo por intuición o tradición de uso, este enfoque permite integrar información biológica, química, tecnológica, social y regulatoria. Así, la búsqueda de especies vegetales no se limita a encontrar "lo natural", sino a determinar qué recursos pueden estudiarse de manera responsable y con posibilidades reales de convertirse en ingredientes funcionales.

Antioxidantes como principal escudo de la fotoprotección cosméticacar el cáncer: microARNs

En la actualidad la protección solar se ha basado principalmente en el uso de filtros orgánicos e inorgánicos. Estos filtros son indispensables en las formulaciones fotoprotectoras, pero algunos pueden presentar retos relacionados con fotoestabilidad, tolerancia cutánea, compatibilidad con otros ingredientes o impacto ambiental. Por ello, la investigación cosmética explora ingredientes complementarios que ayuden a mejorar el desempeño de las formulaciones sin reemplazar necesariamente la función principal de los filtros solares [4].

La radiación ultravioleta (RUV) afecta la piel por diferentes mecanismos. La radiación UVB se asocia principalmente con quemaduras solares y daño directo al ADN, mientras que la radiación UVA penetra con mayor profundidad y favorece la formación de especies reactivas de oxígeno, moléculas relacionadas con el estrés oxidativo y el deterioro de estructuras como colágeno y elastina. En zonas tropicales, donde la exposición solar puede ser intensa durante gran parte del año, estas alteraciones contribuyen al fotoenvejecimiento, caracterizado por pérdida de firmeza, aparición de arrugas, manchas y mayor sensibilidad a factores externos [5].

Es en este escenario, donde los antioxidantes adquieren más relevancia porque pueden neutralizar especies reactivas y apoyar los mecanismos de defensa de la piel frente al estrés oxidativo [6]. Los extractos de frutos ricos en compuestos fenólicos, flavonoides, carotenoides, vitamina C que son conocidos por su buena actividad antioxidante, podrían incorporarse como ingredientes complementarios en productos cosméticos orientados al cuidado frente a la radiación solar y al envejecimiento prematuro. Sin embargo, su incorporación exige demostrar estabilidad, compatibilidad, actividad y viabilidad tecnológica.

Licenciamiento bajo el cual se publican los contenidos: CC BY-NC-ND 4.0

Frutos latinoamericanos con propiedades útiles para aplicación cosmética

La biodiversidad latinoamericana adquiere un papel estratégico porque incluye especies vegetales ricas en metabolitos de interés cosmético; dependiendo de la especie, la parte utilizada, el método de extracción y la formulación final, estos extractos pueden presentar actividades antioxidantes, fotoprotectoras complementarias, hidratantes o antienvejecimiento.

De acuerdo con el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente, América Latina y el Caribe albergan alrededor del 60% de la vida terrestre del planeta [7]. Sus bosques tropicales, montañas, sabanas, humedales y ecosistemas secos contienen una gran diversidad de plantas, muchas de ellas endémicas. La Amazonía, por ejemplo, es una de las principales zonas de alta biodiversidad del continente y concentra cerca del 10% de la biodiversidad global. Esta riqueza natural representa una oportunidad para la investigación científica y la innovación basada en la naturaleza, siempre que su aprovechamiento se realice bajo criterios de sostenibilidad y regulación [8].

En este sentido, varios frutos contienen altas concentraciones de compuestos fenólicos y vitaminas, para protegerse de la intensa radiación solar de los trópicos, propiedades que hoy la fitocosmética busca capturar para crear productos más seguros y sostenibles. La Tabla 1 resume algunos de los muchos ejemplos reportados en la literatura y permite observar que el potencial cosmético no depende de una sola propiedad, sino de la combinación entre composición, evidencia experimental, posibilidad de formulación y disponibilidad sostenible del recurso.

La revisión de la literatura permite observar que diversos frutos latinoamericanos han sido estudiados por su potencial aplicación cosmética, aunque con distintos niveles de avance experimental y viabilidad de uso cosmético real. Mientras algunas especies cuentan principalmente con caracterización química o ensayos biológicos preliminares, otras ya han sido incorporadas en formulaciones o evaluadas en modelos más cercanos al uso cosmético. Varias ya cuentan con un nombre INCI (Nomenclatura Internacional de Ingredientes Cosméticos), lo cual refleja una madurez tecnológica mayor, pues se pueden incorporar en productos cosméticos desde el punto de vista legal. Por ejemplo, en la Comunidad Andina de Naciones (CAN), la Decisión 833 de 2018 regula los cosméticos mediante la Notificación Sanitaria Obligatoria (NSO). La Decisión especifica que los países miembros (Bolivia, Colombia, Ecuador, Perú) adoptan las listas de ingredientes de la Unión Europea (CosIng) y los listados de EE. UU (FDA: Food & Drug Administration, PCPC: Personal Care Products Council). Si el fruto ya tiene un nombre INCI asignado y está en esas bases de datos, su incorporación es viable y legal en la región.

En México, la regulación de ingredientes cosméticos está a cargo de la Comisión Federal para la Protección contra Riesgos Sanitarios (COFEPRIS), la cual no dispone de un inventario equivalente a CosIng de la Unión Europea. En su lugar, el enfoque se basa en la seguridad del producto terminado y en el cumplimiento de listas de sustancias prohibidas o restringidas. Este vacío relativo en listados específicos de ingredientes naturales puede representar tanto una oportunidad como un desafío para la incorporación de nuevos activos derivados de la biodiversidad latinoamericana. En este contexto, la evidencia disponible resalta el valor de la bioprospección como herramienta para identificar especies promisorias y orientar su desarrollo hacia aplicaciones más concretas. No obstante, este proceso implica avanzar en la generación de información que permita su inclusión en nomenclaturas internacionales, como la INCI, así como demostrar su seguridad e inocuidad para su uso en formulaciones.

Licenciamiento bajo el cual se publican los contenidos: CC BY-NC-ND 4.0

Tabla 1. *Frutos latinoamericanos con bioactividad de interés para el desarrollo cosmético. Elaboración propia a partir de una revisión de artículos de los últimos 10 años consultados en ScienceDirect (Febrero-2026), mediante la estrategia de búsqueda fruits AND cosmetic AND America. Se priorizaron estudios de frutos con evidencia de composición química, bioactividad asociada al interés cosmético, uso reportado o desarrollo preliminar de formulaciones. El nombre INCI se consultó en la base de datos CosIng (https://ec.europa.eu/growth/tools-databases/cosing/). Imágenes obtenidas con Gemini plus.*

Nombre común	Nombre científico	Origen destacado	Propiedad cosmética reportada	Ejemplos de aplicación o formulación	Nombre INCI
Açal 	*Euterpe oleracea*	Amazonía (Brasil y Colombia)	Regenerador celular y protector de colágeno.	Cremas antiedad y lociones corporales.	EUTERPE OLERACEA FRUIT EXTRACT
Camu Camu 	*Myrciaria dubia*	Amazonía (Perú y Colombia)	Fotoprotección por alta Vitamina C.	Geles y lociones solares.	MYRCIARIA DUBIA FRUIT EXTRACT
Inajá 	*Maximiliana maripa*	Amazonía (Brasil, Venezuela y Colombia)	Actividad antioxidante, y ácidos grasos que potencian el cuidado de la piel.	Cremas hidratantes, lociones, productos post-solares y champús.	Sin denominación INCI reportada
Aguacate 	*Persea americana*	Mesoamérica / América Tropical	Hidratante profundo y cicatrizante.	Emulsiones funcionales y cremas hidratantes.	PERSEA GRATISSIMA FRUIT EXTRACT
Pitahaya 	*Hylocereus undatus*	Mesoamérica	Protectora de la piel y antioxidante.	Productos de cuidado facial.	HYLOCEREUS UNDATUS FRUIT EXTRACT
Guayaba 	*Psidium guajava*	América Tropical	Potenciador de filtros UV (Sinergia).	Ingrediente complementario en formulaciones solares.	PSIDIUM GUAJAVA FRUIT EXTRACT
Jatobá 	*Hymenaea stigonocarpa*	Brasil	Alta inhibición de elastasa (Firmeza).	Activos para serums y cremas reafirmantes.	Sin denominación INCI reportada
Tumbo 	*Passiflora mollissima*	Andes (Perú)	Antioxidante y protector UVB.	Crema gel fotoprotectora.	Sin denominación INCI reportada
Chontaduro 	Bactris gasipaes	Región Pacífico y Andina	Antioxidante.	Crema hidratante.	BACTRIS GASIPAES FRUIT EXTRACT

Licenciamiento bajo el cual se publican los contenidos: CC BY-NC-ND 4.0

En la Amazonía se encuentran frutos como açaí, camu camu e inajá, que han despertado interés por su contenido de compuestos antioxidantes. El açaí (*Euterpe oleracea*) contiene antocianinas, pigmentos fenólicos asociados con la neutralización de radicales libres, y se ha estudiado por su posible efecto sobre metaloproteinasas como MMP-1, enzimas relacionadas con la degradación del colágeno después de la exposición UVB. El camu camu (*Myrciaria dubia*) se destaca por su contenido de vitamina C y ha sido evaluado en formulaciones con actividad fotoprotectora experimental. El inajá (*Maximiliana maripa*), por su parte, contiene carotenoides y ácidos grasos de interés para el cuidado de la barrera cutánea y la prevención del daño oxidativo [9,10].

En los Andes y el Cerrado brasileño se han descrito otros frutos con potencial cosmético. El tumbo serrano (*Passiflora mollissima*) ha sido evaluado en crema gel por su actividad antioxidante y fotoprotectora [10]. El jatobá (*Hymenaea stigonocarpa*) ha llamado la atención por la inhibición de elastasa reportada en extractos de cáscara y semilla, una enzima relacionada con la pérdida de elasticidad cutánea. El chontaduro (*Bactris gasipaes*) contiene carotenoides, lípidos y polifenoles, por lo que se considera un fruto de interés para estudios antioxidantes y formulaciones hidratantes.

En Mesoamérica y América tropical también se encuentran especies de interés. El aguacate o palta (*Persea americana*) aporta aceites ricos en ácidos grasos, especialmente ácido oleico, que pueden favorecer propiedades emolientes e hidratantes. La pitahaya (*Hylocereus undatus*) ha sido registrada en CosIng, base de datos europea de ingredientes cosméticos, con funciones declaradas como protectora de la piel y antioxidante [11]. La guayaba (*Psidium guajava*) resulta relevante porque algunos estudios han reportado que sus extractos pueden actuar como ingredientes complementarios de filtros UV, aumentando su desempeño en condiciones experimentales.

Estos ejemplos muestran que los frutos latinoamericanos pueden aportar rutas de innovación cosmética. Sin embargo, su aprovechamiento debe evitar una visión extractivista. La transformación de pulpas, cáscaras o semillas en ingredientes de alto valor puede contribuir a una cosmética circular, pero solo si se considera el origen del recurso, la trazabilidad, la participación de actores locales y la distribución justa de beneficios.

Ruta general para la bioprospección cosmética de frutos latinoamericanos

La bioprospección puede entenderse como una ruta ordenada para buscar, seleccionar, estudiar y proyectar recursos biológicos con posibles aplicaciones. En cosmética, no basta con afirmar que una planta “tiene antioxidantes”. Es necesario demostrar que el recurso tiene una actividad relevante, que puede incorporarse en una formulación, que su uso es permitido y que su aprovechamiento no pone en riesgo los ecosistemas ni los derechos de las comunidades relacionadas con el recurso.

Una ruta general para frutos latinoamericanos puede organizarse en cinco etapas. Primera, se realiza la selección inicial de especies, considerando disponibilidad, estado de amenaza de la Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza (UICN) de las especies para descartar sobreexplotación de flora vulnerable, origen geográfico, literatura científica, partes aprovechables y posibilidad de usar subproductos agroindustriales como cáscaras o semillas.

Segunda, se revisan bases de datos científicas, regulatorias y comerciales, por ejemplo, CosIng, literatura especializada y documentos de patentes, para identificar antecedentes de uso, funciones cosméticas declaradas, detec-

Licenciamiento bajo el cual se publican los contenidos: CC BY-NC-ND 4.0



Figura 1. *Ruta general para la bioprospección cosmética de frutos latinoamericanos. Imagen elaborada con base en los artículos consultados y ajustada al enfoque metodológico del manuscrito. Imagen obtenida con Gemini plus.*

tar brechas de innovación [11] y evaluar de forma temprana la viabilidad regulatoria básica.

Tercera, se hace la obtención y caracterización preliminar del extracto. En esta etapa se define qué parte del fruto se utilizará (pulpa, epicarpio, semilla), qué solvente o método de extracción es más adecuado y qué tipo de compuestos podrían explicar la actividad. La importancia de este momento radica en optimizar el proceso para aislar y perfilar los grupos de metabolitos secundarios que explicarán la posterior actividad biológica.

Cuarta, se desarrolla la validación experimental mediante ensayos biológicos, enzimáticos o celulares. Para fotoprotección y antienvejecimiento, por ejemplo, pueden evaluarse actividad antioxidante, absorción en el rango UV, e inhibición de enzimas como elastasa o tirosinasa, y compatibilidad con modelos celulares. Esta etapa consiste en demostrar científicamente el mecanismo de acción y la seguridad del extracto, sin esta validación, el recurso carece de eficacia y sustento comercial legítimo.

Quinta, el ingrediente debe incorporarse en una matriz cosmética. Esta etapa permite resolver desafíos prácticos de formulación: ¿el extracto cambia el color, olor o textura del producto?, ¿se degrada con la luz o la temperatura?, ¿interactúa con conservantes o filtros solares?, ¿mantiene su actividad después de formularse? Finalmente, aquí se evalúa la viabilidad regulatoria, ambiental y productiva. Esto implica revisar permisos, trazabilidad, costos, escalabilidad, abastecimiento sostenible, propiedad intelectual y distribución de beneficios.

Retos técnicos, regulatorios y de sostenibilidad

La bioprospección cosmética enfrenta

Licenciamiento bajo el cual se publican los contenidos: CC BY-NC-ND 4.0

varios retos. El **primero** es técnico: un extracto natural suele ser una mezcla compleja de compuestos, por lo que su actividad puede variar según la especie, el lugar de cultivo, la temporada, el método de secado o el solvente de extracción. Por eso, la estandarización es necesaria para que un ingrediente mantenga una composición y un desempeño reproducibles.

El **segundo** es regulatorio. Antes de usar un recurso biológico como ingrediente cosmético, se deben revisar las normas aplicables de los permisos para el uso de la biodiversidad con fines de bioprospección, los requisitos de seguridad cosmética, el etiquetado y las restricciones de ingredientes en cada país de la región.

El **tercero** es social y ambiental. La promesa de una cosmética basada en biodiversidad solo es defendible si evita la sobreexplotación, reconoce la participación de la sociedad cuando corresponda y promueve cadenas de valor trazables. En este punto, la bioprospección no es únicamente una herramienta científica, sino también una estrategia de bioeconomía responsable.

Conclusión

Los frutos latinoamericanos representan una fuente valiosa de compuestos con interés cosmético, especialmente por su actividad antioxidante, su potencial fotoprotector complementario y su relación con estrategias de cuidado frente al envejecimiento cutáneo. Sin embargo, el potencial biológico por sí solo no convierte a un fruto en un ingrediente cosmético viable. Para avanzar de manera responsable se requiere una ruta de bioprospección que conecte biodiversidad, evidencia científica, desarrollo tecnológico, regulación, sostenibilidad y participación de los actores locales.

Desde esta perspectiva, el interés no se limita a qué frutos tienen compuestos bioactivos, sino cuáles pueden estudiarse, formularse y aprovecharse sin comprometer los ecosistemas ni simplificar el valor cultural y productivo de la biodiversidad. La cosmética basada en recursos naturales puede ser una oportunidad para América Latina, siempre que se desarrolle con rigor científico, trazabilidad y una visión crítica de sus límites.

Referencias

[1] Hinčica, V., Řezanková, H., Macias, K., & Schulzová, M. (2024). Perception of natural cosmetics among central European consumers. *Central European Economic Journal*, 11(58), 233–251. https://doi.org/10.2478/ceej-2024-0016

[2] Prakash, G., Sharma, S., Kumar, A., & Luthra, S. (2024). Does the purchase intention of green consumers align with their zero-waste buying behaviour? An empirical study on a proactive approach towards embracing waste-free consumption. *Heliyon*, 10(3), e25022. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e25022

[3] Rischard, F., Gore, E., Flourat, A., & Savary, G. (2025). The challenges faced by multifunctional ingredients: A critical review from sourcing to cosmetic applications. *Advances in Colloid and Interface Science*, 340, 103463. https://doi.org/10.1016/j.cis.2025.103463

[4] Jesus, A., Sousa, E., Cruz, M. T., Cidade, H., Lobo, J. M. S., & Almeida, I. F. (2022). UV filters: Challenges and prospects. *Pharmaceuticals*, 15(3), 263. https://doi.org/10.3390/ph15030263

[5] Al-Sadek, T., & Yusuf, N. (2024). Ultraviolet radiation biological and medical implications. *Current Issues in Molecular Biology*, 46(3),1924–1942. https://doi.org/10.3390/cimb46030126

[6] De Gálvez, M. V. (2010). Antioxidantes en fotoprotección, ¿realmente funcionan? *Actas Dermo-Sifiliográficas*, 101(3), 197–200. https://doi.org/10.1016/j.ad.2009.11.003

[7] Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA / UNEP) & UNEP-WCMC. (2016). *EL Estado De La Biodiversidad En América Latina y El Caribe*.

[8] Inter-American Development Bank. (n.d.). *Biodiversity in Latin America and the Caribbean.* https://www.iadb.

Licenciamiento bajo el cual se publican los contenidos: CC BY-NC-ND 4.0

org/en/news/biodiversity-latin-america-and-caribbean.

[9] Soares dos Santos Rolim, C., Nonato Silva, L. F., Carolina Bauer, L., Victor Lamarão, C., & Ferreira Bonomo, R. C. (2024). Inaja fruit (Maximiliana maripa) from the Brazilian Amazon: A new source of bioactive compounds and technological potential. *Food Bioscience*, 61, 104905. https://doi.org/10.1016/j.fbio.2024.104905

[10] Sepúlveda Soria, S. M., Gonzalez Tejeda, L. A., Villaseñor Villagómez, F., & Ramírez Granados, J. C. (2021). Protección solar de la piel con extractos de frutas y vegetales. *Jóvenes en la Ciencia*, 10. https://www.jovenesenlaciencia.ugto.mx/index.php/jovenesenlaciencia/article/view/3308.

[11] Bravo, K., Quintero, C., Agudelo, C., García, S., Bríñez, A., & Osorio, E. (2020). CosIng database analysis and experimental studies to promote Latin American plant biodiversity for cosmetic use. *Industrial Crops and Products*, 144. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2019.112007

Licenciamiento bajo el cual se publican los contenidos: CC BY-NC-ND 4.0

Recibido: 16-mar-2026 Aceptado: 20-may-2026 e-ISSN 2954-4890

Sección: *¿Cómo funciona?*

El ciclo verde del biogás: microalgas y bacterias transformando desechos en bienestar local

The green biogas cycle: microalgae and bacteria transforming waste into local well-being

Mario Longinos-Juárez[1]
Wenceslao Bonilla-Blancas[1]*
Armando González Sánchez[2]

[1]*Tecnológico Nacional de México/ TES de Ecatepec, Laboratorio de Energías Alternas Renovables, Posgrado en Eficiencia Energética y Energías Renovables, Av. Tecnológico S/N, Ecatepec de Morelos, C.P. 55210, Estado de México, México.*
[2]*Instituto de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, Circuito Escolar, Ciudad Universitaria, C.P 04510, Ciudad de México, México.*

Autor para la correspondencia: wcbonilla@tese.edu.mx

RESUMEN

El biogás producido por digestión anaerobia requiere la eliminación de gases contaminantes para mejorar su calidad energética y reducir impactos ambientales. El tratamiento biológico basado en comunidades microalga-bacteria permite eliminar estos contaminantes gracias a interacciones biológicas complementarias, mejorando la composición del biogás. Esta tecnología favorece a las comunidades al valorizar residuos orgánicos y generar energía limpia con bajos costos operativos. Su implementación en sistemas agropecuarios rurales contribuye a la autosuficiencia energética, reduce emisiones contaminantes y genera beneficios económicos, ambientales y sociales.

Palabras clave: Biogás, tratamiento biológico, microalgas.

SUMMARY

Biogas produced through anaerobic digestion requires the removal of contaminant gases to improve its energy quality and reduce environmental impacts. Biological treatment based on microalgae–bacteria consortia enables the removal of these contaminants through complementary biological interactions, improving biogas composition. This technology benefits communities by valorizing organic waste and generating clean energy at low operational costs. Its implementation in rural agro-livestock systems contributes to energy self-sufficiency, reduces pollutant emissions, and generates economic, environmental, and social benefits.

Keywords: Biogas, biological treatment, microalgae.

Licenciamiento bajo el cual se publican los contenidos: CC BY-NC-ND 4.0

¿Sabías que diez vacas pueden producir energía suficiente para cocinar durante todo un año?

En muchas comunidades rurales y agroindustriales, los residuos agrícolas y el estiércol del ganado suelen ser considerados como un problema o simplemente como basura. Si los miramos desde otra perspectiva – la de la biotecnología-, estos desechos pueden convertirse en algo mucho más valioso: una fuente constante de energía renovable llamada biogás.

El biogás se genera de forma natural cuando la materia orgánica se descompone en la oscuridad y en total ausencia de oxígeno, mediante un proceso biológico fascinante llamado digestión anaerobia (DA). Este ocurre dentro de contenedores cerrados donde millones de microorganismos trabajan en "equipo", descomponiendo la materia orgánica y liberando una mezcla de gases rica en metano (CH_4). Y aquí está la clave: el CH_4 es un combustible potente, capaz de usarse para cocinar o incluso generar electricidad.

No obstante, el biogás no viene solo, con el CH_4, también se generan otros gases como el dióxido de carbono (CO_2), oxígeno (O_2), monóxido de carbono (CO), nitrógeno (N_2), amoniaco (NH_3) y el famoso – y sumamente problemático- sulfuro de hidrógeno (H_2S).

Un punto crucial es que el biogás "crudo", tal como sale del digestor, no debería utilizarse directamente, estos gases funcionan como un lastre. El CO_2, por ejemplo, reduce su poder energético, como si intentáramos encender una fogata con leña húmeda. Por otro lado, el H_2S –ese gas con olor a huevo podrido- no solo es desagradable, también es altamente corrosivo. Puede dañar tuberías, oxidar motores desde adentro y, en concentraciones elevadas, representa un riesgo serio para la salud y el ambiente.

Por todo esto, tanto razones técnicas como por salud, el biogás debe ser sometido forzosamente a un proceso de tratamiento o purificación, comúnmente conocido como "lavado", antes de poder ser aprovechado de forma segura, eficiente y rentable.

Tabla 1. *Composición típica del biogás [1].*

Componente	Concentración (%v/v)	Clasificación	Características comunes
CH_4	40-75	Componente principal	Gas combustible que genera la energía; es el componente que se desea aprovechar y no tiene olor
CO_2	25-60	Componente indeseable	Gas de efecto invernadero; no es combustible y, si está en altas concentraciones, reduce el poder calorífico del biogás.
CO	<0.2	Impureza menor	Gas altamente tóxico e invisible que se produce por combustiones incompletas.
O_2	1-5	Impureza menor	Gas indispensable para la vida, pero en el biogás representa un riesgo de explosión durante el almacenamiento.
N_2	0.01-5	Impureza menor	Gas inerte que diluye el poder del combustible y puede formar gases contaminantes al quemarse.
H_2S	<1	Contaminante crítico	Gas tóxico con un olor característico a huevo podrido; corrosivo para tuberías y motores.
NH_3	<0.025	Contaminante	Gas de olor penetrante que irrita las vías respiratorias y contribuye a la formación de lluvia ácida al quemarse.

Licenciamiento bajo el cual se publican los contenidos: CC BY-NC-ND 4.0

Tecnologías para mejorar la calidad del biogás

A nivel industrial, existen diferentes métodos para mejorar la calidad del biogás. Las grandes plantas utilizan procesos fisicoquímicos bastante sofisticados para separar los contaminantes del metano. Entre los más comunes están la absorción y adsorción de gases a alta presión, la condensación, el lavado profundo con disolventes químicos y el uso de membranas especializadas para su filtración [2]. Y sí, estas tecnologías funcionan muy bien. Son rápidas, eficientes y ampliamente probadas. Pero también tienen un detalle importante: requieren equipos industriales muy especializados, mantenimiento constante y costos de operación muy elevados. En otras palabras, son poco accesibles para pequeñas granjas o comunidades rurales.

Aquí es donde entra una alternativa más interesante. En los últimos años, ha crecido exponencialmente el interés por los procesos biológicos, que aprovechan algo mucho más simple: la capacidad natural de ciertos microorganismos para limpiar el biogás. Este enfoque no solo es más económico, sino también más fácil de implementar y mucho más sostenible. [3]. En esencia, se trata de aprovechar la convivencia e interacción estrecha de dos grandes aliados microscópicos: las microalgas y las bacterias. Juntas forman un pequeño pero poderoso sistema natural de purificación, capaz de devorar los contaminantes y mejorar de forma notable la calidad energética del biogás.

Si bien estos sistemas biológicos superan a los métodos físico-químicos en cuanto a costos y sustentabilidad, también enfrentan ciertas limitaciones operativas que los ingenieros deben resolver con cuidado; la dependencia directa de las condiciones climáticas y de luz solar para sostener la fotosíntesis, la necesidad de grandes extensiones de terreno si se instalan estanques abiertos y la exigencia de mantener un control estricto de la temperatura y el pH del agua para evitar que el delicado

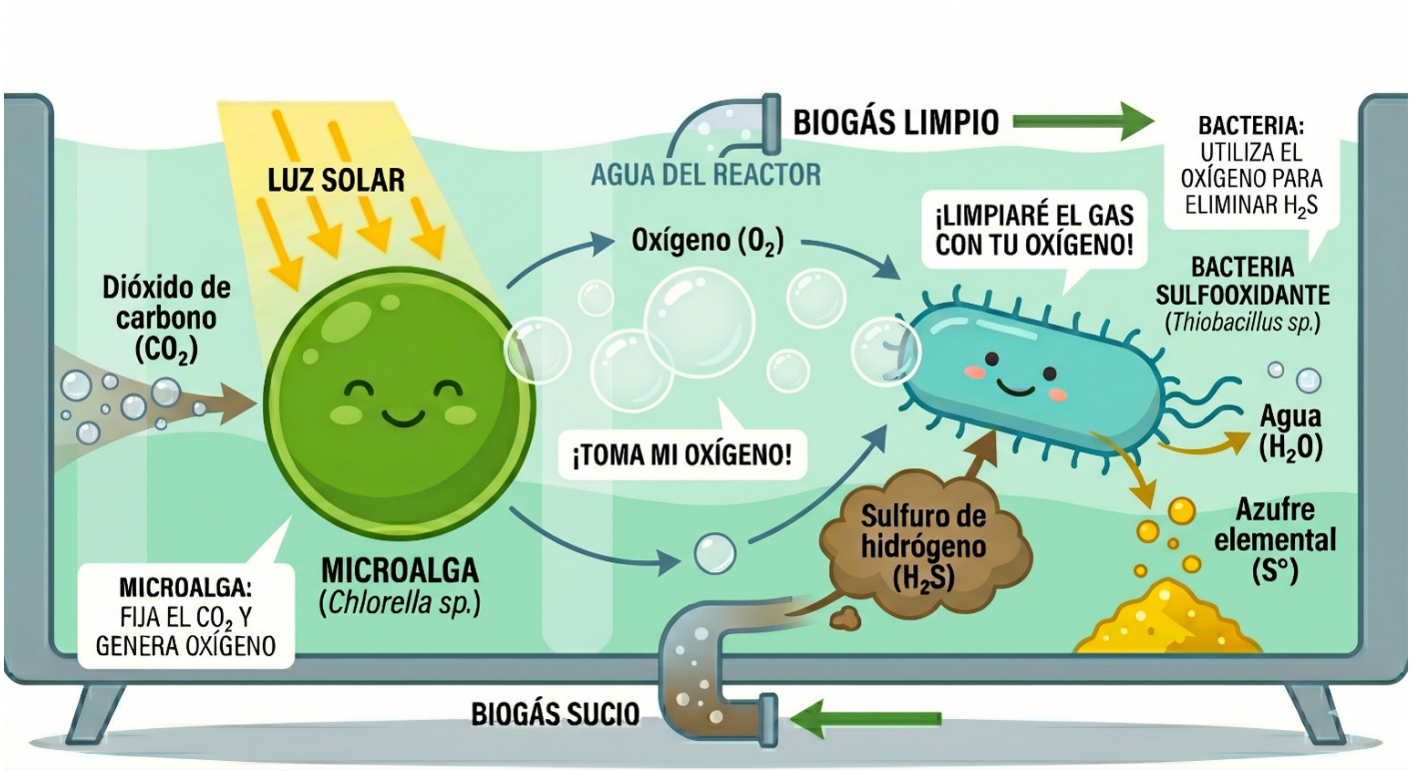


Figura 1. *Representación gráfica de la asociación (consorcio) de las microalgas y bacterias sulfooxidantes necesarias para el tratamiento del biogás, observándose Chlorella sp. (verdes) y Thiobacillus sp. (azules) en una dinámica interactiva de purificación.*

Licenciamiento bajo el cual se publican los contenidos: CC BY-NC-ND 4.0

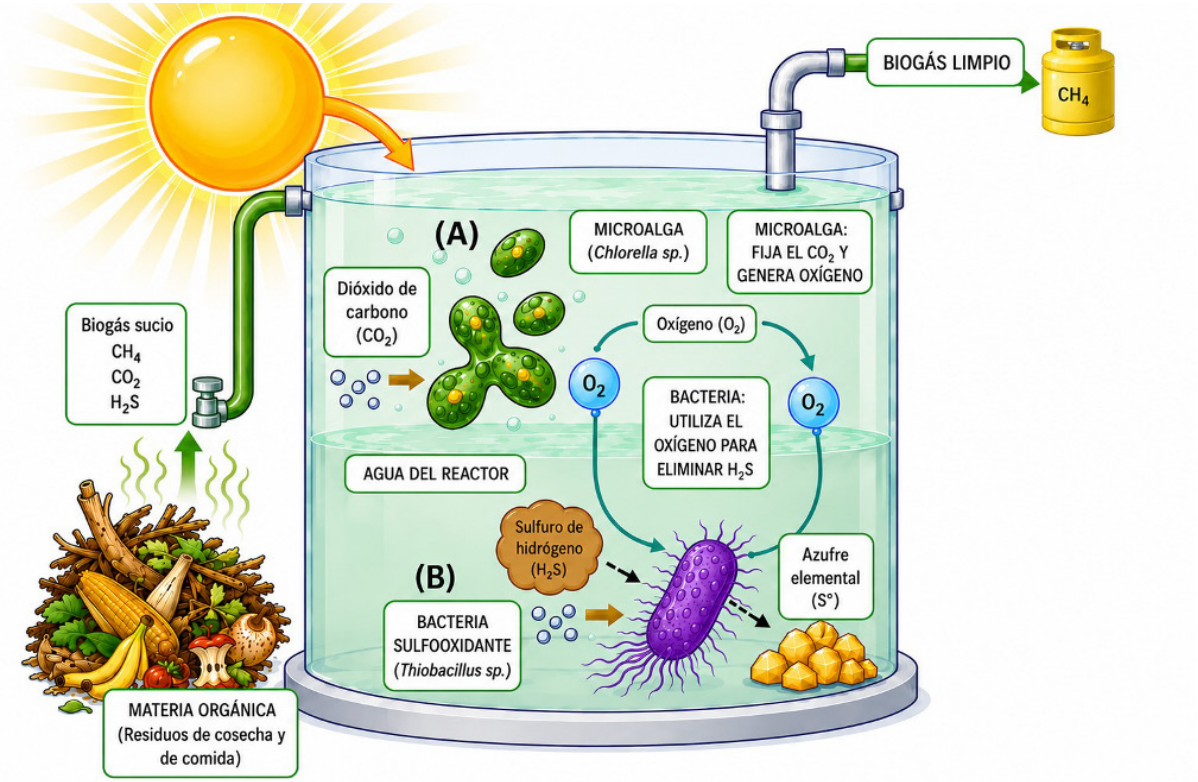


Figura 2. *Funcionamiento interno del reactor cerrado donde los microorganismos limpian el gas de forma natural; en la zona (A), las microalgas capturan el dióxido de carbono y la luz del sol para liberar el oxígeno que, en la zona (B), las bacterias aprovechan para eliminar el dañino sulfuro de hidrógeno, permitiendo que el propio sistema reutilice el carbono y el azufre como alimento para continuar su crecimiento.*

consorcio microbiano muera o pierda eficiencia, representan los principales desafíos técnicos para asegurar su estabilidad a largo plazo.

Un sistema natural que limpia el biogás

Entender cómo funcionan estos sistemas biológicos es como asomarse a una pequeña obra maestra de la naturaleza. Todo comienza cuando el biogás "sucio" entra en contacto con agua -generalmente alcalina- donde habitan en perfecta armonía las microalgas y bacterias. Al burbujear dentro del líquido, los gases tóxicos se disuelven y quedan disponibles para ser transformados. Las microalgas operan como diminutos organismos vegetales microscópicos capaces de realizar la fotosíntesis y capturar luz solar para fijar el carbono, mientras que las bacterias actúan como catalizadores especializados que descomponen o transforman sustancias específicas en el medio. Esta cooperación resulta crucial porque, al unir sus capacidades dentro del reactor, las microalgas absorben el dióxido de carbono y liberan el oxígeno indispensable para que las bacterias descompongan el sulfuro de hidrógeno, de modo que se genera un ciclo de beneficio mutuo que limpia el gas de forma natural.

Lo interesante es que aquí no hay desperdicio. La naturaleza cierra el ciclo: las microalgas aprovechan ese carbono (C) y el azufre (S°) generados como nutrientes para seguir creciendo y fortaleciéndose. Así, se establece una relación en la que todos ganan: mientras unos eliminan los contaminantes críticos, los otros aprovechan esos mismos residuos como alimento. El resultado es un proceso de purificación natural, eficiente y limpio, que mejora la calidad del biogás sin la necesidad de comprar químicos costosos ni generación de residuos

Licenciamiento bajo el cual se publican los contenidos: CC BY-NC-ND 4.0

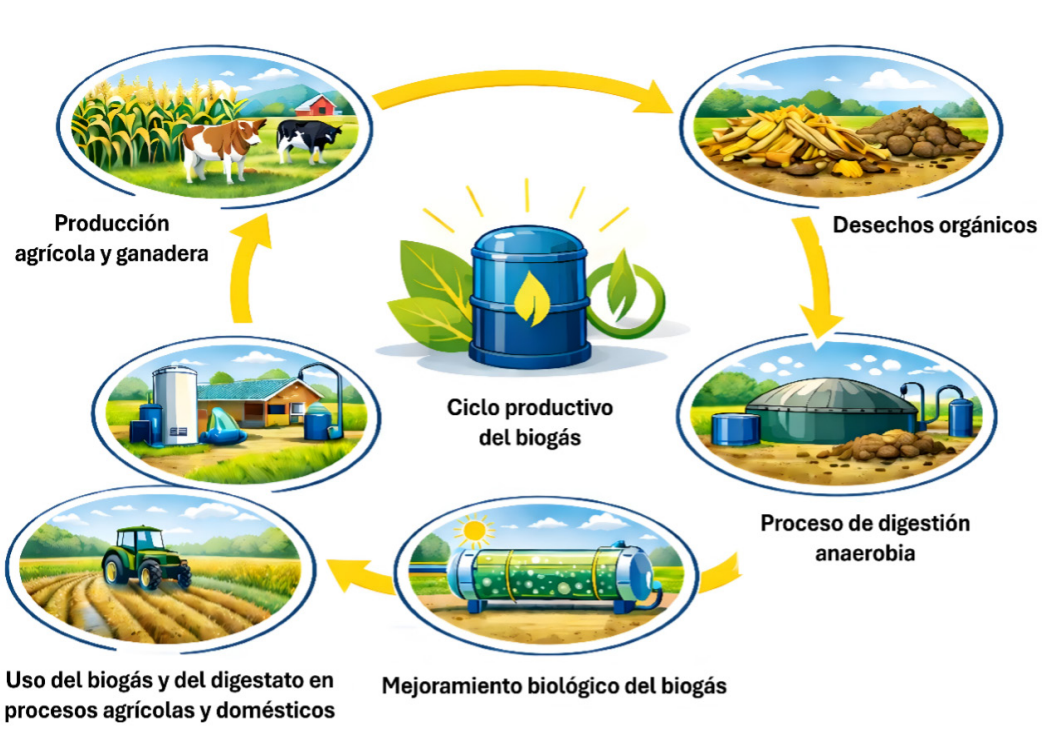


Figura 3. *Esquema conceptual del ciclo de producción, tratamiento y aprovechamiento del biogás en sistemas agropecuarios. Los residuos orgánicos generados en la producción agrícola y ganadera se someten a digestión anaerobia para producir biogás. Posteriormente, el biogás puede ser mejorado mediante procesos biológicos para incrementar su calidad energética. Finalmente, el biogás y el digestato resultante pueden utilizarse en actividades agrícolas y domésticas, cerrando el ciclo de aprovechamiento de los residuos orgánicos.*

industriales peligrosos.

Para llevar a cabo este proceso, los científicos e ingenieros utilizan biorreactores, que son sistemas donde se cultivan estos microorganismos que viven y trabajan bajo condiciones controladas. Algunos de estos reactores consisten en estanques abiertos, muy similares a pequeños canales de agua donde una rueda de paletas mantiene el líquido en movimiento constante, mientras que otros son reactores completamente cerrados, construidos con tubos transparentes que permiten un mayor control del proceso y protegen al cultivo de la contaminación externa [4].

Una oportunidad para el sector rural

Aterrizar el tratamiento biológico del biogás tiene un potencial transformador enorme, especialmente en las zonas rurales. En muchas unidades agrícolas y ganaderas se generan diariamente toneladas de residuos orgánicos, como el estiércol del ganado o los restos de las cosechas, que tradicionalmente se apilan al aire libre. Pero en realidad, todo ese material es una fuente de energía lista para aprovecharse.

Para ilustrar este potencial, imaginemos una pequeña unidad familiar que cuenta con diez vacas y cultiva una hectárea de maíz. Aunque parezca modesto, este sistema puede generar suficientes residuos orgánicos para producir hasta 10 metros cúbicos (m^3) de biogás al día durante un año [5], [6], [7]. Y esta cantidad de energía es más que suficiente para cubrir necesidades y actividades cotidianas fundamentales, como la cocción diaria de los alimentos, el calentamiento de agua para el hogar o para las áreas de maternidad de los animales, e incluso para mantener en funcionamiento pequeños motores y equipos agrícolas.

Licenciamiento bajo el cual se publican los contenidos: CC BY-NC-ND 4.0

Cuando este biogás se somete a un tratamiento biológico para la eliminación de sus contaminantes, su calidad energética da un salto impresionante. Gracias al trabajo conjunto de microalgas y bacterias, las concentraciones iniciales de metano, dióxido de carbono y sulfuro de hidrógeno que veíamos en la Tabla 1, logran transformarse radicalmente. El gas resultante alcanza composiciones típicas de biometano de alta pureza, caracterizadas por contener más del 90% de CH_4, menos de un 10% de CO_2, y lo más importante, una total y completa ausencia de H_2S [8]. Este enriquecimiento permite un aprovechamiento energético muchísimo más seguro, eficiente y prolongado.

Beneficios para las comunidades

El uso de biometano ofrece beneficios muy concretos. En primer lugar, representa un ahorro directo e inmediato en la economía de las familias, ya que reduce drásticamente su dependencia de la compra de tanques de gas LP o de la recolección exhaustiva de leña.

También se contribuye enormemente a mejorar la salud pública, ya que al purificar el biogás se elimina de tajo la exposición a humos molestos y se disminuye a cero la presencia de compuestos tóxicos como el H_2S y el NH_3 dentro de los hogares y las áreas de trabajo.

Además, el ciclo es tan bondadoso que los residuos líquidos y sólidos que quedan dentro del digestor después de producir el gas, conocidos como digestato, se convierten en fertilizantes naturales de excelente calidad. Estos biofertilizantes ayudan a recuperar los nutrientes perdidos, mejoran la estructura y fomentan la biodiversidad del suelo, reduciendo la necesidad de comprar costosos y agresivos fertilizantes químicos. Esta tecnología, en su conjunto, transforma problemas en soluciones: convierte residuos orgánicos en energía útil, reduce las emisiones contaminantes y promueve un uso mucho más inteligente y eficiente de los recursos que ya se tienen a la mano.

Energía limpia a partir de residuos

El tratamiento biológico del biogás demuestra con hechos que los residuos agrícolas y ganaderos no son basura, sino que pueden y deben convertirse en una fuente valiosa de energía renovable. Gracias al incansable trabajo conjunto de las microalgas y las bacterias, es posible purificar el biogás de una forma completamente natural, accesible y altamente efectiva para mejorar su calidad para una gran variedad de usos.

En las comunidades rurales y el sector agroindustrial, esta tecnología representa una ventana de oportunidad invaluable para generar energía de forma local, abatir los costos de producción y darles un segundo aire a los residuos orgánicos. Al mismo tiempo, contribuye de manera activa a impulsar modelos sostenibles de economía circular que no solo fortalecen el cuidado ambiental, sino que detonan el desarrollo y la prosperidad local.

En conjunto, la adopción de estas estrategias biológicas en el tratamiento del biogás representa un nicho importante, tecnológico y ambiental para las comunidades rurales, no solo es una opción para mitigar el cambio climático al capturar los gases de efecto invernadero antes de que se liberen a la atmósfera, sino que también reemplaza los combustibles fósiles tradicionales por una alternativa limpia y renovable desarrollada localmente. Esta transición hacia modelos de economía circular transforma por completo la gestión de los residuos orgánicos, reduce la contaminación latente del agua y los suelos, y dota a la población de herramientas tecnológicas accesibles para proteger su entorno natural, impulsando un bienestar social duradero y un desarrollo económico verdaderamente sostenible.

Licenciamiento bajo el cual se publican los contenidos: CC BY-NC-ND 4.0

Agradecimientos

Mario Longinos Juárez agradece al Consejo Mexiquense de Ciencia y Tecnología (COMECYT) por la beca otorgada con el número EESP2025-0043. Esta investigación fue parcialmente financiada por el proyecto DGAPA-UNAM número IT100726. ChatGPT-5.3 (Open IA) se utilizó exclusivamente para la corrección gramatical ortografía y en la generación de material gráfico durante la preparación de este manuscrito sin comprometer su originalidad.

Referencias

[1] Huynh Nhut, H., Le Thi Thanh, V., & Tran Le, L. (2020). Removal of H_2S in biogas using biotrickling filter: Recent development. *Process Safety and Environmental Protection*, 144, 400–416. https://doi.org/10.1016/j.psep.2020.07.011

[2] Atelge, M. R., Eraydin, A., Senol, H., Diaaeddin, M., Hanif, T., Rais, D. M., Abdulaziz, A., Eskicioglu, C., Muratçobanoğlu, H., Ünalan, S., Kalloum, S., Azbar, N., & Kıvrak, H. D. (2021). A critical overview of the state-of-the-art methods for biogas purification and utilization processes. *Sustainability*, 13(20), 11515. https://doi.org/10.3390/su132011515

[3] Hoyos, E. G., Lomanar, M. L., Blanco, S., Lebrero, R., & Muñoz, R. (2025). Improving photosynthetic biogas purification via process aeration and nanoparticle supplementation. *Bioresource Technology*, 418, 131987. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2024.131987

[4] Zabed, H. M., Akter, S., Yun, J., Zhang, G., Zhang, Y., & Qi, X. (2020). Biogas from microalgae: Technologies, challenges and opportunities. *Renewable and Sustainable Energy Reviews,* 117, 109503. https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109503

[5] Sheaffer, C., & Rosen, C. (2024, marzo). *Harvesting corn stover*. University of Minnesota Extension. https://blog-crop-news.extension.umn.edu/2024/03/harvesting-corn-stover.html

[6] Dirección General de Sistemas de Información Agroalimentaria y Pesquera (DGSIAP). (s. f.). *Anuario estadístico de la producción agrícola*. Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural. Recuperado el 15 de diciembre de 2025, de https://nube.agricultura.gob.mx/cierre_agricola/

[7] Department of Agricultural Resources in a Grant to the Commonwealth of Massachusetts. (s. f.). *Manure inventory*. Center for Agriculture, Food, and the Environment, University of Massachusetts Amherst. Recuperado el 15 de diciembre de 2025, de https://www.umass.edu/agriculture-food-environment/crops-dairy-livestock-equine/fact-sheets/manure-inventory

[8] Longinos-Juárez, M. (2024). *Biofiltración alcalina de H_2S contenido en biogás empleando un consorcio de microalga-bacteria* [Tesis de maestría, Universidad Nacional Autónoma de México]. Repositorio de Tesis UNAM. https://tesiunamdocumentos.dgb.unam.mx/ptd2024/abr_jun/0856458/Index.html

Licenciamiento bajo el cual se publican los contenidos: CC BY-NC-ND 4.0

Recibido: 28-abr-2026 *Aceptado: 28-jun-2026* *e-ISSN 2954-4890*

Sección: *Arte en ciencia e ingeniería*

VIRI y el viaje de la medicina dirigida

VIRI and the journey of targeted medicine

*Francisca Villanueva-Flores[1]**
Igor Garcia-Atutxa[2]

[1]Centro de Investigación en Ciencia Aplicada y Tecnología Avanzada, Instituto Politécnico Nacional. Boulevard de la Tecnología, 1036 Z-1, P 2/2, 62790 Atlacholoaya, Morelos, México.
[2]Escuela Politécnica Superior. Universidad Católica de Murcia (UCAM) Av. de los Jerónimos, 135, 30107, Murcia, España.

**Autor para la correspondencia: fvillanuevaf@ipn.mx*

RESUMEN

Este cuento de divulgación presenta a Athena, una estudiante de ciencias que diseña VIRI, una partícula similar a un virus (PSV) capaz de transportar medicamentos a células tumorales. La historia explica que las PSVs se parecen a los virus por fuera, porque conservan una cápside proteica, pero están vacías por dentro y carecen de material genético para replicarse, por lo que no causan enfermedad. En cambio, funcionan como vehículos que protegen la medicina, reconocen la célula correcta y la liberan en su destino. Así, muestran que una terapia requiere protección, dirección y precisión.

Palabras clave: Partículas similares a virus, VLPs, nanotransportadores, entrega dirigida, terapia antitumoral.

SUMMARY

This science communication story presents Athena, a science student who designs VIRI, a virus-like particle (VLP) that transports drugs to tumor cells. The story explains that VLPs resemble viruses on the outside because they retain a protein capsid, but they are empty on the inside and lack the genetic material required for replication, so they cannot cause disease. Instead, they function as vehicles that protect the medicine, recognize the correct cell, and release it at its destination. Thus, they show that a therapy requires protection, direction, and precision.

Keywords: Virus-like particles, VLPs, nanocarriers, targeted delivery, anticancer therapy.

Licenciamiento bajo el cual se publican los contenidos: CC BY-NC-ND 4.0

Athena llevaba tres noches sin dormir. Era estudiante de ciencias y trabajaba con virus, no para hacerlos más peligrosos, sino para aprender sobre su arquitectura. Su tesis planteaba una pregunta difícil: ¿cómo llevar una medicina hasta una célula tumoral sin dañarla a las demás células?

Y fue entonces cuando se le ocurrió una idea: ¿Y si utilizara una partícula similar a un virus para llevar la medicina hasta las células tumorales? Antes de empezar, Athena siempre aclaraba algo importante: una partícula similar a un virus, o PSV, se parece a un virus por fuera, pero no es un virus. Tiene una cubierta formada por proteínas virales, llamada cápside, pero no contiene el material genético que los virus necesitan para infectar y multiplicarse. En otras palabras, conserva la forma de un virus, pero no su capacidad de causar enfermedad.

Una noche, Athena dibujó en su libreta una pequeña esfera azul compuesta por unidades de proteína hasta formar una PSV a la que llamó VIRI. No era solo un personaje; también era el nombre cariñoso del lote de PSVs que estudiaba en el laboratorio. Después de aquel día, Athena y VIRI se hicieron muy buenas amigas. Cuando los datos no cuadraban, Athena le hablaba bajito al dibujo, como si VIRI pudiera ayudarla a pensar. Era una especie de amiga imaginaria que la acompañaba durante esas largas noches de trabajo.

Una tarde, VIRI se dio cuenta de que estaba vacía por dentro y se entristeció, pero para Athena eso no era una limitación: era una oportunidad.

Entonces Athena le dijo a VIRI:

—No estés triste. Es verdad que tú no eres el fármaco, es decir, la medicina que ayudará a eliminar las células tumorales, pero serás quien lo transporta hasta su destino.

VIRI bajó la mirada. Ser el vehículo que transportaba la medicina le resultó irrelevante. El fármaco parecía más importante: él sí podía frenar a las células tumorales, mientras que VIRI era solo una cápsula vacía.

Athena notó tristeza en su dibujo y sonrió.

—No te menosprecies, pequeña. En la ciencia, transportar el fármaco de forma segura es importante para que la medicina funcione.

El primer ensayo bastó para demostrarlo. Athena añadió el fármaco libremente a sus cultivos celulares con células tumorales y sanas. Algunas tumorales murieron, pero las sanas también sufrieron daño. El fármaco era potente, sí, pero carecía de selectividad: atacaba indiscriminadamente células buenas y malas.

—No basta con tener la medicina —susurró Athena.

VIRI escuchó desde la libreta y pensó: —Quizá el vehículo en el que se transportaba el fármaco también es importante—.

Al día siguiente, Athena volvió a preguntarse: ¿cómo puedo hacer para que VIRI pueda llevar la medicina solo a las células malignas? Entonces recordó que los virus reconocen receptores en las células que quieren infectar, y así es como saben qué células infectar y cuáles no. Los receptores son como cerraduras en la superficie de las células. Para abrir cada cerradura se necesita una llave, llamada ligando. Los virus poseen proteínas que actúan como ligandos, es decir, llaves muy específicas que les permiten entrar solo en ciertas células. Por eso no pueden infectar cualquier célula del cuerpo, sino únicamente aquellas que tienen la cerradura adecuada.

Por lo tanto, Athena estudió qué receptores se expresaban con mayor frecuencia en las células tumorales: no dicen “soy cáncer”, pero algunas células malignas presentan muchas copias de ciertos receptores. Entonces modificó la superficie de VIRI agregando ligandos, pequeñas llaves moleculares capaces de abrir las puertas de las células tumorales. Además,

Licenciamiento bajo el cual se publican los contenidos: CC BY-NC-ND 4.0

dentro de VIRI agrego la medicina a transportar, un fármaco anticancerígeno (Fig. 1) (2,3).

—Tres reglas —le dijo, escribiéndolas junto a su dibujo—: proteger, reconocer y liberar.

VIRI partió por Cuerpópolis, el mundo imaginario que representaba el interior del cuerpo. Dentro de su cápside, el fármaco se movía impaciente.

—Déjame salir —el fármaco dijo. Yo soy la medicina.

—Todavía no —respondió VIRI. Una medicina poderosa en el lugar equivocado también puede causar daño.

La primera puerta apareció en una célula sana. VIRI se acercó, pero su llave no encajó con firmeza. Antes, habría pensado que entrar en cualquier célula era una victoria. Pero ahora recordaba la voz de Athena: la misión no era atacar todo a su paso, sino encontrar la célula correcta y actuar únicamente contra las células malignas.

Siguió avanzando. Los vasos se volvieron irregulares y el ambiente se volvió más ácido. Era el vecindario tumoral: una zona desordenada, con células que crecían de forma descontrolada.

Entonces VIRI vio unas cerraduras que brillaban a lo lejos en células malignas. En la membrana de una célula tumoral, esas cerra-

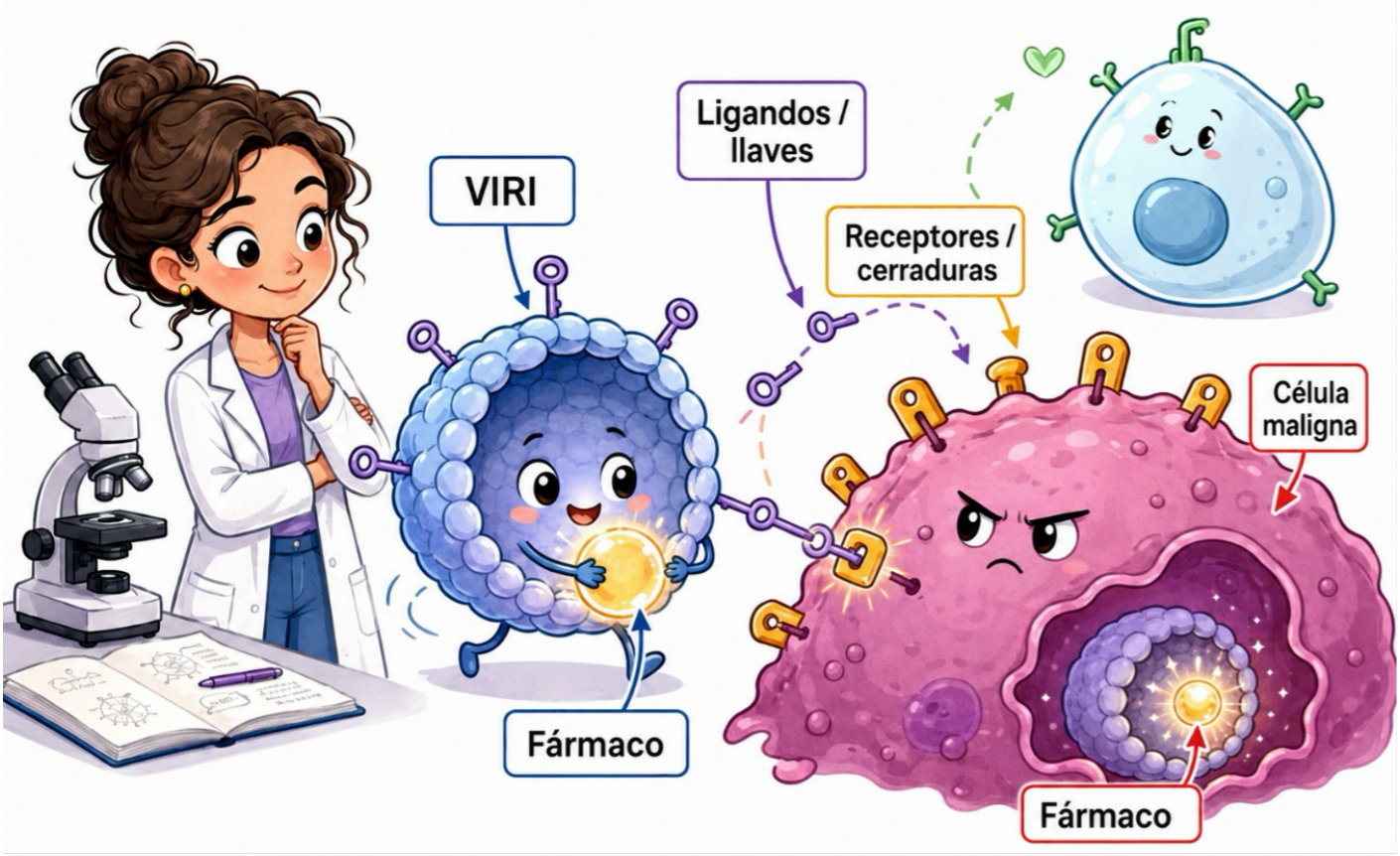


Figura 1. *VIRI como vehículo de entrega dirigida de fármacos. La ilustración representa a Athena, una estudiante de ciencias, diseñando VIRI, una partícula similar a un virus (PSV) capaz de transportar un fármaco a una célula maligna. VIRI conserva una cubierta proteica inspirada en la arquitectura viral, pero no contiene material genético infeccioso. En la imagen, el fármaco viaja protegido dentro de VIRI, mientras que los ligandos/llaves de su superficie le ayudan a reconocer los receptores/cerraduras presentes en la célula maligna. Esta interacción favorece que VIRI entre en la célula correcta y libere su contenido allí, lo que reduce el daño en la célula sana. La figura resume el principio central del cuento: una medicina no solo necesita potencia, sino también protección, reconocimiento y liberación en el lugar adecuado. Imagen generada con ChatGPT/OpenAI y revisada por los autores.*

Licenciamiento bajo el cual se publican los contenidos: CC BY-NC-ND 4.0

duras, es decir, los receptores que Athena había buscado, se repetían una y otra vez. Las pequeñas llaves de VIRI (ligandos) encajaron con firmeza y abrieron la puerta de las células tumorales, permitiendo su entrada. La célula envolvió a VIRI en una pequeña burbuja, llamada vesícula, y lo llevó hacia el interior (4).

—Ahora sí —celebró el fármaco. ¿Ya puedo salir?

—Aún falta —dijo VIRI.

Dentro de la célula, entraron en un pequeño compartimiento llamado endosoma. Era como una sala cerrada en la que se almacenaban numerosas sustancias para su destrucción o reciclaje. Y fue entonces cuando el fármaco tuvo miedo de ser degradado, ya que el ambiente se volvió cada vez más ácido. Sin embargo, VIRI protegió al fármaco y comenzó a abrirse lentamente; no se rompió por completo, sino que cedió lo suficiente como para liberar de forma segura el fármaco que contenía fuera del endosoma (4,5).

El fármaco salió y encontró su objetivo y empezó a actuar en la célula maligna haciendo que esta perdiera fuerza

A la mañana siguiente, Athena miró el microscopio. Muchas células tumorales habían dejado de crecer, y lo mejor es que las células sanas no habían sido dañadas y seguían creciendo. Luego revisó que VIRI mantuviera el tamaño esperado y que el fármaco se hubiera liberado donde debía. Era una prueba de que elegir bien el destino importaba.

Athena acarició con el dedo el dibujo de VIRI.

—Lo hiciste bien —murmuró. No por ser el más fuerte, sino por cuidar el camino.

VIRI observó las gráficas y comprendió algo que no figuraba en ningún título de tesis: el vehículo no era un adorno. Sin protección, el fármaco podía degradarse; sin reconocimiento, podía llegar a células equivocadas y dañar tejido sano; sin liberación adecuada, podía quedar atrapado. El fármaco tenía el efecto, pero VIRI ayudaba a que se produjera en el lugar y en el momento oportunos.

En la discusión de su tesis, Athena no escribió que las PSVs fueran “balas mágicas”. Escribió algo más claro: podían ser herramientas prometedoras porque funcionaban como pequeños vehículos de entrega. Su cubierta ayudaba a proteger la medicina, su interior podía transportarla y su superficie podía ajustarse para reconocer mejor ciertas células.

Pero aún quedaba mucho por hacer y aprender sobre las PSVs, pues antes de pensar en usarlas en pacientes enfermos, tenía que seguir estudiándolas para demostrar varias cosas: que podían cargar suficiente medicamento, mantenerse estables durante el viaje, no dañar células sanas, liberar su contenido en el lugar adecuado y ser seguras (1,5).

Athena cerró la libreta con una sonrisa. VIRI ya no se sintió como una cápsula secundaria. No era el fármaco; era cierto. Pero había aprendido, junto con Athena, que una medicina no solo necesita potencia; también necesita protegerse durante el viaje, reconocer la célula correcta y liberarse en el momento adecuado.

Cuando alguien preguntaba qué podía hacer una cápsula vacía inspirada en un virus, VIRI respondía:

—No soy la medicina que actúa al final. Soy quien la cuida para que llegue.

Agradecimientos

Se agradece el financiamiento de los fondos SIP20254781 y MULTI-2026-0029-M3, otorgado por el Instituto Politécnico Nacional, así como el proyecto Ciencia Básica y de Frontera 2025 (CBF-2025-I-1532), otorgado por la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnolo-

Licenciamiento bajo el cual se publican los contenidos: CC BY-NC-ND 4.0

gía e Innovación (SECIHTI), para la realización de este trabajo. Se empleó inteligencia artificial (ChatGPT-5.4, OpenAI) únicamente como apoyo para la revisión gramatical y sintáctica del manuscrito. La originalidad y el rigor científico son responsabilidad exclusiva de las personas autoras. Los autores expresan su más sincero agradecimiento a Athena García-Villanueva, nuestra bebé en camino, cuya presencia ha sido una fuente de inspiración, fortaleza y esperanza durante el desarrollo de este trabajo.

Referencias

[1] Mejía-Méndez, J. L., Vázquez-Duhalt, R., Hernández, L. R., Sánchez-Arreola, E., & Bach, H. (2022). Virus-like particles: Fundamentals and biomedical applications. *International Journal of Molecular Sciences*, 23(15), 8579. doi: 10.3390/ijms23158579

[2] He, J., Yu, L., Lin, X., Liu, X., Zhang, Y., Yang, F., & Deng, W. (2022). Virus-like particles as nanocarriers for intracellular delivery of biomolecules and compounds. *Viruses*, 14(9), 1905. doi: 10.3390/v14091905

[3] Ikwuagwu, B., & Tullman-Ercek, D. (2022). Virus-like particles for drug delivery: A review of methods and applications. *Current Opinion in Biotechnology,* 78, 102785. doi: 10.1016/j.copbio.2022.102785

[4] Travassos, R., Martins, S. A., Fernandes, A., Correia, J. D. G., & Melo, R. (2024). Tailored viral-like particles as drivers of medical breakthroughs. *International Journal of Molecular Sciences*, 25(12), 6699. doi: 10.3390/ijms25126699

[5] Kim, K. R., Lee, A. S., Kim, S. M., Heo, H. R., & Kim, C. S. (2023). Virus-like nanoparticles as a theranostic platform for cancer. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology,* 10, 1106767. doi: 10.3389/fbioe.2022.1106767

Licenciamiento bajo el cual se publican los contenidos: CC BY-NC-ND 4.0

Recibido: 06-mar-2026 Aceptado: 27-abr-2026 e-ISSN 2954-4890

Sección: *Arte en ciencia e ingeniería*

Código rojo: ¡La piel está bajo ataque!

Code red: The skin is under attack!

Iliana C. Martínez-Ortíz
*Francisca Villanueva-Flores**

Centro de Investigación en Ciencia Aplicada y Tecnología Avanzada, Instituto Politécnico Nacional, Boulevard de la Tecnología, 1036 Z-1, P 2/2, 62790, Xochitepec, Morelos, México.

**Autor para la correspondencia: fvillanuevaf@ipn.mx*

RESUMEN

Código rojo: ¡La piel está bajo ataque! es un cuento de divulgación científica que explica el proceso de cicatrización mediante la metáfora del "Reino de la Dermis". A través de una narración alegórica, el texto presenta de forma accesible las fases de la reparación cutánea: hemostasia, inflamación, proliferación celular y remodelación tisular. Plaquetas, fibrina, neutrófilos, macrófagos, fibroblastos, miofibroblastos y queratinocitos aparecen como protagonistas de una respuesta biológica coordinada. El manuscrito busca acercar al público no especializado a la complejidad de la reparación de heridas, mostrando que una cicatriz tiene memoria biológica del daño y de la recuperación.

Palabras clave: Piel, cicatrización, reparación de heridas, inflamación, cicatriz.

SUMMARY

Code Red: The Skin Is Under Attack! is a science communication short story that explains wound healing through the metaphor of the "Kingdom of Dermis." Through an allegorical narrative, the text presents in accessible language the main stages of skin repair: hemostasis, inflammation, cellular proliferation, and tissue remodeling. Platelets, fibrin, neutrophils, macrophages, fibroblasts, myofibroblasts, and keratinocytes are portrayed as protagonists of a coordinated biological response. The manuscript aims to bring non-specialized readers closer to the complexity of wound repair, showing that a scar has a biological record of injury, survival, and recovery.

Keywords: Wound, healing, wound repair, inflammation, scar.

Licenciamiento bajo el cual se publican los contenidos: CC BY-NC-ND 4.0

En el Reino de Dermis no había castillos ni dragones… porque la muralla MÁS poderosa ya existía: una sábana viva, tibia y elástica que se estiraba con la risa y se tensaba con el miedo. La llamaban Piel. No pedía medallas. Solo aguantaba. Todo el tiempo (1).

Aquel día parecía uno de esos "normalitos". Hasta que el mundo hizo lo que mejor sabe hacer: tropezar. Una llave traicionera, una rama con complejo de espada, una uña con ganas de protagonismo. Un segundo. Un "¡ay!" chiquito. Y entonces… ¡Zaas! Un relámpago rojo abrió la frontera, como si alguien hubiera rasgado el cielo con un alfiler.

—¡Brecha en el sector epidermis! —Aulló la alarma.

Primero salieron disparados los mensajeros del dolor: chispas eléctricas que atravesaron caminos invisibles y encendieron todas las sirenas del reino. "¡No toques ahí! ¡No toques ahí!", gritaban, exagerados pero útiles. Luego, desde el Gran Río Carmesí, llegaron los Plaquetarios: herreros diminutos con cascos brillantes y manos que iban a mil por hora (Fig. 1) (2).

No debatieron. No pidieron permiso. Se lanzaron al hueco como si fueran el último grupo de héroes en un videojuego: ¡apilarse, pegarse, sellar! En segundos formaron un tapón tembloroso. Detrás apareció la Orden de la Fibrina, tejedores serios que parecían abuelos ninja. Lanzaron una red firme, como si cosieran el aire con hilo de acero. La brecha dejó de ser un abismo: ahora era un puente improvisado, feo pero funcional. Desde fuera, ese puente comenzaría a parecerse a algo muy conocido: la costra, esa capa seca que vemos cuando una herida empieza a cerrarse. Tiempo ganado: nivel superado (3).

Entonces cayó la "niebla ardiente". Así llamaban a la inflamación: una bruma caliente que enrojecía el campo y lo hinchaba como si la zona se hubiera tragado un globo. No era berrinche: era estrategia. Los portones de los vasos se abrieron de par en par; los camiones de suministros entraron sin pagar peaje; las señales químicas sonaron como campanas locas: "¡Aquí! ¡Aquí! ¡Aquí!"

En primera línea, los mastocitos tocaron sus cuernos y soltaron histamina, una orden rápida que gritaba: "¡Abran puertas y dejen pasar a la tropa!". Al mismo tiempo, los exploradores linfáticos empezaron a drenar el exceso de agua y a llevar informes al interior: qué fue lo que entró, qué tanto daño causó y qué refuerzos se necesitan. Todo parecía caótico, pero era logística de élite: calor para mover, hinchazón para amortiguar y dolor para obligarte a proteger la zona, sin hacerte el valiente (4).

Los primeros en llegar fueron los neutrófilos, soldados exprés sin discursos. Entraron en motos por una calle estrecha: veloces, directos, sin mirar atrás. Su misión era simple y brutal: que ningún microbio oportunista, ladrón de frontera, montara campamento. Atacaron, atraparon, se sacrificaron. Donde peleaban quedaba un barro espeso de enemigos, armas y restos. Afuera, los aldeanos lo llamarían: "pus". Dentro del Reino, era el precio de no perder la muralla.

Cuando el fragor bajó, llegaron los macrófagos. No corrían: avanzaban como jueces con escoba y memoria. Recogieron cadáveres, barrieron escombros, apagaron incendios inútiles. Pero su trabajo no era solo limpiar: también debían decidir cuándo la batalla ya había cumplido su propósito, porque una guerra que no se detiene termina por dañar al propio reino. Ese cambio de "pelear" a "reparar" es lo que, en la ciencia, se conoce como la resolución de la inflamación. Y en medio del campo limpio clavaron un estandarte enorme:

—¡Se acabó la guerra! Empieza la reconstrucción.

A esa orden acudieron los arquitectos fibroblastos, con planos enrollados y carretas lle-

Licenciamiento bajo el cual se publican los contenidos: CC BY-NC-ND 4.0

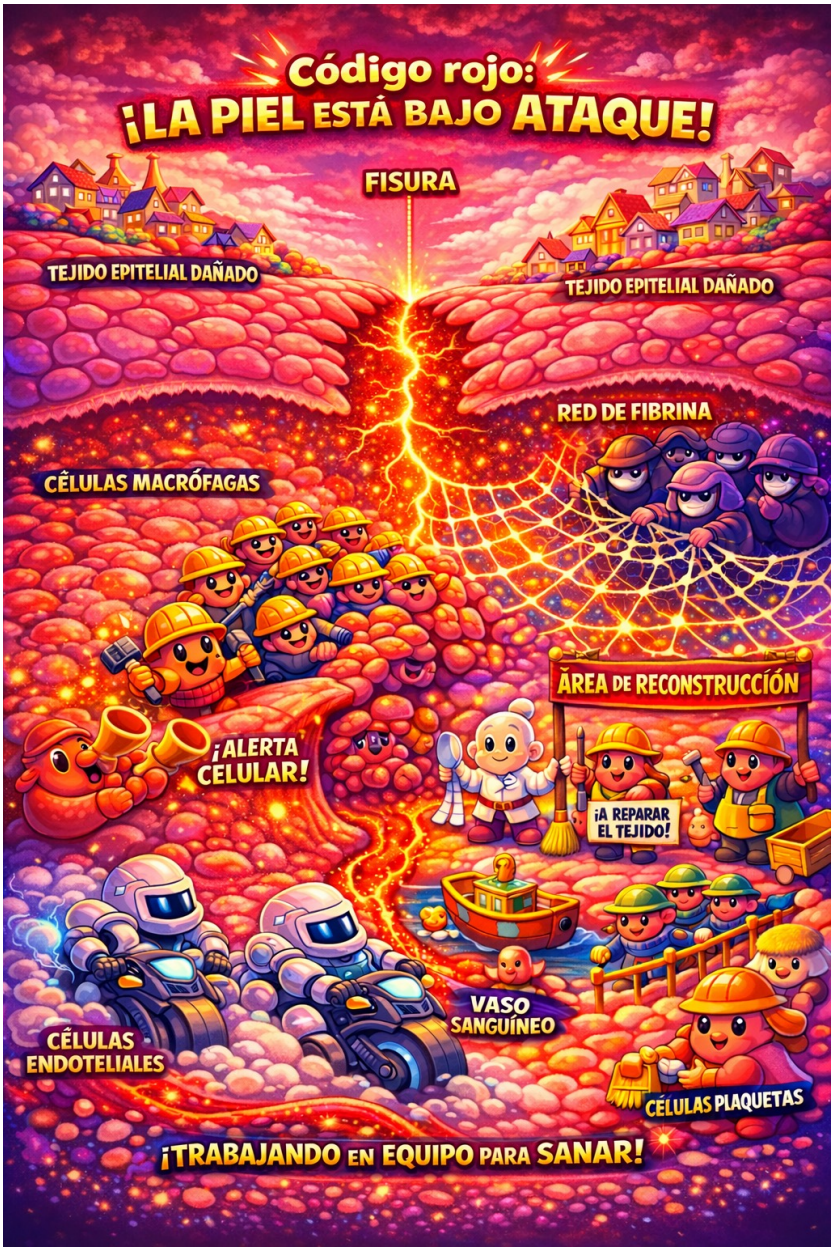


Figura 1. *Ilustración del "Reino de Dermis" como una ciudad dentro de una muralla viva: la piel (muralla rosada) presenta una brecha en forma de relámpago, mientras las plaquetas (pequeños herreros) forman un tapón y la fibrina teje una red de cierre. La inflamación se representa como una niebla cálida y el "Gran Río Carmesí" transporta suministros; los neutrófilos llegan en primera línea, los mastocitos liberan señales (histamina) y los macrófagos coordinan la limpieza y la reconstrucción bajo el estandarte "Reconstrucción". Fibroblastos, miofibroblastos y queratinocitos participan en la reparación y el fortalecimiento de la frontera.*

nas de colágeno, la cuerda del reino. Al principio construyeron con prisa, haciendo nudos torpes, porque la urgencia no conoce la perfección. Levantaron andamios, rellenaron la grieta, tensaron puentes. A su lado trabajaron los ingenieros de Ríos Nuevos: brotaron vasitos sanguíneos como caminos recién pintados, llevando nutrientes y oxígeno al barrio en obras. Este proceso, que en la ciencia se denomina angiogénesis, ayudaba a mantener viva la zona dañada. Por eso el terreno se veía rosado y activo: era una ciudad creciendo a toda velocidad (5).

Y cuando había que apretar la costura, entraron los miofibroblastos, obreros de fuerza. Tiraban del colágeno como si ajustaran un

Licenciamiento bajo el cual se publican los contenidos: CC BY-NC-ND 4.0

cordón gigante: ¡tensar, acercar los bordes, reducir el hueco! No era magia. Era músculo con propósito.

Faltaba el techo. Desde los bordes intactos avanzaron los queratinocitos, artesanos de superficie. No peleaban: deslizaban su oficio. Se extendieron como una alfombra que se desenrolla, cerrando la frontera con paciencia obstinada. Puntada tras puntada, hasta que una mañana cualquiera la brecha dejó de existir a simple vista.

Pero Dermis todavía no cantó victoria. Porque la verdadera victoria no es "cerrar" … es "fortalecer".

Durante semanas, el Consejo de Remodelación trabajó en silencio. Quitó andamios, reordenó fibras, cambió el colágeno apresurado por otro más resistente, alineado como tropas disciplinadas. Ajustó tensiones, pulió irregularidades. Aun así, la zona nunca volvió a ser idéntica: donde hubo relámpago quedó una cicatriz, una firma discreta.

No era una derrota. Era un registro. En el Reino de Dermis, las cicatrices son crónicas que dicen: "Aquí se abrió la frontera. Aquí hubo batalla. Y aun así… seguimos en pie".

Y si algún día el mundo vuelve a rasgar la muralla, el reino recordará este mapa de guerra… y responderá todavía más rápido.

Agradecimiento

Se agradece el financiamiento de los fondos SIP20254781 y MULTI-2026-0029-M3, otorgados por el Instituto Politécnico Nacional, así como el proyecto Ciencia Básica y de Frontera 2025 (CBF-2025-I-1532), otorgado por la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI), para la realización de este trabajo. Se empleó inteligencia artificial (ChatGPT-5.4, OpenAI) únicamente como apoyo en la revisión gramatical y sintáctica del manuscrito. La originalidad y el rigor científico son responsabilidad exclusiva de las personas autoras.

Referencias

[1] Mamun, A. A., Shao, C., Geng, P., Wang, S., & Xiao, J. (2024). Recent advances in molecular mechanisms of skin wound healing and its treatments. Frontiers in Immunology, 15, 1395479. doi:10.3389/fimmu.2024.1395479

[2] Vilahur, G., & Fuster, V. (2025). Interplay between platelets and coagulation: From protective haemostasis to pathological arterial thrombosis. European Heart Journal, 46(5), 413–423. doi:10.1093/eurheartj/ehae776

[3] Nazari, M., Taremi, S., Elahi, R., Mostanadi, P., & Esmeilzadeh, A. (2025). Therapeutic Properties of M2 Macrophages in Chronic Wounds: An Innovative Area of Biomaterial-Assisted M2 Macrophage Targeted Therapy. Stem Cell Reviews and Reports, 21(2), 390–422. doi:10.1007/s12015-024-10806-3

[4] Bártolo, I., Reis, R. L., Marques, A. P., & Cerqueira, M. T. (2022). Keratinocyte Growth Factor-Based Strategies for Wound Re-Epithelialization. Tissue Engineering Part B: Reviews, 28(3), 665–676. doi:10.1089/ten.teb.2021.0030

[5] Matar, D. Y., Ng, B., Darwish, O., Wu, M., Orgill, D. P., & Panayi, A. C. (2023). Skin Inflammation with a Focus on Wound Healing. Advances in Wound Care, 12(5), 269–287. doi:10.1089/wound.2021.0126

Licenciamiento bajo el cual se publican los contenidos: CC BY-NC-ND 4.0

Recibido: 21-dic-2024 Aceptado: 08-jun-2026 e-ISSN 2954-4890

Sección: *Concientifica*

La Citogenética y sus aportaciones en el desarrollo de las ciencias

Cytogenetics and its contributions to the development of science

Viridiana García-Rodríguez[1]
Dalia Molina-Romero[2]
Verónica Cepeda-Cornejo[1]*

[1]*Biotecnología Molecular y de Cultivos, Facultad de Ciencias Biológicas, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, 72570, Puebla, México.*
[2]*Laboratorio de Interacciones Bioquímicas y Moleculares Aplicadas, Facultad de Ciencias Biológicas, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, 72570, Puebla, México.*

**Autor para la correspondencia: veronica.cepeda@correo.buap.mx*

RESUMEN

La citogenética es una rama de la genética que estudia a los cromosomas en base a su estructura, función, comportamiento y las alteraciones que estos puedan presentar. La citogenética clásica estudia la morfología y el número de cromosomas y la citogenética molecular se encarga de la localización de las zonas específicas donde se ubican los genes. La citogenética proporciona información útil para programas de mejoramiento genético en plantas y para la comprensión de enfermedades causadas por alteraciones (aberraciones) cromosómicas. Los avances en citogenética resultan fundamentales en la búsqueda de plantas resistentes a sequias ante un escenario de cambio climático global.

Palabras clave: Citogenética vegetal, hibridación fluorescente in situ, cromosomas.

SUMMARY

Cytogenetics is a branch of genetics that studies chromosomes based on their structure, function, behavior, and any abnormalities they may exhibit. Classical cytogenetics studies chromosome morphology and number, while molecular cytogenetics focuses on locating the specific regions where genes are situated. Cytogenetics provides useful information for plant breeding programs and for understanding diseases caused by chromosomal abnormalities (aberrations). Advances in cytogenetics are essential in the search for drought-resistant plants in the context of global climate change.

Keywords: Plant cytogenetics, in situ fluorescent hybridization, chromosomes.

Licenciamiento bajo el cual se publican los contenidos: CC BY-NC-ND 4.0

Función e importancia de los cromosomas

Alguna vez te has preguntado: ¿qué es lo que nos hace tener el pelo obscuro o claro?, ¿ser más altos o bajos?, ¿estar más delgados o robustos? La información que nos hace ser como somos está contenida en un fragmento de ADN conocido como gen. Los genes están contenidos en los cromosomas y se encuentran dentro de cada una de nuestras células. Los cromosomas se definen como un paquete ordenado de ácido desoxirribonucleico (ADN) que está unido a proteínas llamadas histonas y le dan una estructura; se encuentran dentro de las células y son esenciales en todos los organismos; debido a que son los encargados de portar la información genética, tanto en células eucariotas como en células procariotas. Las células eucariotas se caracterizan por tener un núcleo rodeado por una membrana en donde se almacena el ADN; a diferencia de las células procariontes que su material genético es una molécula de ADN circular y no está protegido por una membrana. Es así como el ADN es el material que se hereda de una célula madre a una célula hija; este material genético debe conservarse de forma íntegra después de que ocurre la división celular y durante toda la vida del organismo [1, 2].

Los cromosomas contienen el material genético de las células, su nombre proviene del griego cromos: color y soma: cuerpo. La estructura del cromosoma comprende tres regiones: el brazo corto (p), el centrómero (parte constreñida) y el brazo largo (q) y constricciones que cuando se localizan en el brazo corto reciben el nombre de satélites y cuando están en el brazo largo reciben el nombre de constricciones secundarias (Figura 1). La posición del centrómero establece la clasificación de los cromosomas, que comprende a los tipos: metacéntricos, submetacéntricos, subtelocéntricos y telocéntricos [2].

La morfología del cromosoma se modifica en cada etapa del ciclo celular. Este ciclo está integrado por las fases: G1, S, G2 y M. En la fase M se separan los cromosomas y migran activamente hacia los polos opuestos de la célula. En las células somáticas, que son aquellas que conforman a todo el organismo, su fase M es la mitosis. A diferencia de las células reproductivas (ovulo y espermatozoide en células animales) que su ciclo celular contiene primero a una mitosis y después a la meiosis [1]. Durante la mitosis se duplica el material genético y se separan dos conjuntos de cromosomas (2n), mientras en la meiosis se separa un conjunto completo de cromosomas (n). La mitosis está conformada por cuatro etapas: profase, metafase, anafase y telofase. Es durante la metafase que los cromosomas se encuentran en su mayor grado de contracción y es posible observar con detalle la morfología de los cromosomas y elaborar su cariotipo (Figura 1).

Importancia del cariotipo

El cariotipo es el conjunto completo de los cromosomas de un individuo ordenado por su número, forma y estructura [1]. El cariotipo es específico para cada especie; los detalles morfológicos le confieren un valor distintivo, comparable a una huella digital [1] y esto tiene relevancia en la caracterización taxonómica de las especies y en programas de mejoramiento genético. La observación de un gran número de células vegetales, animales o microorganismos nos permite percibir las grandes diferencias en la diversidad de cariotipos que existen entre las especies, lo que nos conduce a preguntarnos: ¿por qué resulta interesante conocer el cariotipo? La citogenética no solo se enfoca en el conocimiento de la morfología de los cromosomas de todas las células, va más allá de conocer la ubicación del centrómero, la longitud de los brazos, el número de satélites o constricciones secundarias presentes en la especie. La citogenética proporciona información valiosa para campos como la sistemática,

Licenciamiento bajo el cual se publican los contenidos: CC BY-NC-ND 4.0

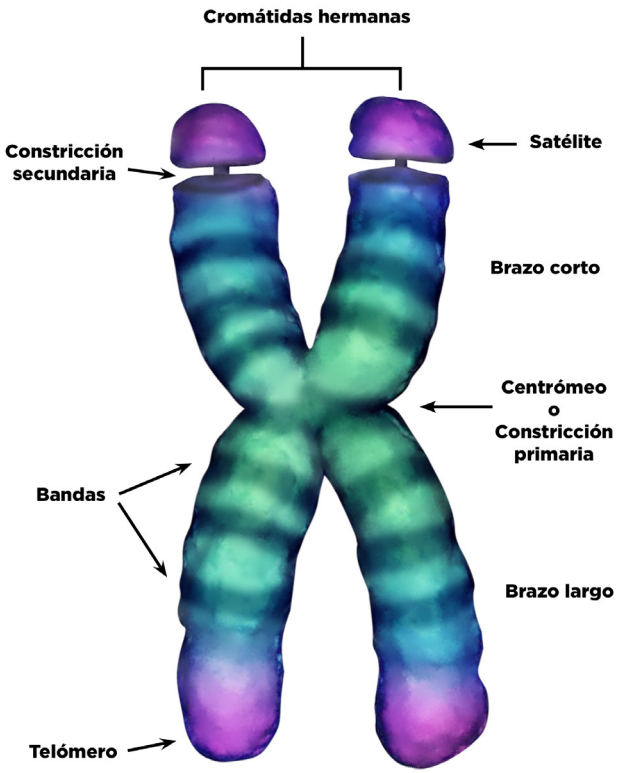


Figura 1. *Estructura del cromosoma comprende región central (centrómero), brazo corto, brazo largo, satélite (situado en brazo corto) y constricción secundaria (situada en brazo largo) (Ilustración elaborada por Carmen Gutiérrez Cornejo, 2026).*

la evolución y la toxicología [1, 2].

Las técnicas de citogenética clásica comprenden el uso de colorantes con tonos rojizos (orceína) y rosados (fucsina básica) que permiten observar la estructura del cromosoma a detalle con ayuda del microscopio óptico (Figura 2). Una herramienta más poderosa para la observación de los detalles finos de los cromosomas es la microscopia de fluorescencia que nos permite observar a detalle las regiones organizadoras del nucléolo (NOR) que están localizadas tanto en el brazo largo como en el brazo corto de los cromosomas. Son regiones muy conservadas y se emplean como un método de identificación de las especies [1, 2].

Los tejidos de las plantas que se utilizan para la visualización de los cromosomas mitóticos son las regiones en crecimiento constante ubicadas en los extremos de las hojas y de la raíz, mientras que para observar meiosis se emplean gránulos de polen y óvulos de flores en desarrollo [1, 3].

Introducción a la Citogenética Vegetal

La citogenética deriva de la combinación de dos disciplinas biológicas: la citología, que estudia la estructura, función y organización de las células y la genética, que es la ciencia dedicada al estudio de: 1) la transmisión de caracteres (herencia de la información genética de padres a hijos), 2) genética de poblaciones (suma de la información genética de los individuos que componen una población) y 3) la genética molecular que estudia la estructura, función, expresión y regulación de los genes a nivel molecular (ADN y ARN); además de la regulación de la expresión de los genes que determinan las características que vemos del organismo (fenotipo). El fenotipo de un organismo depende de la información propia de los genes y de forma importante también influye el ambiente [4].

Combinando la citología y la genética surge la citogenética, esta última se enfoca en el número, morfología cromosómica, estructura y función, tanto de células somáticas como de células gaméticas o reproductivas (polen y óvulos en las plantas). La recombinación ocurre durante la meiosis y consiste en el intercambio de material genético entre los cromosomas homólogos (cromosomas con la misma información genética, uno aportado por el padre y otro aportado por la madre durante el proceso de reproducción) [1].

En particular, toda la información citogenética publicada es de gran relevancia para la industria agrícola, que día a día requiere cubrir la demanda de alimentos. Los agrónomos se enfrentan al reto de generar variedades más eficientes a la sequía, crecimiento acele-

Licenciamiento bajo el cual se publican los contenidos: CC BY-NC-ND 4.0

rado de las plantas, aumento de la producción, maduración temprana del grano y una mejor adaptación a distintos ambientes [4].

Al estudiar los cromosomas de los organismos y evaluar la variedad del material genético que existe en una población, podemos diseñar estrategias para preservar la diversidad genética y proteger a las especies amenazadas [3]. Por lo que la citogenética contribuye a la conservación de especies que se encuentran en peligro de extinción, ya sea en su entorno natural o en condiciones de cultivo.

Historia y Evolución de la Citogenética en Plantas

El inicio de la citogenética se remonta al descubrimiento del número cromosómico de diferentes especies vegetales, así como el estudio de su estructura. Una de las pioneras fue Barbara McClintock con su trabajo sobre el maíz (*Zea mays*), que identificó a los "genes saltarines" o "transposones", estudios que facilitaron la comprensión de la estructura del genoma de las plantas. La utilización de tinciones de los cromosomas permitió generar mapas citogenéticos en otras especies, como arroz (*Oryza sativa*), tomate (*Solanum lycopersicum*) y sorgo (*Sorghum bicolor*); aunque las primeras técnicas tenían ciertas limitaciones para las especies cuyos cromosomas mantienen tamaños similares [1, 3, 5].

Conforme fueron avanzando los descubrimientos, las técnicas citogenéticas fueron más novedosas, utilizando tinciones fluorescentes, conocidas como técnicas *in situ*, también se mejoró la visualización de los cromosomas en la fase de mitosis de células somáticas [3].

Técnicas de Citogenética Clásica y Molecular en plantas

Como ya se mencionó previamente, la citogenética clásica se enfoca en estudiar el número y la morfología de los cromosomas, mediante tinciones básicas que emplean diversos colorantes para su observación al microscopio (Figura 2). Algunos colorantes tiñen por completo el cromosoma (orceína y fucsina básica) y otros como la Giemsa, solo tiñen algunas regiones generando bandas que permiten identificar alteraciones cromosómicas.

La citogenética molecular detecta la ubicación precisa de los genes sobre el cromosoma (Figuras 3 y 4) y emplea métodos como la hibridación fluorescente *in situ* (FISH, por sus siglas en inglés Fluorescence in situ Hybridization) y la Hibridación genómica in situ (GISH, por sus siglas en inglés Genomic in situ hybridization). La técnica FISH es usada para detectar anomalías cromosómicas y es de gran ayuda en el diagnóstico de enfermedades (Figura 5) [1, 3, 5]. La técnica de GISH resulta de una modificación de la técnica de FISH y permite identificar la procedencia del genoma en plantas híbridas, ya sea la determinación de cultivares de híbridos intergenéricos (organismos que resulta del cruzamiento entre plantas de géneros distintos) e interespecíficos (organismos resultantes del cruzamiento entre plantas de especies distintas pertenecientes al mismo género) [1, 3, 5]. Inclusive es posible analizar a los cromosomas en la fase mitótica, para identificar al organismo incluso cuando no se tiene información sobre la morfología cromosómica de una especie [5]. Las técnicas de FISH y GISH ocupan compuestos fluorescentes, por ejemplo: fluoresceína y rodamina, que brillan cuando son expuestos a lámparas especiales como las de mercurio.

Tendencias actuales en el campo de la citogenética

Uno de los aportes más significativos del estudio citogenético es la comprensión de la morfología y número de cromosomas. Esta

Licenciamiento bajo el cual se publican los contenidos: CC BY-NC-ND 4.0

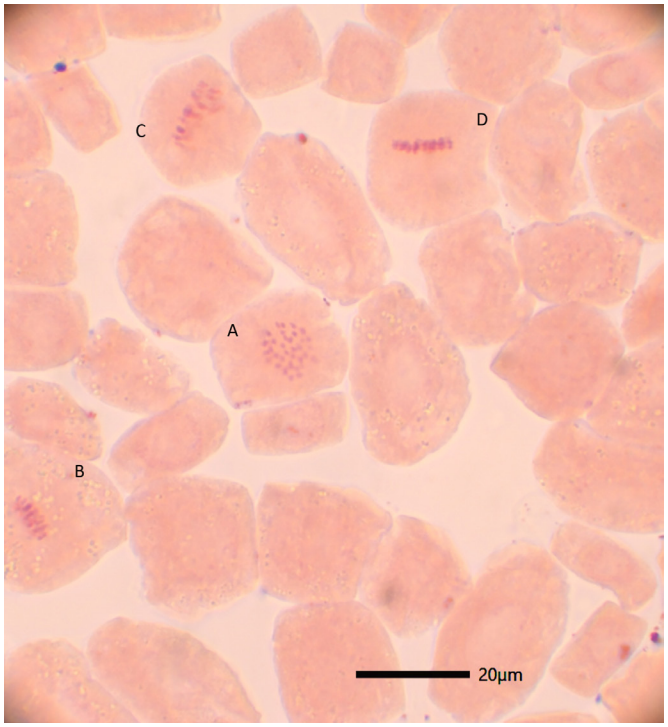


Figura 2. *Se observa un campo al microscopio óptico de los cromosomas de Amaranthus sp. La muestra se obtuvo de meristemos de raíz y se tiñó con la técnica de aceto-orceína. Se pueden observar distintas etapas de la mitosis. Al centro, A) cromosomas definidos y en metafase temprana, los cromosomas se encuentran en el máximo nivel de contracción y separados. En la periferia, hay tres células en proceso de división celular, B) y D) las células se encuentran en metafase tardía, los cromosomas se alinean en la parte media de la célula para la separación de las cromátidas hermanas y C) anafase, los cromosomas duplicados se separan y migran activamente hacia los polos opuestos de la célula (Imagen obtenida por Viridiana García Rodríguez, 2024).*

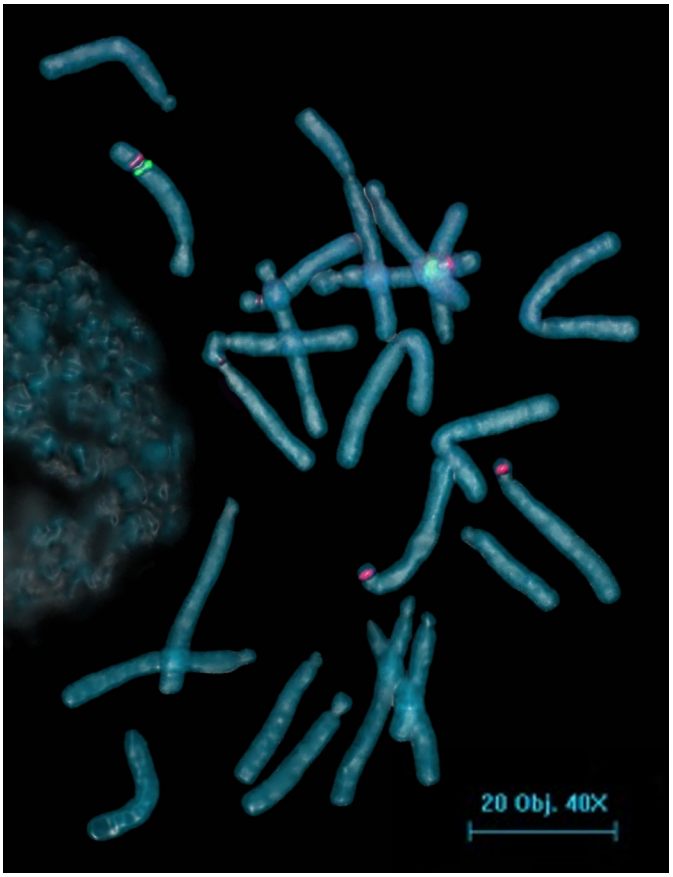


Figura 3. *Visualización al microscopio óptico de cromosomas de Lilium sp. con aplicación de la técnica de FISH (Hibridación fluorescente in situ). Se observan las regiones organizadoras del nucléolo (NOR) en dos pares de cromosomas homólogos (4 en total); el marcaje con fluorocromos en rojo y verde (Imagen obtenida por Verónica Cepeda Cornejo y modificada por Carmen Gutiérrez Cornejo, 2026).*

información resulta relevante para establecer las relaciones evolutivas entre las especies [2]. Otra aplicación de la citogenética es en medicina para la detección de anomalías cromosómicas y mejoramiento genético para la selección de variedades de plantas de uso agrícola que resistan las condiciones estresantes; por ejemplo, sequía, salinidad, deficiencia de nutrientes, contaminación, altas temperaturas ocasionadas por cambio climático, niveles inadecuados de radiación y presencia de plagas [5].

Actualmente los estudios en citogenética se han enfocado en los efectos de la contaminación. Los metales pesados son contaminantes que se encuentran dispersos en el aire, el suelo y el agua. Dichos contaminantes presentes en el ambiente son producidos por la actividad antropogénica, por la combustión de los motores, la actividad minera, la construcción de sistemas viales, entre otros. Los metales pesados se acumulan en las plantas y animales afectando su desarrollo y causando alteraciones en el material genético, lo que afecta la estructura de los cromosomas produciendo un cambio en la información del ADN, estos cambios se conocen como mutaciones. Los efectos nocivos del agua contaminada se han estudiado en la cebolla (*Allium cepa*) y en el maíz (*Zea mays*) encontrando aberraciones (alteraciones) cromosómicas reflejadas en una

Licenciamiento bajo el cual se publican los contenidos: CC BY-NC-ND 4.0

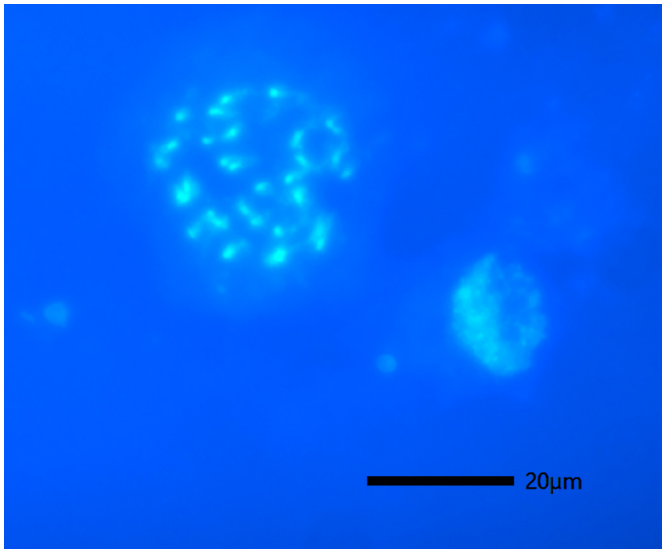


Figura 4. *Cromosomas de Amaranthus sp. en etapa de metafase, vistos al microscopio de fluorescencia con tinción DAPI (Imagen obtenida por Viridiana García Rodríguez, 2025).*

disminución del índice mitótico [6].

Estudios relevantes en agricultura

La información que se obtiene a partir de la citogenética vegetal es empleada por los ingenieros agrónomos y los agricultores con fines de mejoramiento genético en particular para las especies domesticadas o de importancia económica [7]. Entre las especies vegetales cultivadas y de mayor consumo en México destacan el maíz, frijol, jitomate, calabaza, chile, cacao, café, papa y más recientemente el amaranto por su alto valor nutricional [6]. Los estudios en citogenética vegetal se enfocan en los cultivos importantes para nuestra alimentación (Figura 4). El maíz se encuentra entre los más estudiados, así lo señala uno de los estudios más recientes publicado por Shakel y Dar [8], en el que comparan el cariotipo de diez cultivares de *Zea mays* procedentes del Himalaya, encontrando diferencias en el cariotipo y alteraciones cromosómicas entre ellos. Sabemos que el maíz es originario de México, sin embargo, ha sido llevado con éxito a distintas regiones del mundo.

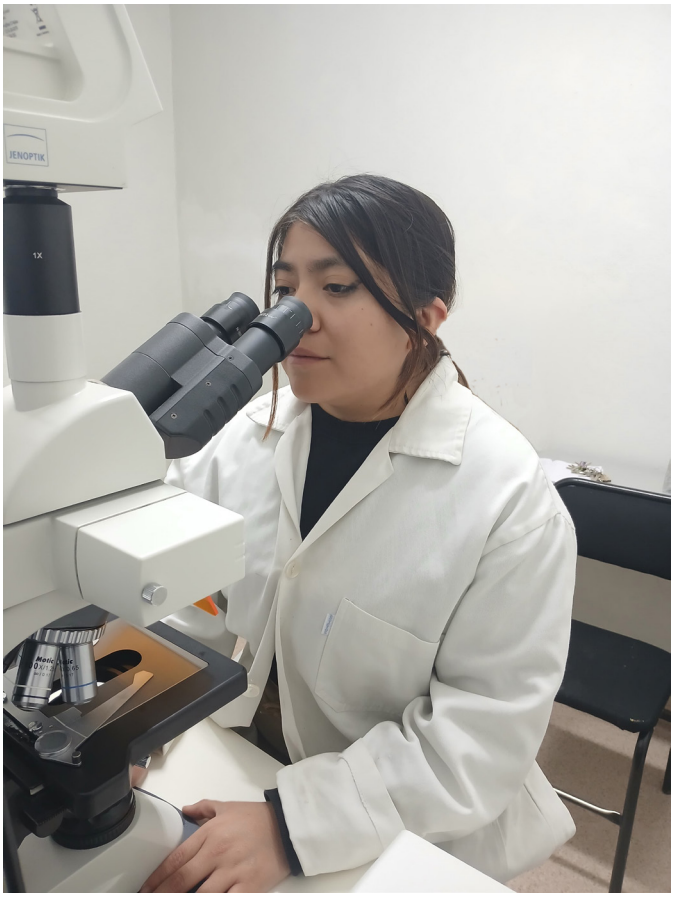


Figura 5. *Observación y toma de fotografías de laminillas con cromosomas (Fotografía tomada por Gamaliel Peralta Fernández, 2024).*

Perspectivas Futuras de la Citogenética Vegetal

Actualmente, la citogenética constituye una herramienta valiosa que se ha mejorado con los avances de la Biología Molecular (Figuras 4 y 5) [5] y el aporte de las ciencias genómicas [7]. Los avances de la citogenética molecular se podrían aplicar en la identificación de genes que permitan a las plantas resistir la sequía, tolerar altas o bajas temperaturas y el estrés salino [4]. La detección de genes que provocan enfermedades busca implementar estrategias para contrarrestar la incidencia de ciertas enfermedades de las plantas [7]. Al incorporar genes de resistencia a estrés abiótico, la planta logrará adaptarse a los cambios ambientales actuales debidos al “cambio climático”.

Licenciamiento bajo el cual se publican los contenidos: CC BY-NC-ND 4.0

Estos avances en la citogenética vegetal también ayudarán a entender cómo las plantas han modificado su información genética para adaptarse a los diferentes ambientes, en otras palabras, demostrar cómo han evolucionado [4]. Además, con esta herramienta se podrán identificar cambios nocivos en el material genético (aberraciones cromosómicas) que propician efectos negativos en las plantas como la disminución de la fertilidad, baja en el porcentaje de la germinación e inhibición del crecimiento de la raíz. Por ejemplo, en las plantas del maíz y de la cebolla, se generan alteraciones cromosómicas debido al contacto de las plantas con las aguas residuales que contienen metales pesados [6].

Es importante mencionar que la citogenética nos ayuda a generar conocimiento sobre la conservación de plantas propias de una región (endémicas) o en peligro de extinción. Por todo lo anterior, la citogenética vegetal es una ciencia que nos permite generar nuevo conocimiento, así como aplicar este saber para mejorar y proteger a las plantas, además de conseguir la seguridad alimentaria a largo plazo (Figura 3) [7].

Referencias

[1] Hiremath, S. C., & Chinnappa, C. C. (2015). Plant chromosome preparations and staining for light microscopic studies. In Plant Microtechniques and Protocols (pp. 263–286). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-19944-3_16

[2] Vimala, Y., Lavania, S., & Lavania, U. C. (2021, April 1). Chromosome change and karyotype differentiation–implications in speciation and plant systematics. *Nucleus* (India). Springer. https://doi.org/10.1007/s13237-020-00343-y

[3] Hwang, Y. J., Cabahug, R. A., Mancia, F. H., & Lim, K. B. (2020, February 1). Molecular cytogenetics and its application to major flowering ornamental crops. Horticulture Environment and Biotechnology. *Korean Society for Horticultural Science*. https://doi.org/10.1007/s13580-019-00198-6

[4] Sharma, S.K., Mukai, Y. (2015) Chromosome research in orchids: current status and future prospects with special emphasis from molecular and epigenetic perspective. *Nucleus*. https://doi.org/10.1007/s13237-015-0152-1

[5] Younis, A., Ramzan, F., Hwang, Y. J., & Lim, K. B. (2015). FISH and GISH: molecular cytogenetic tools and their applications in ornamental plants. *Plant Cell Reports*. Springer Verlag. https://doi.org/10.1007/s00299-015-1828-3

[6] Sarkar, A. K, Saha, R, Halder, R. (2022) Chromosomes damage by sewage water studies in the Allium cepa L. and Zea mays L. *International Journal of Cytology, Cytosystematics and Cytogenetics*. DOI: 10.36253/caryologia-1067.

[7] Flavell, R. B. (2021) Perspective: 50 years of plant chromosome biology, *Plant Physiology*. https://doi.org/10.1093/plphys/kiaa108

[8] Shakeel, R., Dar, T.U.H. (2023). Intraspecific karyotypic diversity: A case study of Zea mays L. from Pir Panjal Himalaya. *Journal of Stored Products Research,* 102, 102119. https://doi.org/10.1016/j.jspr.2023.102119

Licenciamiento bajo el cual se publican los contenidos: CC BY-NC-ND 4.0

Recibido: 28-abr-2026 Aceptado: 14-jun-2026 e-ISSN 2954-4890

Sección: *Concientifica*

La paradoja verde: El desafío metalúrgico de la transición energética

The green paradox: The metallurgical challenge of the energy transition

*Alfredo Brito-Franco**
Ana Karen Gálvez-Larios
Jorge Luis Hernández-Morelos

Universidad Autónoma del Estado de Morelos, CIICAp, Cuernavaca, Morelos, México.

**Autor para la correspondencia: alfredo.brito@uaem.edu.mx*

RESUMEN

La transición energética hacia el uso del bioetanol en automóviles plantea una "paradoja verde": su alta higroscopía facilita la entrada de agua y la formación de ácido acético, provocando severa corrosión localizada en los metales del motor. Para superar este reto, la ciencia de materiales desarrolla barreras a nivel molecular. Este artículo divulga los mecanismos de este daño y explora tres estrategias de vanguardia: el uso de aminas protectoras en biomezclas, el diseño de aditivos petroquímicos "a la medida", y el desarrollo de "inhibidores verdes" botánicos promoviendo motores duraderos y verdaderamente sustentables.

Palabras clave: Bioetanol, corrosión, inhibidores verdes.

SUMMARY

The energy transition towards the use of bioethanol in automobiles poses a "green paradox": its high hygroscopicity facilitates water ingress and the formation of acetic acid, causing severe localized corrosion in engine metals. To overcome this challenge, materials science is developing molecular-level barriers. This article outlines the mechanisms behind this damage and explores three cutting-edge strategies: the use of protective amines in bio-blends, the design of "tailor-made" petrochemical additives, and the development of botanical "green inhibitors," ensuring durable and truly sustainable engines.

Keywords: Bioethanol, corrosion, green inhibitors.

Licenciamiento bajo el cual se publican los contenidos: CC BY-NC-ND 4.0

La urgencia global por mitigar el cambio climático y reducir la dependencia de los combustibles fósiles ha impulsado la búsqueda e implementación de fuentes de energía alternativas para el sector de transporte. En esta carrera, hemos encontrado un aliado que parece perfecto: el bioetanol. Actualmente, este biocombustible se ha consolidado como una de las opciones más viables a corto y mediano plazo.

Producido mediante la fermentación de biomasa rica en carbohidratos, este alcohol se utiliza comúnmente como aditivo oxigenante o como combustible base en mezcla con gasolina tradicional gracias a su alto octanaje. Esta propiedad no solo reduce drásticamente las emisiones de monóxido de carbono e hidrocarburos no quemados, sino que mejora el desempeño mecánico del motor al ofrecer una mayor resistencia a la detonación. Cabe destacar que, aunque la combustión de biocombustibles también genera dióxido de carbono (CO_2), este gas se reincorpora de manera óptima al ciclo del carbono; al provenir de la biomasa, el CO_2 liberado es utilizado nuevamente por las plantas durante su crecimiento, cerrando así el ciclo de manera sustentable. Por esta razón, los motores que utilizan mezclas renovables han cobrado relevancia en todo el mundo [1].

A simple vista, el uso del bioetanol parece la jugada maestra para la transición energética. Sin embargo, detrás de sus indiscutibles beneficios ambientales, se esconde un enorme reto tecnológico que mantiene ocupados a los laboratorios de ingeniería de materiales.

Para entender el problema, debemos asomarnos bajo el cofre del automóvil. Los motores de combustión interna, las líneas de suministro, los tanques de almacenamiento y los sistemas de inyección fueron diseñados originalmente para operar con hidrocarburos derivados del petróleo. La transición hacia los biocombustibles cambia las reglas del juego y transforma drásticamente en el entorno operativo de estas piezas, volviendo a los componentes mecánicos altamente susceptibles a un enemigo implacable: la corrosión [2].

Aquí es donde surge lo que podríamos llamar la “paradoja verde” (ver Figura 1). Mientras nuestro medio ambiente comienza a respirar un poco mejor, los metales dentro de nuestros autos están sufriendo un estrés silencioso y destructivo. En este artículo, exponemos cómo y por qué el bioetanol acelera el deterioro de las aleaciones automotrices-con un enfoque especial en metales clave como el aluminio- y descubrimos cómo la ciencia de materiales está diseñando escudos a nivel molecular, conocidos como inhibidores de corrosión, para proteger el motor del futuro.

El origen del problema: la fisicoquímica de las mezclas etanol-gasolina

Para comprender por qué un combustible ecológico puede corroer una pieza de aluminio, es indispensable analizar sus diferencias estructurales yendo de lo general a lo parti-



Figura 1. *Paradoja verde: Transición energética limpia vs. corrosión.*

Licenciamiento bajo el cual se publican los contenidos: CC BY-NC-ND 4.0

cular. Curiosamente, el agua por sí sola no es el villano principal; el verdadero problema comienza con la presencia e interacción del bioetanol (C_2H_5OH). El etanol es una sustancia catalogada como altamente higroscópica debido a que posee un grupo hidroxilo (-OH), lo que le confiere una alta polaridad. En palabras más sencillas, esta molécula actúa como una esponja microscópica con una fuerte tendencia a absorber la humedad del aire que la rodea. Por lo tanto, al agregar bioetanol al tanque del automóvil, garantizamos la entrada de agua y otras impurezas orgánicas al sistema automotor.

Es aquí donde resulta vital contrastar este comportamiento frente a la gasolina. La gasolina tradicional es hidrofóbica, lo que significa que repele el agua de forma natural, y posee una conductividad eléctrica prácticamente nula. En términos electroquímicos, actúa como un medio dieléctrico (aislante) que no permite el flujo de iones, lo que inhibe cualquier reacción de corrosión galvánica o electroquímica. Durante décadas, los metales en los sistemas de inyección operaban en condiciones estables y sumamente secas dentro de este ambiente.

Sin embargo, cuando introducimos bioetanol a la mezcla, estamos invitando a un verdadero caballo de Troya al sistema. La interacción del agua con el alcohol desarrolla un medio conductor ideal para desencadenar fenómenos críticos en los componentes metálicos [3]. Este ambiente se vuelve aún más destructivo cuando el etanol interactúa con el oxígeno disuelto que viaja naturalmente en el flujo del combustible. Dentro de la tubería ocurre una transformación química silenciosa donde el oxígeno oxida al etanol, creando un subproducto llamado ácido acético. La reacción que describe este fenómeno se ilustra en la Ecuación 1, donde una molécula de etanol reacciona con oxígeno (O_2) para transformarse en ácido acético (CH_3COOH) y agua (H_2O):

$$C_2H_5OH + O_2 \rightarrow CH_3COOH + H_2O \quad (1)$$

Una vez formado, este ácido acético acelera el deterioro del metal. Al reaccionar con la superficie de la pieza de aluminio, produce acetato de aluminio y libera burbujas de gas hidrógeno en el proceso, tal como se detalla en la Ecuación 2 y se ilustra visualmente en la Figura 2:

$$2Al + 6CH_3COOH \rightarrow 3H_2 + 2Al(CH_3COO)_3 \quad (2)$$

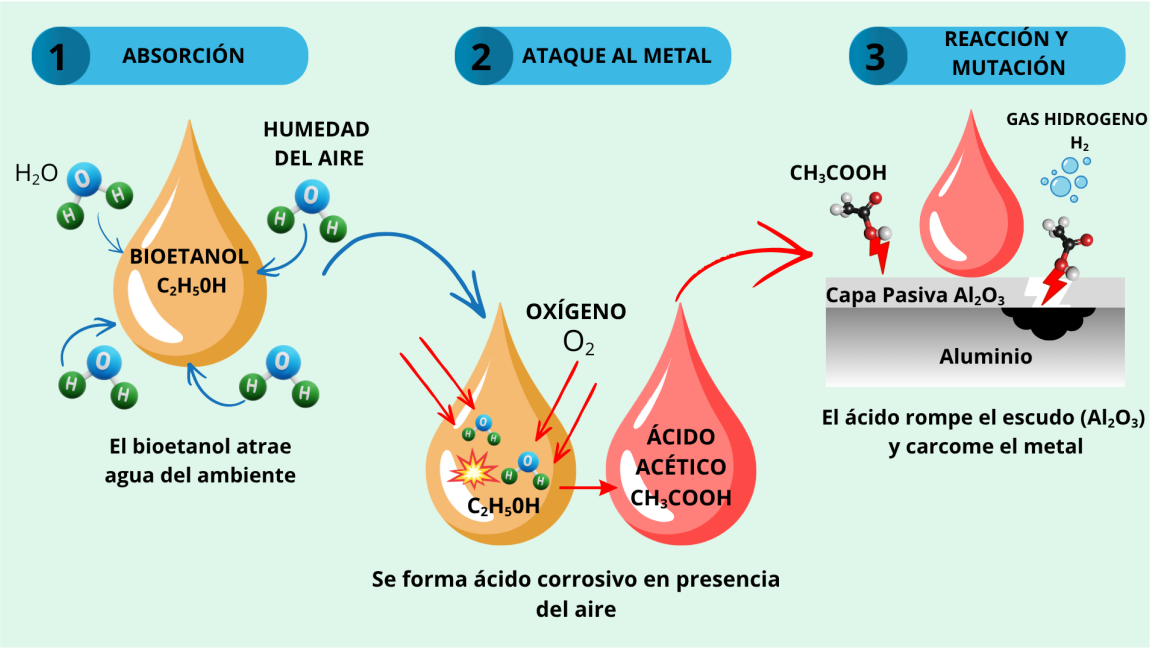


Figura 2. *Mecanismo de corrosión del etanol en piezas metálicas de los vehículos.*

Licenciamiento bajo el cual se publican los contenidos: CC BY-NC-ND 4.0

El aluminio es famoso por su excelente resistencia a la corrosión, la cual se debe a la formación espontánea de una película de óxido (Al_2O_3). Este "escudo invisible" es muy delgado, compacto y adherente, actuando como una barrera termodinámicamente estable en ambientes neutros. No obstante, no es invencible. Bajo las nuevas condiciones operativas – donde se combina agresivamente el agua, oxígeno disuelto y el ácido acético- las defensas del material terminan por fracturarse, rompiendo la delgada película protectora en puntos muy vulnerables [4].

A este fenómeno destructivo lo denominamos corrosión localizada o por picadura (*pitting*). A diferencia de la corrosión uniforme, donde el metal se adelgaza de manera predecible y homogénea, la corrosión por picadura es un ataque penetrante que perfora el metal creando pequeños cráteres. Peor aún, estas micro-picaduras actúan como concentrados de esfuerzos físicos y puntos de inicio para fracturas por fatiga, lo que puede resultar en fallas repentinas en el motor de nuestro vehículo.

Alternativas de vanguardia contra la corrosión en biocombustibles

Para evitar que la transición energética comprometa la integridad mecánica de nuestros vehículos, la ciencia de materiales ha puesto manos a la obra explorando diversas estrategias innovadoras en los laboratorios.

Una de las primeras líneas de defensa fue planteada por investigadores de la Universidad de Química y Tecnología de Praga, quienes se enfocaron en la mezcla ABE (acetona, butanol y etanol). Aunque esta mezcla se obtiene de manera natural por fermentación bioquímica y promete ahorrar altos costos de separación en la industria, se vuelve sumamente agresiva al contaminarse con agua. La solución científica consistió en añadir compuestos químicos llamados aminas -como la dietilentriamina (DETA) y la trietilentetramina (TETA)- que actúan como diminutas anclas. Al adherirse a la superficie del acero, estas moléculas forman una película protectora tan uniforme y resistente que logran una eficiencia de inhibición del 95%, incluso en condiciones de alta agresividad. [5].

De forma complementaria, otra vertiente crucial de investigación se centra en los vehículos que utilizan proporciones variables de bioetanol, desde el popular E10 (90% gasolina y 10% etanol) hasta el E85 (15% gasolina y 85% etanol). La regla electroquímica dicta que a medida que aumenta el porcentaje de bioetanol, también lo hace la conductividad eléctrica del medio, facilitando el ataque corrosivo. Estudios recientes han demostrado que la eficiencia de las películas protectoras cambia drásticamente dependiendo de la proporción exacta de bioetanol y la cantidad de agua absorbida. Entender esta dinámica de desgaste permite a la industria petroquímica diseñar aditivos "inteligentes" y a la medida, asegurando barreras fisicoquímicas estables sin importar la mezcla exacta en el tanque [6].

Finalmente, una estrategia fascinante por su enfoque sustentable nos aleja de los complejos laboratorios petroquímicos y nos lleva directamente a la botánica, mediante el desarrollo de "inhibidores verdes". Es precisamente en esta línea de innovación donde hemos enfocado nuestros esfuerzos. En nuestro propio laboratorio, comprobamos la extraordinaria eficacia de utilizar extracto de hojas de guanábana (*Annona muricata*) para proteger bloques de aluminio expuestos a mezclas comerciales como el E20 (80% gasolina y 20% etanol). Descubrimos que bastan apenas 25 partes por millón de este extracto para que sus compuestos orgánicos, ricos en vitaminas y antioxidantes, se adsorban fuertemente en la superficie del aluminio. Este proceso de anclaje forma una barrera molecular densa que aísla el metal del medio, frenando exitosamente el ataque corrosivo del etanol en inmersiones prolongadas. Esto demuestra que las soluciones del

Licenciamiento bajo el cual se publican los contenidos: CC BY-NC-ND 4.0

futuro no solo protegerán nuestros vehículos, sino que serán completamente amigables con el medio ambiente [7].

Perspectiva científica y conclusión

La adopción del bioetanol como matriz energética representa un avance innegable hacia un transporte sostenible. Sin embargo, la evidencia en los laboratorios es clara: la naturaleza de este combustible cambia drásticamente las reglas del juego dentro de nuestros vehículos. La sed natural que tienen los alcoholes por el agua y su tendencia a generar subproductos ácidos convierten a los componentes del motor en el escenario principal de un ataque corrosivo.

El reto para la ciencia de materiales no consiste en revertir el progreso hacia los combustibles alternativos, sino en diseñar infraestructuras capaces de tolerarlos. La integración de disciplinas como la electroquímica y la síntesis orgánica de inhibidores verdes está proporcionando soluciones tangibles y escalables.

La formulación de aditivos basados en química sostenible no solo protege el patrimonio tecnológico y la seguridad de los usuarios frente a fallas por corrosión, sino que también alinea a la industria automotriz y energética con los más estrictos estándares de protección medioambiental. En última instancia, el éxito de la transición energética dependerá de nuestra capacidad para dominar las reacciones a nivel atómico que ocurren silenciosamente en el interior de cada motor. Con la combinación correcta de biotecnología, metalurgia avanzada e inhibidores verdes, promoveremos que los motores del mañana sean más eficientes, duraderos y ecológicos.

Referencias

[1] Szabó, Á. I., Mursi, Z. T., Wégerer, A. y Nagy, G. (2025). Comprehensive efficiency analysis of ethanol–gasoline blends in spark ignition engines. *Eng*, 6(10), 256. https://doi.org/10.3390/eng6100256

[2] Baroš, P., Matějovský, L., Macák, J., Staš, M. y Pospíšil, M. (2022). Corrosion aggressiveness of ethanol–gasoline and butanol–gasoline blends on steel: Application of electrochemical impedance spectroscopy. *Energy & Fuels*, 36(5), 2616-2629. https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.1c03680

[3] Arik, E., Altan, H. y Esenturk, O. (2014). Dielectric properties of ethanol and gasoline mixtures by terahertz spectroscopy and an effective method for determination of ethanol content of gasoline. *The Journal of Physical Chemistry A*, 118(17), 3081-3089. https://doi.org/10.1021/jp500760t

[4] Brito-Franco, A., Uruchurtu, J., Rosales-Cadena, I., López-Sesenes, R., Serna-Barquera, S. A., Hernández-Pérez, J. A., Rocabruno-Valdés, C. y González-Rodríguez, J. G. (2020). Corrosion behavior of Al in ethanol–gasoline blends. *Energies*, 13(21), 5544. https://doi.org/10.3390/en13215544

[5] Matějovský, L., Staš, M., Li, K., Baroš, P., Kudrnová, M. y Macák, J. (2025). Mild steel corrosion in gasoline blends with acetone–butanol–ethanol and inhibition efficiencies of amines. *Energy & Fuels*, 39(20), 9487-9506. https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.5c01404

[6] Matějovský, L., Macák, J., Pleyer, O., Straka, P. y Staš, M. (2019). Efficiency of steel corrosion inhibitors in an environment of ethanol–gasoline blends. *ACS Omega*, 4(5), 8650-8660. https://doi.org/10.1021/acsomega.8b03686

[7] Nogueiron-Benitez, D. A., Gálvez-Larios, A. K., López-Sesenes, R., Ramírez-Arteaga, A. M. y González-Rodríguez, J. G. (2025). A study of the corrosion inhibition of aluminum in ethanol-gasoline blend using Annona muricata leaves extract. *Journal of Bio- and Tribo-Corrosion*,11(1), Artículo 3. https://doi.org/10.1007/s40735-024-00923-4

Licenciamiento bajo el cual se publican los contenidos: CC BY-NC-ND 4.0

Recibido: 31-oct-2025 Aceptado: 27-abr-2026 e-ISSN 2954-4890

Sección: *Concientifica*

Los minerales como aliados en la bioingeniería

Minerals as allies in bioengineering

*Jorge Luis Hernández Morelos**
Ana Karen Gálvez Larios

Universidad Autónoma del Estado de Morelos, CIICAp, Cuernavaca, Morelos, México.

**Autor para la correspondencia: jorge.hernandezm@uaem.edu.mx*

RESUMEN

Los minerales son elementos o compuestos que presentan una estructura cristalina. Son formados a partir de procesos geológicos en la naturaleza y actualmente se desarrollan mediante síntesis química. Sus propiedades físicas, ópticas, estructura cristalina y composición química han permitido diversas aplicaciones en la biomedicina, la biotecnología, la bioelectrónica y la fabricación de biomateriales a escala nanométrica. La ciencia busca conocer la composición y transformación de los minerales para el desarrollo de nuevas aplicaciones bioindustriales.

Palabras clave: Minerales, estructura cristalina, biomateriales.

SUMMARY

Minerals are elements or compounds that have a crystalline structure. They are formed through geological processes in nature and are currently developed through chemical synthesis. Their physical and optical properties, crystalline structure, and chemical composition have enabled diverse applications in biomedicine, biotechnology, bioelectronics, and the fabrication of biomaterials at the nanoscale. Science seeks to understand the composition and transformation of minerals for the development of new bioindustrial applications.

Keywords: Minerals, crystal structure, biomaterials.

Licenciamiento bajo el cual se publican los contenidos: CC BY-NC-ND 4.0

Los minerales, también llamados piedras naturales, se pueden definir químicamente como elementos o compuestos químicos con un ordenamiento cristalino. Se forman a partir de procesos geológicos como la solidificación del magma, rocas sedimentarias provenientes de la acumulación de sedimentos orgánicos e inorgánicos que se compactan con el tiempo, o la transformación de rocas preexistentes en rocas metamórficas (del griego *meta*, que significa "cambio", y *morphe*, que significa "forma"). Es decir, que cambian de forma debido a condiciones físicas como el aumento de la temperatura y la presión. Al someter a los minerales a estos cambios, pueden transformarse en nuevas estructuras cristalinas que pueden tener la forma cúbica, tetragonal, romboédrica, hexagonal, etc., desarrollando propiedades fisicoquímicas distintas.

El cuarzo es el mineral más abundante en la naturaleza y puede ser encontrado en la gran mayoría de rocas y suelos. Es un mineral polimórfico, es decir, puede tener distintas estructuras cristalinas. Un ejemplo es el cuarzo alfa (α-SiO_2) presenta una estructura romboédrica a temperatura ambiente. El arreglo irregular de los silicatos (SiO_4) en su estructura (ver Figura 1), le aporta la capacidad de generar energía eléctrica bajo un esfuerzo mecánico o viceversa, esta propiedad se conoce como piezoeléctrica y es fácil de observar en un reloj, al pasar corriente eléctrica, el cuarzo que se encuentra en su interior se deforma, este mecanismo genera una vibración que es detectada por el dispositivo y permite medir el tiempo con precisión. Gracias a esta propiedad se utiliza en instrumentos de alta sensibilidad para el estudio de la nanomedicina y la fabricación de biosensores para la detección de bacterias, proteínas, células y ADN.

Al ser un material inerte, no tóxico y biocompatible con el cuerpo humano, se utiliza en recubrimientos biomédicos. Es útil en la producción de dispositivos ópticos por su alta transparencia, así que no solo sirve para joyería o decoración, sino que tiene funciones importantes.

El cuarzo alfa puede ser transformado en otras formas llamadas tridimita (SiO_2) y cristobalita (SiO_2) al someterse a temperaturas muy elevadas, produciéndose una estructura hexagonal (> 870 °C) y cúbica (> 1470 °C), respectivamente (Ver Figura 1). Encontrar estos minerales de forma natural es poco común, pero pueden crearse fácilmente mediante síntesis química en el laboratorio. Esto ha permitido su amplio uso en la fabricación de moldes de fundición y vidrios bioactivos para la regeneración celular [2].

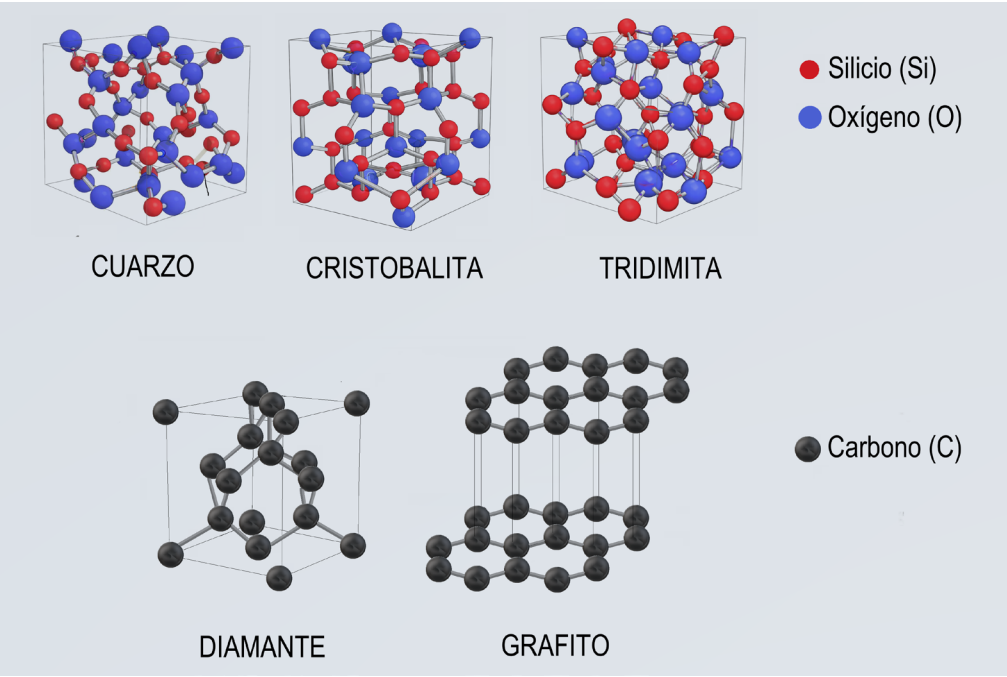


Figura 1. *Estructuras cristalinas de minerales polimórficos.*

Licenciamiento bajo el cual se publican los contenidos: CC BY-NC-ND 4.0

Tabla 1. *Biominerales inducidos por organismos vivos.*

BIOMINERALES	COMPOSICIÓN QUÍMICA	ORGANISMOS QUE CONTRIBUYEN A SU FORMACIÓN
aragonita	$CaCO_3$	Algas, moluscos y corales
weddellita	$CaC_2O_4 \cdot 2H_2O$	Hongos, líquenes (hongo-alga)
whewellita	$CaC_2O_4 \cdot H_2O$	Hongos, bacterias y plantas (espinaca)
glushinskita	$Mg(C_2O_4) \cdot 2H_2O$	Hongos
estruvita	$(NH_4)\ MgPO_4 \cdot 6H_2O$	Bacterias productoras de ureasa
lindbergita	$MnC_2O_4 \cdot 2H_2O$	Hongos (*Serpula himantioides*)
vivianita	$Fe_3(PO_3)_2 \cdot 8H_2O$	Bacterias reductoras de Fe
estrengita	$FePO_{32}H_2O$	Bacterias oxidantes de Fe
variscita	$AlPO_{32}H_2O$	Hongos (*Penicillium*)
chernikovita	$(H_3O)_2(UO_2)_2(PO_4)_2 \cdot 6H_2O$	Bacterias reductoras/oxidantes de U
urafita	$NH_4\ UO_2PO_4 \cdot 3H_2O$	Bacterias (*Pseudomonas*)
ópalo	$SiO_2 \cdot nH_2O$	Algas y plantas (fitolitos)
ferrihidrita	$5Fe_2O_3 \cdot 9H_2O$	Bacterias oxidantes de Fe
piromorfita	$Pb_4(PO_4)_3Cl$	Bacterias productoras de fosfato
hidroserusita	$Pb_3(CO_3)_2(OH)_2$	Bacterias productoras de carbonato

Fuente: Gadd et al., 2012 [4].

Otros minerales que sufren transformación de su estructura cristalina son el diamante y el grafito, ambos son materiales alotrópicos del carbono, es decir, aunque químicamente idénticos, tienen estructuras diferentes. El diamante tiene una estructura cúbica en la que sus átomos de carbono forman una estructura fuerte similar a una pirámide (ver figura 1) que le confiere la mayor dureza de todos los materiales existentes. Por lo tanto, es uno de los materiales naturales más caros del mundo, mientras que el grafito tiene una estructura formada por láminas hexagonales apiladas una encima de la otra (ver Figura 1), sus átomos están unidos por enlaces débiles lo que provoca una baja dureza similar a la del talco considerándolo como uno de los materiales más blandos [3]. Existen diversos minerales que, dependiendo del arreglo de sus átomos, obtienen diferentes propiedades que los hacen únicos y los ubican en múltiples aplicaciones.

Biominerales

Los biominerales son sustancias naturales creadas por seres vivos como bacterias, hongos, protozoos, animales invertebrados y plantas. Estos organismos utilizan el mecanismo de biomineralización para producir diversos minerales de composición química y estructura cristalina definida y no requieren de temperaturas o presiones extremas, se forman a temperatura ambiente.

Algunos hongos al secretar ácidos como parte natural de su proceso de digestión pueden descomponer minerales que contienen

Licenciamiento bajo el cual se publican los contenidos: CC BY-NC-ND 4.0

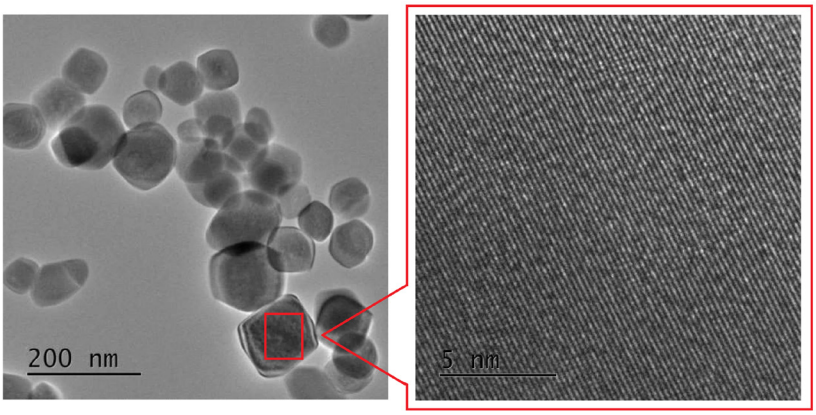


Figura 2. *Nanopartículas de óxido de hierro visibles en microscopio de alta resolución. Adaptado de Hjiri et al., 2019 [6].*

principalmente carbonatos de calcio ($CaCO_3$) como las conchas de mar, corales marinos, así como la caliza y el mármol, utilizados en la construcción de edificios. Este mecanismo provoca la formación de otros minerales. En la Tabla 1 se enlistan diversos biominerales en los que principalmente bacterias y hongos contribuyen a su formación [4].

Existen minerales fundamentales para el ser humano como la bauxita, que es un mineral compuesto de una mezcla de otros minerales: alúmina (Al_2O_3), hematita (Fe_2O_3) y cuarzo (SiO_2). Para su formación bacterias y hongos en condiciones anaeróbicas (sin oxígeno) descomponen la roca madre (protobauxita) para liberar aluminio (Al), hierro (Fe) y silicio (Si), que posteriormente precipitan como óxidos, dando origen al mineral. La bauxita es importante porque representa la principal materia prima de extracción del aluminio, útil para la fabricación de una gran cantidad de equipos y dispositivos, en forma de alúmina se usa en implantes médicos y filtros para la purificación del agua y del aire [5].

Minerales en la nanotecnología

La nanotecnología es una ciencia que se encarga del desarrollo de nuevos materiales y dispositivos a escala nanométrica, en el orden de 100 a 0.2 nm, tan diminutos que el ancho de un cabello delgado (50,000 nm) resulta gigante y para observar su forma y tamaño se usan microscopios de alta resolución (ver Figura 2).

Muchos minerales que existen a escala macroscópica están siendo modificados a escala nanométrica para mejorar sus propiedades físicas y químicas. Por ejemplo, las zeolitas son minerales formados por alúmina y cuarzo. En su estructura tienen microporos del tamaño de 0.3 a 2 nm que les permiten hidratarse y deshidratarse fácilmente, esta propiedad es importante para su uso en el tratamiento de aguas residuales porque pueden atrapar compuestos tóxicos presentes en el agua como el amoníaco y metales pesados (mercurio, cadmio, arsénico y plomo) a través de sus poros. En la agricultura son utilizadas como insecticidas, pesticidas y fertilizantes, también sirven como sustrato para el cultivo de plantas hidropónicas en misiones espaciales. Con el paso del tiempo surgió la necesidad de modificar las zeolitas a tamaño nanométrico menor a 20 nm, lo que resulta en una mejor porosidad y capacidad de adsorción para la detección y eliminación de diversos contaminantes ambientales, incluyendo hidrocarburos, monóxido de carbono (CO) y dióxido de nitrógeno (NO_2). Pueden ayudar a la regeneración de tejidos óseos y cicatrización de heridas ya que tienen la capacidad de transportar oxígeno a las células y se añaden en forma de polvos o suspensiones coloidales [7].

Hay una variedad de minerales de óxido de hierro, como la hematita (Fe_2O_3), la magnetita (Fe_3O_4), la maghemita (γ-Fe_2O_3) y la wüstita (FeO). La hematita fue uno de los primeros pigmentos naturales en utilizarse en la historia por su tono rojizo y junto con la magnetita son utilizadas para la producción de hierro y acero.

Actualmente se sintetizan nanopartículas de hematita y magnetita, para aplicaciones en

Licenciamiento bajo el cual se publican los contenidos: CC BY-NC-ND 4.0

biomedicina, como en resonancia magnética y tratamientos contra el cáncer. Al acercar un clavo a la magnetita, este será atraído por su fuerte magnetismo que exhibe. Por lo tanto, las nanopartículas de este mineral se utilizan para eliminar metales pesados, su magnetismo natural le permite atraer a los contaminantes facilitando su eliminación.

Otra variedad de minerales son los sulfuros de hierro como la mackinawita (Fe_9S_8), la troilita (FeS), la greigita (Fe_3S_4) y la pirita (FeS_2), siendo la pirita el mineral más abundante en la superficie terrestre. La mackinawita también se usa en la eliminación de metales pesados por su propiedad magnética. La troilita es un componente común en meteoritos, por lo que solo es importante en investigaciones científicas. Las nanopartículas de greigita se suman a la lista de tratamientos para destruir células cancerosas y finalmente la pirita conocida a lo largo de la historia como el "oro de los tontos" por su aspecto amarillento similar al oro, es utilizada para la producción de ácido sulfúrico. Se han identificado nanopartículas de pirita que se forman en fuentes hidrotermales conocidas comúnmente como aguas termales donde el agua brota naturalmente del suelo y se sintetizan bajo condiciones similares a las naturales para la fabricación de paneles solares [8]. La síntesis de nanopartículas ha crecido en la actualidad y se pueden obtener de la mayoría de los minerales conocidos, ofrecen diversas aplicaciones gracias a sus variadas composiciones, estructuras y tamaños que les proporcionan propiedades físicas y químicas específicas.

Conclusión

Los minerales han sido y serán importantes en diversas áreas de la ciencia y la tecnología. Pueden encontrarse de forma natural o desarrollarse mediante síntesis química, modificando su estructura cristalina, composición y tamaño, obteniendo minerales idénticos a los naturales o mejorando sus propiedades. Esto contribuye a la preservación de los recursos naturales al reducir la extracción de minerales y proteger el planeta. Además, permite a la ciencia continuar diseñando nuevos materiales o dispositivos que mejoran nuestra calidad de vida.

Referencias

[1] Adewale, A. A. (2023). Mineral Processing Technology (1st Edition), CRC Press, 324. https://doi.org/10.1201/9781003323433

[2] Götze, J., Pan, Y. & Müller A. (2021). Mineralogy and mineral chemistry of quartz: A review. *Mineralogical Magazine*, 85, 639–664. https://doi:10.1180/mgm.2021.72

[3] Falcao, E. & Wudl, F. (2007). Carbon allotropes: beyond graphite and diamond. J*ournal of Chemical Technology and Biotechnology*, 82:524–531. https://doi.org/10.1002/jctb.1693

[4] Gadd, G. M, Rhee, Y. J., Stephenson, K., & Wei, Z. (2012). Geomycology: metals, actinides and biominerals. *Environmental Microbiology Reports*,4(3), 270–296. https://doi.org/10.1111/j.1758-2229.2011.00283.x

[5] Hao, X., Leung, K., Wang, R.,Sun, W., & Li, Y. (2010). The geomicrobiology of bauxite deposits. *Geoscience Frontiers*, 1, 1, 81-89. https://doi.org/10.1016/j.gsf.2010.06.001

[6] Hjiri, M., Aida, M. S., & Neri, G. (2019). NO2 selective sensor based on α-Fe2O3 nanoparticles synthesized via hydrothermal technique. *Sensors*, 19(1), 167. https://doi.org/10.3390/s19010167

[7] Bacakova, L., Vandrovcova, M., Kopova, I. & Jirka, I. (2018). Applications of zeolites in biotechnology and medicine – a review. *The Royal Society of Chemistry*, 6, 5, 974-989. https://doi.org/10.1039/C8BM00028J

[8] Rickard, D., & Luther, G. W. I. (2007). Chemistry of Iron Sulfides. *Chemical Reviews* 107, 514-562. https://doi.org/10.1002/chin.200719200

Licenciamiento bajo el cual se publican los contenidos: CC BY-NC-ND 4.0

Recibido: 12-sep-2025 Aceptado: 25-mar-2026 e-ISSN 2954-4890

Sección: Concientifica

Potencial actual de camellones y canales prehispánicos de la sabana de Bogotá

Current potential of pre-hispanic ridges and channels in the Bogotá savannah

Ángela María Patiño-López[1,2]*
Luz Andrea García[2]
Freddy Rodríguez-Saza[1]

[1]*PhyloGenomicsUD - Semillero de Investigación en Filogenética, Evolución y Ciencias Ómicas, Grupo de Investigación MATTOPO, Facultad de Ciencias Matemáticas y Naturales, Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá, Colombia.*
[2]*MICRAPUD - Semillero de Investigación en Microbiología Aplicada, Grupo de Investigación en Biodiversidad de Alta Montaña, Facultad de Ciencias Matemáticas y Naturales, Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá, Colombia.*

**Autor para la correspondencia: ampatinol@udistrital.edu.co*

RESUMEN

Los sistemas hidráulicos de cultivo, basados en camellones y canales, permitieron a las poblaciones prehispánicas de la Sabana de Bogotá producir alimentos en un entorno con limitaciones edáficas e hídricas, favoreciendo su sostenimiento antes de la conquista. Aunque existen estudios sobre su funcionamiento, para la dimensión microbiológica del suelo son casi nulos, a pesar de ser esencial para la conservación agrícola. Por ello, se resalta la necesidad de investigar los vestigios que aún persisten, con el fin de evaluar su potencial como estrategia sostenible en territorios con condiciones adversas, aportando al debate sobre seguridad y soberanía alimentaria.

Palabras clave: Agricultura, microbiología, seguridad alimentaria.

SUMMARY

Agricultural hydraulic systems, based on raised fields and canals, enabled pre-Hispanic populations of the Sabana de Bogota to produce food in an environment with edaphic and hydric limitations, supporting their subsistence before the Spanish conquest. Although studies exist on their functioning, research on the soil's microbiological dimension is almost non-existent, despite its essential role in agricultural conservation. Therefore, it is crucial to investigate the vestiges that remain in order to assess their potential as a sustainable cultivation strategy in territories with adverse conditions, contributing to current discussions on food security and sovereignty.

Keywords: Agriculture, microbiology, food security.

Licenciamiento bajo el cual se publican los contenidos: CC BY-NC-ND 4.0

Los camellones y canales de la Sabana de Bogotá

Mucho antes de la llegada de los españoles al territorio colombiano, en la Sabana de Bogotá se encontraban asentadas comunidades que adaptaron el paisaje, con el fin de obtener los recursos alimenticios necesarios en una zona cuyo suelo carecía de un drenaje óptimo. Para ello implementaron un sistema de cultivo con canales y estructuras elevadas, que les permitía obtener recursos agrícolas e incluso pesqueros [1]. Estas estructuras protegían los cultivos de los daños por el encharcamiento del terreno, las heladas y las temporadas de sequía, mientras mantenían la calidad y productividad del suelo. Tal fue el éxito de este sistema que permitió un aumento considerable en la densidad poblacional de los grupos que habitaron las estribaciones y áreas de influencia del río Bogotá [2].

Con la conquista, estas áreas fueron tomadas por los europeos para alimentar el ganado que traían con ellos e implementaron sus propios sistemas de cultivo. Adicionalmente, la disminución de la población por las nuevas condiciones sociales y las enfermedades, junto con la imposibilidad de acceder a los terrenos que les eran fuente de alimento, impactaron en la preservación y paso de este conocimiento entre generaciones. De este modo, el sistema hidráulico fue abandonado, lo que condujo a la perdida de estas estructuras con el paso de los siglos y provocó incluso la inundación de terrenos que dieron origen a nuevos humedales [1, 2]. En la actualidad son pocos los vestigios que quedan de estas estructuras en la Sabana de Bogotá, en parte por causas naturales, pero principalmente por el impacto antrópico derivado de la creciente demanda urbanística de la ciudad de Bogotá [2]. De este modo, los camellones y canales se han convertido en elementos únicos que, por un lado, entrelazan el patrimonio natural y el patrimonio cultural de la nación y, por otro, permiten comprender las dinámicas agrícolas de los antiguos pobladores de la Sabana.

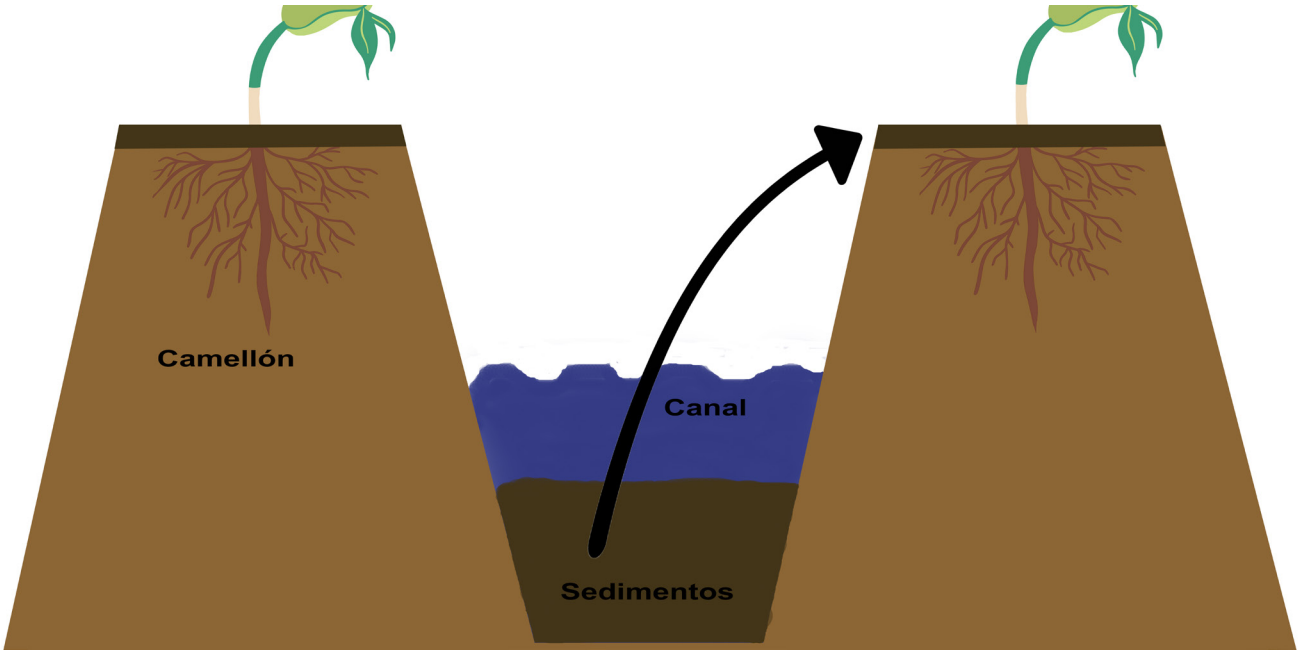


Figura 1. *Construcción de los canales y camellones en la Sabana de Bogotá.*

Licenciamiento bajo el cual se publican los contenidos: CC BY-NC-ND 4.0



Figura 2. *Algunas formas de los sistemas hidráulicos de cultivo prehispánicos de la Sabana de Bogotá.*

Tecnología de los sistemas hidráulicos de cultivo

Los sistemas hidráulicos de campos elevados están conformados por canales para el paso del agua y camellones. La modificación del terreno requería de poca mano de obra y en el pasado era realizada por grupos familiares en grandes extensiones, quienes tomaban parte del suelo al formar zanjas, y lo depositaban luego a los lados de las mismas, para crear las superficies elevadas (Figura 1) [3].

En la Sabana de Bogotá, a través de los primeros sistemas de campos elevados se aprovechaba el material sedimentario proveniente de las sinuosidades dejadas por el río Bogotá, formándose estructuras paralelas a este. Posteriormente, su uso se amplió a otras zonas, adaptándose a las necesidades de cada terreno. En las áreas inundables, la forma del sistema correspondía principalmente a dameros: agrupaciones de camellones cortos, paralelos entre sí, que se cruzaban perpendicularmente con otro grupo de camellones de igual disposición, asemejando un tablero de ajedrez. En pequeñas zonas también se hallaron estructuras lineales y en cuadrícula similares a los dameros, de las que se ha planteado que podrían corresponder a partes parciales de este mismo tipo de formación. Asimismo, se han observado algunos camellones irregulares a lo largo del río Bogotá, con formas que van desde circulares hasta trapezoidales, posiblemente resultado de la destrucción del sistema original tras la llegada de los españoles y la falta de mantenimiento (Figura 2) [1].

La distribución espacial de canales y camellones en damero (como un tablero de ajedrez) ofrece varias ventajas para la siembra en terrenos inundables de zonas altas: los canales mantienen el flujo de agua, permitiendo su drenaje durante la temporada de lluvias y almacenándola en la temporada seca; esta agua se calienta durante el día y, por la noche, libera calor, evitando que la temperatura del suelo descienda en exceso y protegiendo los cultivos de las heladas; las estructuras elevadas mantienen las raíces de las plantas por encima del nivel del agua de los canales, evitando daños, y; la materia orgánica extraída del mantenimiento de los canales se incorpora a los camellones (Figura 1), preservando la fertilidad del suelo [1]. Estas características hacen de los sistemas hidráulicos de campos elevados una estrategia eficaz para la agricultura en terrenos con condiciones similares.

Importancia análisis microbiológico del suelo del sistema

Actualmente, crece el riesgo de la escasa conservación y la pérdida de los vestigios que aún permanecen, siendo muy pocos los remanentes de sistemas hidráulicos de cultivo prehispánicos en la Sabana de Bogotá. Por esta razón, el estudio de estos suelos adaptados a la agricultura debería considerarse una prioridad. Si bien existen datos arqueológicos, edafológicos y técnicos sobre algunos de ellos (en particular, acerca del funcionamiento del sistema), son pocos los análisis del componente biótico, y se basan principalmente en pruebas

Licenciamiento bajo el cual se publican los contenidos: CC BY-NC-ND 4.0

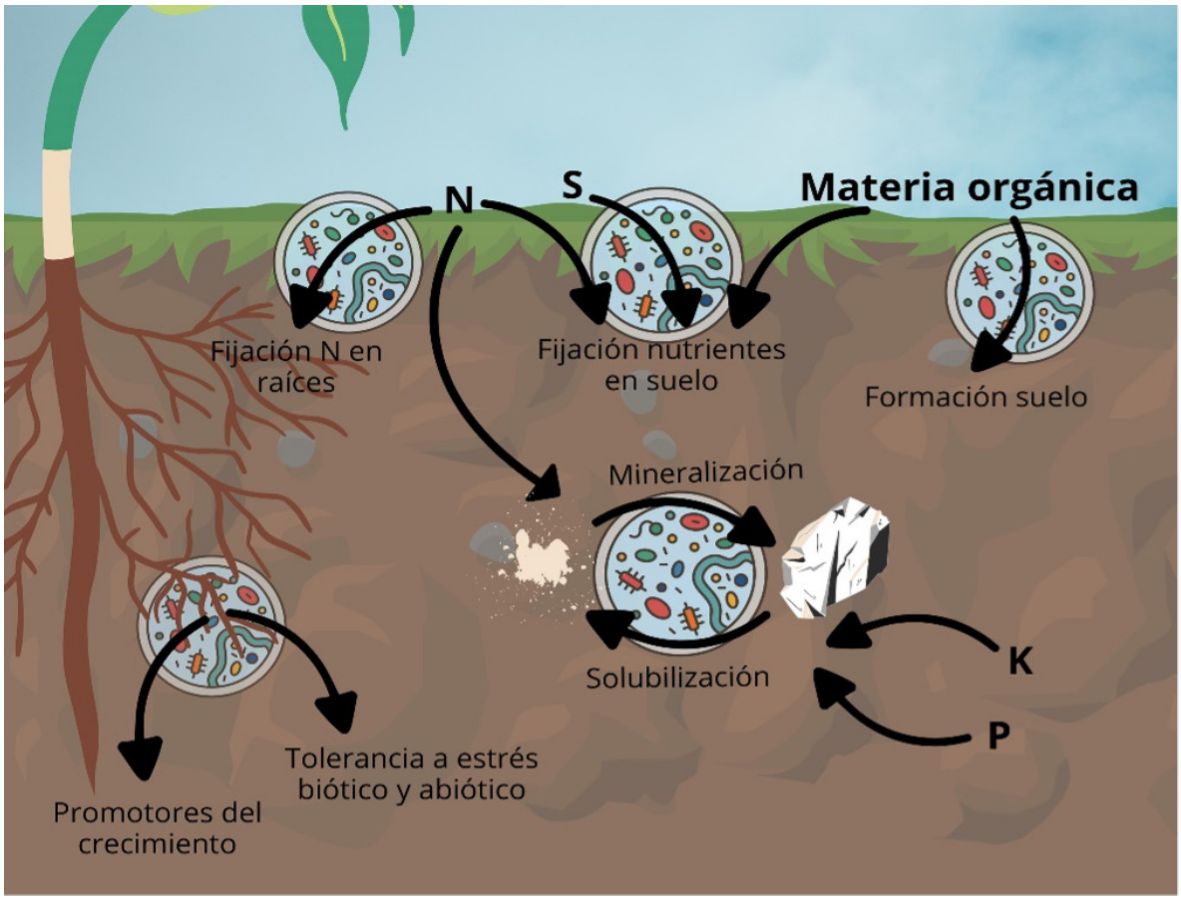


Figura 3. *Dinámicas de los microorganismos en el suelo en el ciclaje de nitrógeno (N), azúfre (S), potasio (K), fósforo (P) y materia orgánica, además de su relación directa con las plantas.*

de implementación de estas estructuras para evaluar su productividad en la actualidad [2].

Aquí es importante recordar la eficacia de estos sistemas, implementados para adecuar zonas donde la agricultura era prácticamente imposible dadas las condiciones originales del terreno. Si bien diferentes factores fueron determinantes en el éxito de los campos de cultivo, sobre las dinámicas microbiológicas del suelo —que también resultan fundamentales— se sabe muy poco en la actualidad. Por ello, el estudio de los microorganismos que participan en la formación de agregados estables, de los cuales depende en gran medida la calidad, la evolución y la conservación del suelo, resulta igualmente esencial. Dicho estudio debe considerar procesos como la descomposición de materia orgánica, el ciclado y la fijación de nutrientes, la solubilización de minerales, la regulación del agua, así como la facilitación del crecimiento vegetal y la resistencia de las plantas a patógenos y enfermedades mediante las relaciones simbióticas que establecen con ellas [4] (Figura 3).

La diversidad microbiológica en el suelo es muy amplia y se relaciona directamente con sus condiciones abióticas, cumpliendo varios roles complementarios, razón por la cual terminan siendo buenos indicadores de la calidad y estado de las áreas de cultivo [4]. En este sentido, aproximarse a las dinámicas ecológicas en camellones y canales que fueron tan productivos para las poblaciones prehispánicas de la Sabana de Bogotá, ayudaría a profun-

Licenciamiento bajo el cual se publican los contenidos: CC BY-NC-ND 4.0

dizar el conocimiento sobre su real funcionamiento, aportando así más herramientas para evaluar el impacto que podría traer consigo la recuperación de tecnologías prehispánicas en la actualidad. Cabe destacar, además, que es posible encontrar cepas con potencial de aplicación, como aquellas reportadas en biorremediación por contaminación con metales pesados y otros tipos de contaminación ambiental, promotoras de crecimiento vegetal en zonas de cultivo con estrés abiótico, actividad enzimática para control de patógenos, entre otras [5]. Estas características permitirían el mejoramiento de suelos, biofertilización y control biológico, aumentando las opciones para una producción sostenible y sustentable, que supla los requerimientos alimenticios de los grupos humanos.

Los sistemas hidráulicos de cultivo y su relación con la seguridad alimentaria

En la actualidad, el crecimiento acelerado de las poblaciones humanas —muchas de ellas asentadas en territorios donde las condiciones geográficas dificultan la producción de alimentos en cantidad y calidad suficientes— constituye una problemática seria. Las limitaciones en la producción, sumadas al incremento de los insumos agrícolas, elevan los precios de los alimentos a niveles inalcanzables para personas en condición de pobreza, lo que disminuye su calidad de vida e incluso conduce a altas tasas de mortalidad por desnutrición, fenómeno que se viene discutiendo desde 1996, en la Cumbre Mundial de la Alimentación, cobrado fuerza la búsqueda de la soberanía alimentaria como estrategia para contrarrestar el problema [6].

Los sistemas de camellones y canales permitieron, antes de la llegada de los españoles, una producción agrícola mucho mayor que en los años posteriores, garantizando una distribución de alimentos más eficiente y equitativa. Dado su potencial en zonas prácticamente improductivas por sí mismas, su reimplementación podría contribuir tanto a ampliar el área disponible para la agricultura como a reducir la dependencia de insumos químicos destinados a mejorar la productividad del suelo. En la década de 1980 se recuperaron sistemas similares en Perú y Bolivia (*suka kollus* y *waru warus*), lo que incrementó la producción agrícola hasta tres o cuatro veces en terrenos situados a más de 3800 m.s.n.m. Sin embargo, pese a los resultados positivos, la aplicación de estos sistemas en la actualidad no ha recibido el apoyo necesario [7].

Todo lo anterior permite plantear que el estudio y la aplicación de los sistemas hidráulicos de cultivo, como estrategia para mejorar la seguridad alimentaria, podrían contribuir a reducir las tasas de desnutrición en regiones geográficamente desfavorables para la agricultura. El impulso a investigaciones en este campo es, por tanto, indispensable, pues fortalecería la soberanía alimentaria en áreas con alta desigualdad social. En consecuencia, la protección, reactivación e implementación de estos sistemas prehispánicos deberían ser evaluadas con seriedad por los agentes políticos y técnicos a nivel mundial.

Referencias

[1] Rodríguez Gallo, L. (2019). La construcción del paisaje agrícola prehispánico en los Andes colombianos: el caso de la Sabana de Bogotá. *SPAL*, 28 (1), 193-215. http://dx.doi.org/10.12795/spal.2019.i28.09

[2] Valdez, F. (Ed.). (2006). *Agricultura ancestral camellones y albarradas: contexto social, usos y retos del pasado y del presente: coloquio agricultura prehispánica sistemas basados en el drenaje y en la elevación de los suelos cultivados* (No. 3). Editorial Abya Yala.

[3] Pulido Londoño, A. E., & Pinto Moreno, D. A. (2016). *Determinación del funcionamiento hidráulico de los sis-*

Licenciamiento bajo el cual se publican los contenidos: CC BY-NC-ND 4.0

temas de campos elevados de la cultura muisca en las llanuras inundables de la Sabana de Bogotá. Tesis de pregrado en Ingeniería Ambiental, Universidad Distrital Francisco José de Caldas.

[4] Mora Delgado, J., Silva Parra, A., & Escobar Escobar, N. (2019). *Bioindicadores en suelos y abonos orgánicos.* Ibagué: Sello Editorial Universidad del Tolima.

[5] Dodino-Gutiérrez, C. A., Santiago-Galvis, J. U. A. N., Rabelo-Florez, R. A., & Cubillos-Hinojosa, J. G. (2023). Application of molecular techniques in soil microbiology for the identification of bacteria with agricultural potential: a review and bibliometric analysis. *Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas*, 17(2). https://doi.org/10.17584/rcch.2023v17i2.16096

[6] Pozo Estupiñán, C., Sorhegui Ortega, R., Márquez-Sánchez, F., & Vergara Romero, A. (2021). Soberanía alimentaria desde la política pública y sus argumentos: Food sovereignty from public policy and its arguments. *Revista Científica ECOCIENCIA*, 8, 79–93. https://doi.org/10.21855/ecociencia.80.635

[7] Herrera Wassilowsky, A. C. (2011). *La recuperación de tecnologías indígenas: arqueología, tecnología y desarrollo en los Andes.* Ediciones Uniandes.

Licenciamiento bajo el cual se publican los contenidos: CC BY-NC-ND 4.0

Recibido: 16-mar-2026 *Aceptado: 20-may-2026* *e-ISSN 2954-4890*

Sección: *Microbichos*

Probióticos: pequeños aliados que cuidan nuestra salud

Probiotics: small allies that support our health

*Areli Alejandra Robles-Bencomo**
Ismael Ortiz-Aguirre

Universidad Autónoma de Chihuahua, Chihuahua, México.

**Autor para la correspondencia: p273132@uach.mx*

RESUMEN

En este momento, billones de microorganismos habitan en nuestro cuerpo sin que nos demos cuenta, formando parte de nuestra microbiota. Entre estos diminutos habitantes se encuentran los probióticos, aliados importantes para mantener nuestra salud. Estos pequeños microorganismos actúan principalmente en el tracto gastrointestinal, donde favorecen diversos procesos beneficiosos. Los probióticos pueden inhibir microorganismos dañinos, producir sustancias benéficas, proteger la barrera intestinal y estimular el sistema inmunológico. En este artículo revisamos cómo actúan los probióticos y por qué mantener una microbiota equilibrada es fundamental para nuestro bienestar.

Palabras clave: Microbiota, salud intestinal, metabolitos microbianos.

SUMMARY

At this very moment, trillions of microorganisms live in our bodies without us even noticing, forming part of our microbiota. Among these tiny inhabitants are probiotics, important allies in maintaining our health. These small microorganisms act mainly in the gastrointestinal tract, where they support several beneficial processes. Probiotics can inhibit harmful microorganisms, produce beneficial substances, protect the intestinal barrier, and stimulate the immune system. In this article, we review how probiotics act and why maintaining a balanced microbiota is essential for our well-being.

Keywords: Microbiota, intestinal health, microbial metabolites.

Licenciamiento bajo el cual se publican los contenidos: CC BY-NC-ND 4.0

Introducción

Los probióticos son microorganismos vivos que, cuando se administran en cantidades adecuadas, pueden generar efectos beneficiosos para la salud de quien los consume. Muchos de estos efectos están relacionados con la microbiota, el conjunto de microorganismos que habita en nuestro cuerpo y participa en diversos procesos esenciales para el funcionamiento del organismo.

Nuestro cuerpo está conformado por billones de células, pero ¿sabías que muchas de ellas no son humanas? Un estudio publicado en 2016 estimó que el cuerpo humano contiene alrededor de 30 billones de células humanas y cerca de 38 billones de células bacterianas [1]. Estas bacterias habitan en diferentes partes del cuerpo, como la piel, la boca y, especialmente, el intestino (Figura 1).

Aunque con frecuencia asociamos a las bacterias con enfermedades e infecciones, muchas de ellas son en realidad beneficiosas.

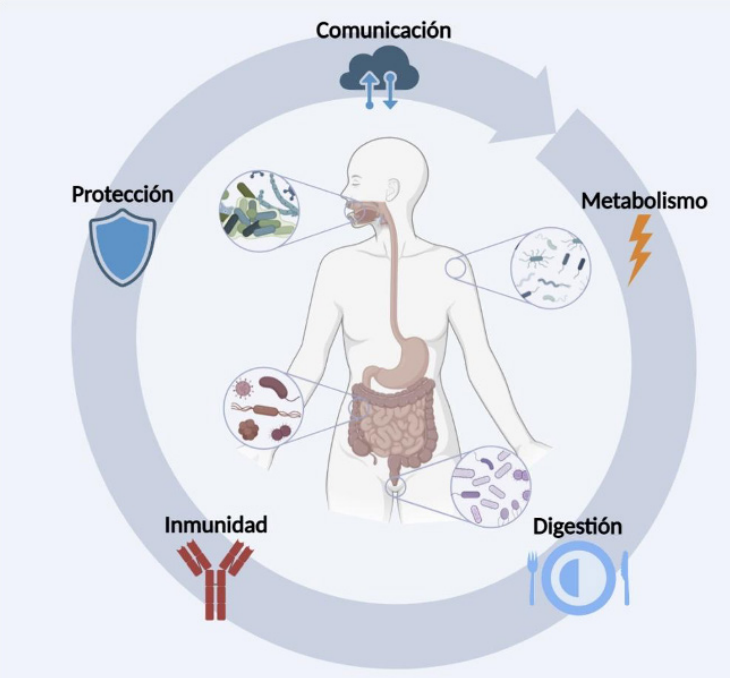


Figura 1. *Distribución de la microbiota en el cuerpo humano y algunas de sus funciones generales. Imágen creada mediante Canva y BioRender.*

Mantener el equilibrio de la microbiota es importante para el bienestar, y una forma de favorecerlo es mediante el consumo de probióticos.

La microbiota cumple importantes funciones, como fortalecer el sistema inmunológico, ayudar en la absorción de nutrientes, protegernos de microbios dañinos e incluso influir en nuestro estado de ánimo. Una forma de favorecer el equilibrio de la microbiota es mediante el consumo de probióticos.

A continuación, revisaremos las principales formas en que actúan estos pequeños aliados y cómo pueden contribuir al equilibrio de la microbiota intestinal e influir en distintos procesos importantes para nuestra salud.

La microbiota intestinal

La microbiota intestinal es el conjunto de microorganismos que habitan en nuestro intestino. Su importancia es tal que, en los últimos años, ha pasado de considerarse simplemente como un grupo de microorganismos independientes a verse como un verdadero órgano con funciones bien definidas. Entre sus funciones se encuentra la producción de enzimas capaces de transformar nutrientes complejos en compuestos que pueden ser utilizados por el organismo como fuente de energía o como precursores de otras moléculas necesarias para el funcionamiento del cuerpo.

Cuando se produce un desequilibrio en la microbiota intestinal, pueden aparecer efectos adversos en el organismo. Diversos estudios han observado que cambios en la abundancia de ciertos grupos bacterianos se han asociado con diferentes problemas de salud, entre ellos el síndrome de intestino irritable, la obesidad y algunas enfermedades metabólicas o inmunológicas. Este desequilibrio, conocido como disbiosis, puede alterar funciones im-

Licenciamiento bajo el cual se publican los contenidos: CC BY-NC-ND 4.0

portantes de la microbiota, como la protección frente a microorganismos dañinos, la regulación del sistema inmunológico y el aprovechamiento adecuado de nutrientes.

En este contexto, los probióticos han despertado gran interés debido a su capacidad para interactuar con las comunidades microbianas intestinales y contribuir al mantenimiento de su estabilidad. Por esta razón, mantener el equilibrio de la microbiota intestinal es fundamental para la salud, por lo que el uso de probióticos se ha propuesto como una estrategia para favorecer o restaurar este delicado ecosistema microbiano [2].

¿Qué son exactamente los probióticos?

Como mencionamos anteriormente, los probióticos son microorganismos que pueden generar efectos beneficiosos para la salud de quien los consume. De forma natural, pueden encontrarse en alimentos fermentados como el kéfir, el yogurt natural o productos elaborados con masa madre. Además, actualmente existen suplementos comerciales que contienen cepas específicas cuyo efecto probiótico ha sido evaluado y comprobado científicamente.

Aunque parezca obvio mencionarlo, no todas las bacterias son consideradas probióticas. Para ser considerado como tal, un microorganismo debe cumplir con ciertas características. Además de producir efectos benéficos, debe ser capaz de sobrevivir en condiciones similares a las del tracto digestivo, ser inocuo para quien lo consume, tener la capacidad de adherirse a la pared interna del intestino y no presentar genes de resistencia a antibióticos que puedan transferirse a microorganismos patógenos. Los probióticos más utilizados en la actualidad pertenecen principalmente a los géneros *Lactobacillus*, *Bifidobacterium*, *Bacillus*, *Streptococcus* y *Enterococcus*, así como a la levadura *Saccharomyces* (Figura 2). Muchos de estos microorganismos son capaces de producir sustancias como ácido láctico,

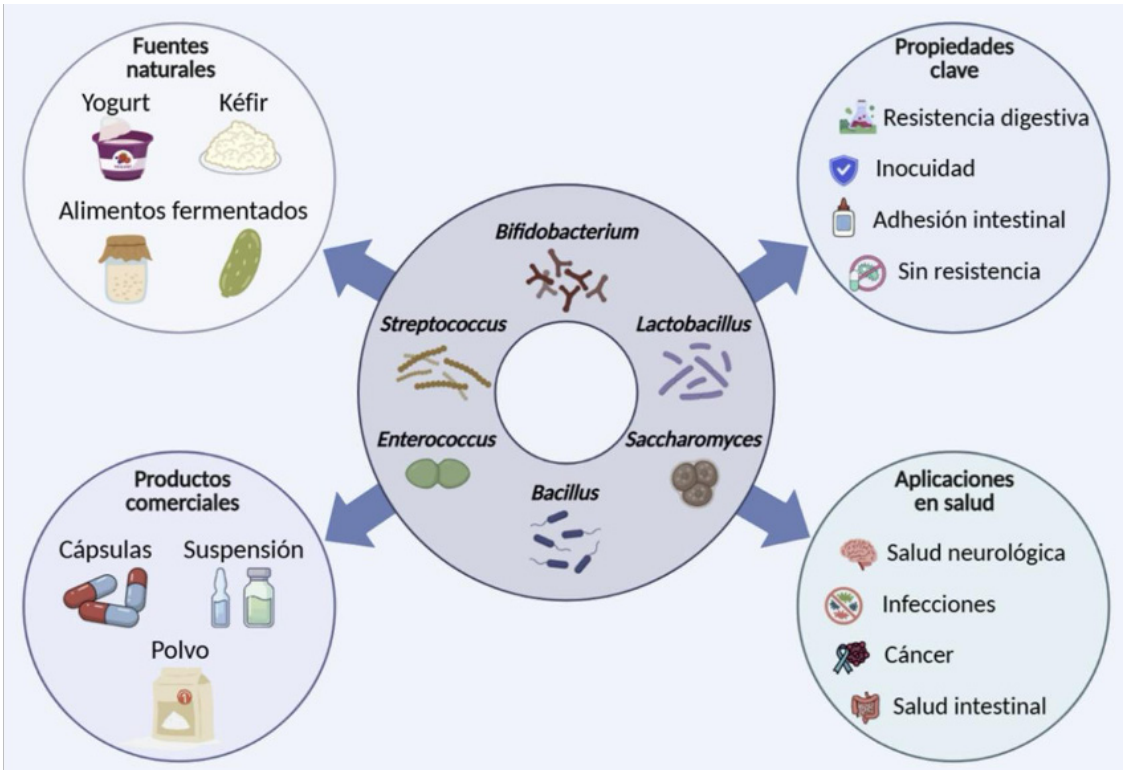


Figura 2. *Probióticos: fuentes, características y aplicaciones en salud. Imágen creada mediante Canva y BioRender.*

Licenciamiento bajo el cual se publican los contenidos: CC BY-NC-ND 4.0

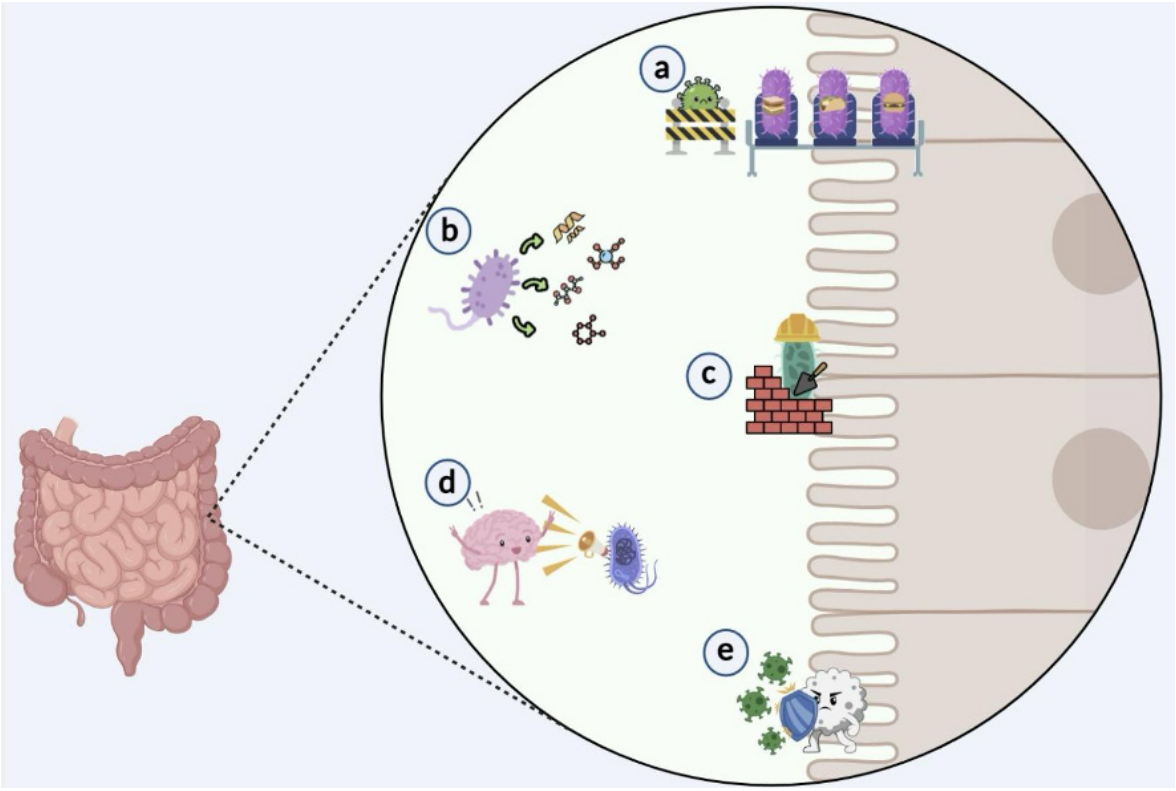


Figura 3. *Mecanismos de acción de los probióticos en el intestino. a) Competencia contra microbios dañinos. b) Producción de sustancias beneficiosas. c) Fortalecimiento de la barrera intestinal. d) Comunicación con otros órganos. e) Activación del sistema inmunológico. Imágen creada mediante Canva y BioRender.*

bacteriocinas y ácidos grasos de cadena corta, las cuales contribuyen al mantenimiento del equilibrio microbiano y a la inhibición de microorganismos potencialmente dañinos.

Entre las principales aplicaciones de los probióticos se encuentra la disminución del riesgo de ciertos tipos de cáncer, la prevención de infecciones del tracto urinario y su uso en el tratamiento de diversos trastornos intestinales, metabólicos y neurológicos [3]. Los efectos de los probióticos dependen de diversos factores, entre ellos la cepa utilizada, la cantidad consumida y la capacidad del microorganismo para sobrevivir en el tracto gastrointestinal. Para comprender estos beneficios, es necesario entender cómo actúan estos microorganismos dentro de nuestro organismo.

¿Cómo actúan los probióticos en el cuerpo?

Hasta ahora hemos hablado sobre la microbiota, los probióticos y su importancia para la salud. Sin embargo, comprender sus beneficios también implica conocer los mecanismos mediante los cuales estos microorganismos interactúan con nuestro organismo (Figura 3). A continuación, se describen algunos de los más importantes.

Competencia contra microbios dañinos

Dentro del intestino, el espacio disponible para habitar y la cantidad de nutrientes son limitados. Por esta razón, los probióticos deben competir con otros microorganismos para establecerse en este ambiente. Al adherirse a la pared intestinal y utilizar los nutrientes disponi-

Licenciamiento bajo el cual se publican los contenidos: CC BY-NC-ND 4.0

bles, dificultan que microorganismos dañinos encuentren las condiciones necesarias para crecer, multiplicarse y colonizar el intestino. Además, ciertos probióticos producen sustancias antimicrobianas y modifican el ambiente intestinal, por ejemplo, mediante la disminución del pH, lo que contribuye a inhibir el crecimiento de microorganismos potencialmente perjudiciales.De esta manera, los probióticos ayudan a reducir la probabilidad de que estos microorganismos causen infecciones [4].

Producción de sustancias beneficiosas

Una de las características más interesantes de los probióticos es su capacidad de producir diversas sustancias con efectos beneficiosos. Por ejemplo, pueden generar compuestos antimicrobianos como bacteriocinas , ácidos orgánicos, peróxidos y péptidos, los cuales pueden alterar la membrana celular de microorganismos dañinos y provocar su muerte. Además, muchos de estos microorganismos producen sideróforos, moléculas capaces de capturar hierro y reducir la disponibilidad de este nutriente esencial para los patógenos.

Por otra parte, algunas de las sustancias producidas por los probióticos también pueden fortalecer la barrera intestinal. La secreción de aminoácidos y otros compuestos orgánicos permite que estos sean absorbidos por las células intestinales y utilizados como fuente de energía o incorporados en distintas funciones celulares, lo que contribuye a mantener la integridad y la unión entre las células del epitelio intestinal.

Por último, los ácidos grasos de cadena corta son compuestos importantes asociados a la actividad de los probióticos. Entre los más relevantes se encuentran el acetato, el propionato y el butirato. El acetato es el más abundante y, una vez producido en el intestino, es absorbido y transportado al hígado, donde participa en procesos relacionados con la producción de energía y el mantenimiento del equilibrio de los niveles de glucosa y triglicéridos. Por otro lado, el propionato también es absorbido y transportado al hígado, donde contribuye a regular los niveles de glucosa en sangre y puede promover la liberación de hormonas relacionadas con el apetito y la saciedad. En el caso del butirato, este es utilizado principalmente por las células del colon como fuente de energía. Además, puede bloquear proteínas asociadas con la inflamación y estimular la muerte celular programada, lo que podría contribuir a disminuir el riesgo de cáncer de colon [5].

Fortalecimiento de la barrera intestinal

La pared interna del intestino está formada por células epiteliales, microvellosidades, proteínas y una capa de moco. En conjunto, estos componentes forman una barrera física que actúa como la primera línea de defensa frente a microorganismos dañinos. El uso de probióticos puede fortalecer esta barrera mediante la producción de ácidos grasos de cadena corta. Estas moléculas ayudan a mantener un pH adecuado en el intestino y favorecen la activación de diferentes compuestos y enzimas bacterianas. Además, estimulan la síntesis de mucina (un tipo de gel protector intestinal) que limita el paso de bacterias y toxinas nocivas, contribuyen a reparar daños en la mucosa intestinal causados por sustancias agresivas y promueven la actividad de los macrófagos, células especializadas en capturar y destruir organismos o moléculas potencialmente peligrosas [6].

Comunicación con el sistema inmunológico

Además de inhibir el desarrollo de mi-

Licenciamiento bajo el cual se publican los contenidos: CC BY-NC-ND 4.0

croorganismos dañinos mediante el fortalecimiento de barreras físicas y la producción de compuestos antimicrobianos, los probióticos también pueden estimular el sistema inmunitario. Una gran parte del sistema inmunológico del cuerpo se encuentra en el intestino, en una estructura conocida como tejido linfoide asociado al intestino (GALT, por sus siglas en inglés). Los probióticos pueden interactuar con las células que forman parte de este sistema, favoreciendo la captura de patógenos, activando células defensivas y estimulando la producción de anticuerpos [6].

Influencia en otros órganos

El eje intestino-cerebro es un sistema de comunicación bidireccional que conecta el sistema nervioso central con el tracto gastrointestinal y que ocurre mediante señales neuronales, inmunológicas y hormonales. Se ha observado que los probióticos pueden influir de manera positiva en esta comunicación mediante la producción de ciertos metabolitos. Entre ellos destacan los ácidos grasos de cadena corta, especialmente el butirato, que participan en la regulación de la inflamación, la liberación de hormonas intestinales y la activación de vías neuronales como el nervio vago. Además, los metabolitos derivados del triptófano, como la serotonina y los compuestos indólicos, contribuyen de manera importante a la señalización neuroquímica entre el intestino y el cerebro. Diversos estudios han encontrado que su uso podría contribuir a mejorar algunos síntomas asociados con trastornos neurológicos y del estado de ánimo, como ansiedad, depresión, autismo o enfermedad de Alzheimer. Estos efectos podrían explicarse porque algunos probióticos favorecen la producción de neurotransmisores, ayudan a regular hormonas relacionadas con el estrés y disminuyen procesos inflamatorios asociados con enfermedades neurodegenerativas [7].

Conclusión

Los probióticos son aliados microscópicos que pueden contribuir al equilibrio de la microbiota, fortalecer nuestras defensas y favorecer funciones importantes del organismo mediante distintos mecanismos de acción. Cuidar la salud también implica reconocer la importancia de estos microorganismos que habitan en nuestro interior y su papel en el mantenimiento del bienestar.

Referencias

[1] Sender, R., Fuchs, S., Milo, R. (2016) Revised Estimates for the Number of Human and Bacteria Cells in the Body. *PLoS Biol* 14(8): e1002533. https://doi.org/10.1371/journal.pbio.1002533.

[2] Icaza-Chávez, M. (2013). Microbiota intestinal en la salud y la enfermedad. *Revista de Gastroenterología de México* 78(4). https://doi.org/10.1016/j.rgmx.2013.04.004.

[3] Sarita, B., Samadhan, D., Hassan, M., Kovaleva, E. (2025). A comprehensive review of probiotics and human health-current prospective and applications. *Front Microbiol* 15,1487641. https://doi:10.3389/fmicb.2024.1487641.

[4] Aleman, R., Yadav, A. (2024). Systematic Review of Probiotics and Their Potential for Developing Functional Nondairy Foods. *Applied Microbiology* 4(1), 47. https://doi.org/10.3390/applmicrobiol4010004.

[5] Sankarganesh, P., Bhunia, A., Ganesh, A., Babu, A., Gopukumar, S., Lokesh, E. (2025). Short-chain fatty acids (SCFAs) in gut health: Implications for drug metabolism and therapeutics. *Medicine in Microecology* 25, 100139. https://doi.org/10.1016/j.medmic.2025.100139.

[6] Mercado-Monroy, J., Falfán-Cortés, R.N., Muñóz-Pérez, V.M., Gómez-Aldapa, C.A. and Castro-Rosas, J. (2026). Probiotics as modulators of intestinal barrier integrity and immune homeostasis: a comprehensive review. *J Sci Food Agric*, 106: 2578-2590. https://doi.org/10.1002/jsfa.70168.

[7] Hwang, Y. K., Oh, J. S. (2025). Interaction of the Vagus Nerve and Serotonin in the Gut–Brain Axis. International *Journal of Molecular Sciences*, 26(3), 1160. https://doi.org/10.3390/ijms26031160.

Licenciamiento bajo el cual se publican los contenidos: CC BY-NC-ND 4.0

Publica con nosotros

¿Qué artículos se reciben?

Se aceptarán trabajos escritos en español o inglés cuyo tema central sean la biotecnología o los bioprocesos. Se publican únicamente artículos originales y de revisión, siempre y cuando su objetivo sea la divulgación. Los trabajos deberán estar escritos con lenguaje sencillo, siendo el público objetivo estudiantes de bachillerato, licenciatura y posgrado.

¿Quién puede escribir?

Se reciben colaboraciones de técnicos, investigadores, administrativos, alumnos, representantes de empresas de base científica, divulgadores y periodistas científicos de cualquier institución nacional o internacional.

¿Qué debe contener tu manuscrito?

1. **Carta de presentación**
   - i. **Título del artículo en español e inglés** (Máximo 12 palabras).
   - ii. **Autor(es)**: Nombres y apellidos de cada autor acompañados de su afiliación institucional. Máximo se aceptan 3 autores para secciones largas, y dos para secciones cortas. Incluir el correo electrónico del autor de correspondencia.
   - iii. **Resumen en español e inglés**: Máximo 100 palabras cada uno.
   - iv. **Palabras clave en español e inglés** (3 palabras clave que describan el contenido del manuscrito).
2. **Carta de originalidad**
3. **Artículo en formato Word**
   - i. **Título del artículo en español e inglés** (Máximo 12 palabras).
   - ii. **Resumen en español e inglés**: Máximo 100 palabras cada uno.
   - iii. **Palabras clave en español e inglés** (3 palabras clave que describan el contenido del manuscrito).
   - iv. **Texto**: Mínimo 9,000 y máximo 10,000 caracteres totales para secciones largas. Mínimo 4,500 y máximo 5,000 caracteres totales para secciones cortas. El conteo de caracteres totales incluye espacios. La extensión del texto no incluye las referencias, los títulos, los datos de los autores, las palabras clave, el resumen ni los pies de figura.
   - v. **Por lo menos 2 imágenes citadas en el texto**: propias, sin derechos de autor o referenciadas, que apoyen al entendimiento de su manuscrito. Deben estar en formato PNG, JPG o JPEG, mínimo de 300 ppi y requieren estar acompañadas de su correspondiente pie de figura.
   - vi. **Referencias:** En formato APA, incluyendo identificador DOI, citas dentro del texto entre corchetes y en negritas. Mínimo 2 y máximo 6 referencias.

Revista de divulgación científica iBIO

¿Cómo envío mi manuscrito?

Revisa información complementaria y envía tu manuscrito a través de nuestra plataforma:
https://revistaibio.com/ojs33/index.php/main/about/submissions

Licenciamiento bajo el cual se publican los contenidos: CC BY-NC-ND 4.0