



Biotechnology®

Magazine

**Ftalatos: los
compuestos ocultos
en los plásticos y su
impacto en la salud**

*Yazmin Duran-Encinas, Diana Barajas-Sandoval, María-Guadalupe Sánchez-Otero, Miguel Ángel Hurtado-Oliva, Olivia Arjona, Elena Palacios Mechetnov**

**Proteínas
inteligentes: la nueva
era de los alimentos
funcionales**

*Víctor Jael Morales-Cázares, Víctor Manuel Ocaño-Higuera, Wilfrido Torres-Arreola, Francisco Rodríguez-Félix y Enrique Márquez Ríos**



BIOTECNOLÓGICA MAGAZINE® año 2026, Vol. 4, No. 2, marzo-abril, es una publicación de divulgación, bimestral, editada por: Dra. Norma Y. Hernández Saavedra. <http://biotmagazine.com>, biotecnologicamagazine@gmail.com. Blvd. Constituyentes 1975, L19 MzB 165, Fracc. Campestre, La Paz, Baja California Sur, C.P. 23090, México. Tel. (612) 12 40674. Reservas de Derechos al Uso Exclusivo: 04-2024-022911435400-102, ISSN: 2992-863X; ambos otorgados por el Instituto Nacional del Derecho de Autor. El contenido de los artículos y comunicaciones es responsabilidad exclusiva de los autores y no refleja de manera alguna el punto de vista del Editor ni del Consejo Editorial Fundador. Queda prohibida la reproducción total o parcial del contenido por cualquier medio sin la autorización expresa del Consejo Editorial Fundador.

Crédito Fotografía Portada: Sner a través de canva

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

ORGANISMO RESPONSABLE

Biotecnológica Magazine

Editores en Jefe

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

Consejo Editorial Fundador

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

Editora Ejecutiva

Dra. Crisalejandra Rivera Pérez

Revista digital de divulgación científica.

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

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

Índice

1

EL ASESINO SILENCIOSO DEL BANANO: *MYCOSPHAERELLA* *FIJIENSIS*

Jairo Arath Torres Centeno, J. de Jesus Juvenal Torres
Magaña, Gamaliel Valdivia Rojas*

10

PROTEÍNAS INTELIGENTES: LA NUEVA ERA DE LOS ALIMENTOS FUNCIONALES

Víctor Jael Morales-Cázares, Víctor Manuel Ocaño-Higuera,
Wilfrido Torres-Arreola, Francisco Rodríguez-Félix y Enrique
Márquez Ríos*

16

GENÉTICA DE PRECISIÓN: EL FUTURO DE LA CEBADA Y LA CERVEZA

Maximiliano Pedraza Mejía, Myriam Guadalupe Rodríguez
Gandarilla, Julio Armando Massange Sánchez*

20

ORIGAMI DE ADN: CIENCIA DOBLADA EN CREATIVIDAD Y FUNCIÓN

Norma Y. Hernández Saavedra



32

EL KÉFIR DE LECHE: CONSORCIO MICROBIANO Y SALUD

Macario Savin Amador

42

FTALATOS: LOS COMPUESTOS OCULTOS EN LOS PLÁSTICOS Y SU IMPACTO EN LA SALUD

Yazmin Duran-Encinas, Diana Barajas-Sandoval, María-Guadalupe Sánchez-Otero, Miguel Ángel Hurtado-Oliva, Olivia Arjona, Elena Palacios Mechetnov*

52

ESCARBANDO EN ADN ANTIGUO

Patricia Hernández Cortés

57

LA MILAGROSA DIFUSIÓN DE LA VIDA HACIA EL VACÍO

Arturo Sánchez Paz





Notas del Editor

La ciencia se parece muchas veces a una red tejida con hilos invisibles: cada descubrimiento conecta organismos, moléculas, ecosistemas e incluso nuestra vida cotidiana. En este número de mayo de Biotecnológica Magazine recorreremos algunos de esos hilos que unen la salud, la alimentación, la genética y el ambiente. Desde el silencioso avance de *Mycosphaerella fijiensis* en los cultivos de banano hasta las proteínas inteligentes y la genética de precisión en la cebada, cada artículo muestra cómo la biotecnología continúa transformando la manera en que entendemos y enfrentamos los retos del presente.

También nos adentramos en territorios donde la ciencia parece doblarse sobre sí misma, como en el origami de ADN o en la recuperación de historias ocultas mediante ADN antiguo. Mientras tanto, temas como el kéfir, los ftalatos y la sorprendente capacidad de la vida para expandirse hacia ambientes extremos nos recuerdan que incluso lo más pequeño puede tener efectos profundos sobre nuestra salud, nuestro entorno y nuestra forma de habitar el planeta. Esperamos que esta edición despierte curiosidad, reflexión y nuevas preguntas en cada lector.

El asesino silencioso del banano: *Mycosphaerella fijiensis*

Jairo Arath Torres Centeno, J. de Jesus Juvenal Torres Magaña, Gamaliel Valdivia Rojas*.
Maestría en Agrobiotecnología. Tecnológico Nacional de México. Instituto Tecnológico Superior de Los Reyes.

*Autor de correspondencia: gamaxew@gmail.com (G.V.R)

Foto: persantífoto

Tema

Los bananos son considerados una fruta muy importante en la alimentación humana por su aporte de potasio y fibra, sin embargo, su producción presenta retos importantes porque presentan una enfermedad causada por el patógeno *Mycosphaerella fijiensis*. En este artículo exploramos la biología, diseminación, impacto económico, métodos de control y las nuevas tendencias de manejo de éste patógeno.

1.Introducción

A nivel mundial se cosechan alrededor de 4.9 millones de hectáreas de plátanos y bananos en el mundo, siendo los países con mayor superficie cultivada India, China, Tanzania, Brasil y Filipinas (Fig. 1). Mientras que México se posiciona en el ranking mundial en el lugar 18 con una aportación estimada en 2.6 millones de toneladas que representan el 1.4% de la superficie mundial cosechada. A

nivel nacional, se registran aproximadamente 87 mil hectáreas distribuidas en los estados de Chiapas, Tabasco, Veracruz, Colima y Michoacán como principales productores nacionales (SIAP, 2024). Este cultivar se ve afectado por diversas plagas, por ejemplo los nematodos *Helicotylenchus* sp., *Meloidogyne incognita*, *Meloidogyne arenaria*, *Criconema* sp., *Helicotylenchus multicinctus* y *Radopholus similis* (Lara et al., 2015) o insectos como picudo negro del banano (*Cosmopolites sordidus*), se conocen como plagas que generan un impacto económico y que provocan un atrofiamiento en el desarrollo radicular de las plantas.

En el caso de las enfermedades, es importante destacar el *Fusarium oxysporum* raza 4 (López et al., 2019) y las manchas foliares conocidas como *Mycosphaerella musicola*, *M. eumusae* y *M. fijiensis* (Orozco-Santos, 2013); pero de éstos tres últimos hongos el más devastador es *M. fijiensis*, un ascomiceto patógeno foliar que causa la enfermedad de la raya negra de la hoja (también conocida como Sigatoka

negra). Su sintomatología son vetas de color marrón rojizo que pueden llegar a causar necrosis y con ello disminuye drásticamente el área foliar y por lo tanto la fotosíntesis (Fig. 2).

2. Diseminación e impacto de la enfermedad

La Sigatoka negra (*M. fijiensis*) se identificó por primera vez en las islas Fiji y se ha diseminado progresivamente por todos los continentes y países productores de banano. En el continente Americano está presente en México, centroamérica, sudamérica y el caribe (Campo et al., 2020; Orozco-Santos, 2013). En la figura 1 se presentan los países productores de banano en el mundo y, desafortunadamente, también solos países con la distribución de la enfermedad de sigatoka negra.

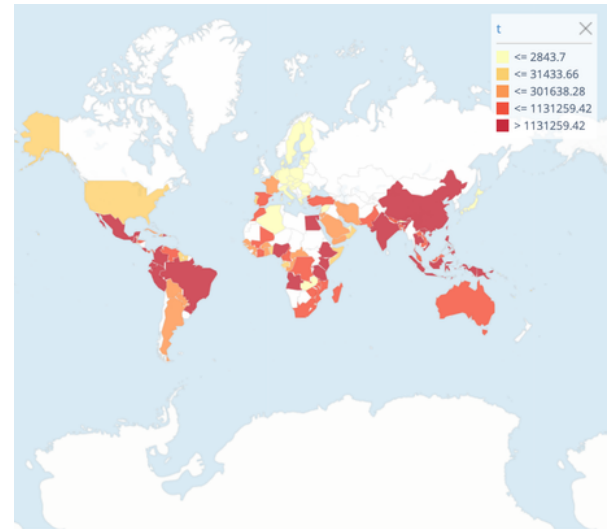


Figura 1. Principales países productores de banano en el mundo. Los países en color en guinda son los de mayor producción (tomado de <https://www.fao.org/faostat/en/#data/QCL/visualize>)



Figura 2. Cultivo de banano dañado por sigatoka negra (tomada de <https://agroexcelencia.com/biocontrol-de-sigatoka-negra-en-platano/>).

En México, la enfermedad fue observada por primera vez en Tapachula Chiapas en 1980, se diseminó hacia los estados de Veracruz y Oaxaca en 1985, en Colima, Michoacán y Jalisco en 1989, siendo Nayarit el último estado con reporte del patógeno en 1994 (Fig. 3). Se desconoce la forma de diseminación de la enfermedad en los estados con producción, pero lo más probable fue el medio de transporte de fruta o plantas llevadas de zonas con presencia del patógeno. El daño ocasionado en las regiones bananeras de México por *M. fijiensis* es

devastador, cuando la enfermedad se presenta, las pérdidas en la producción del fruto son del 50 al 100% junto con la actividad fotosintética y la superficie del cultivar, el costo para la producción en el estado de Colima es de 25 millones de pesos y solo el manejo de la sigatoka negra ocupa del 35 al 45% del total de los costos de producción (Orozco y Ramírez, 1991).

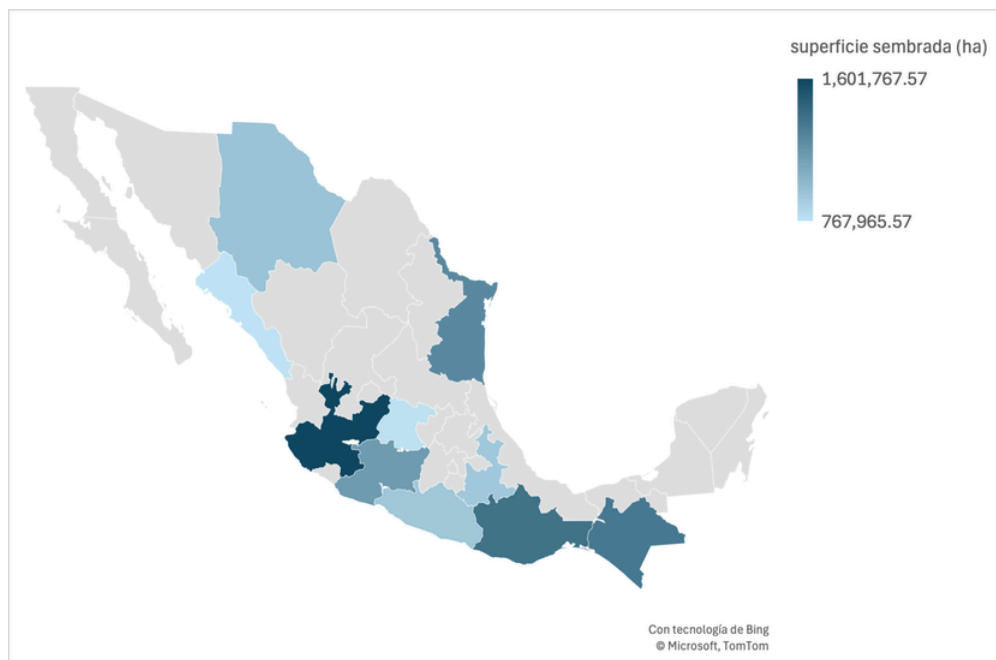


Figura 3. Principales estados productores de bananos en México (elaborada con datos de SIAP, 2024).

3. Biología de la enfermedad

La enfermedad tiene varias fases de desarrollo dependiendo el clima, es decir, condiciones climáticas con precipitaciones por arriba de 1,400 mm al año, humedades relativas mayores al 80% y temperaturas entre los 23 y 28 °C. Se ha observado que bajo condiciones de lluvia, la enfermedad se presenta con mayor agresividad sobre las hojas del banano (Valverde-Luna, 2019).

Este hongo ascomiceto heterotálico cuenta con dos tipos de reproducción: un estado sexual perfecto (*M. fijiensis* Morelet, con formación de ascosporas) y otro, asexual imperfecto (*Paracercospora fijiensis*, con formación de conidios) (Orozco-Santos, 2013). Durante su ciclo de vida, la fase asexual se presenta en los primeros dos estadios de la enfermedad (Crous y Maurichon, 2002) y la fase sexual en las lesiones viejas con manchas en toda la hoja (Figs. 2 y 4) (Carlier et al., 2000). La naturaleza del patógeno tiene un gran potencial de adaptación a las condiciones climáticas y resistencia a fungicidas (Ploetz, 2000).

3.1 Estadios de la enfermedad

A continuación se detallan los estadios de la enfermedad que se muestran en la figura 5.

Estadio 1: Corresponde a una pequeña decoloración de aproximadamente 1 mm en su fase inicial y solamente se puede visualizar en el envés de la hoja. El mismo autor destaca que para poder observar, se debe de exponer el envés de la hoja a la luz, ya que a trasluz no se puede determinar (Fig. 5A).

Estadio 2: La lesión progresa a partir de una decoloración hasta formar una estría de color rojizo, la cual alcanza de 2 a 3 mm de largo y es visible en ambas caras de la hoja (Fig. 5B).

Estadio 3: A medida que la estría se ensancha y alarga, alcanza un estadio de desarrollo en el que comienzan a formarse los conidióforos. Estos, a su vez, generan los conidios, completando así una fase clave del ciclo del hongo (Fig. 5C).

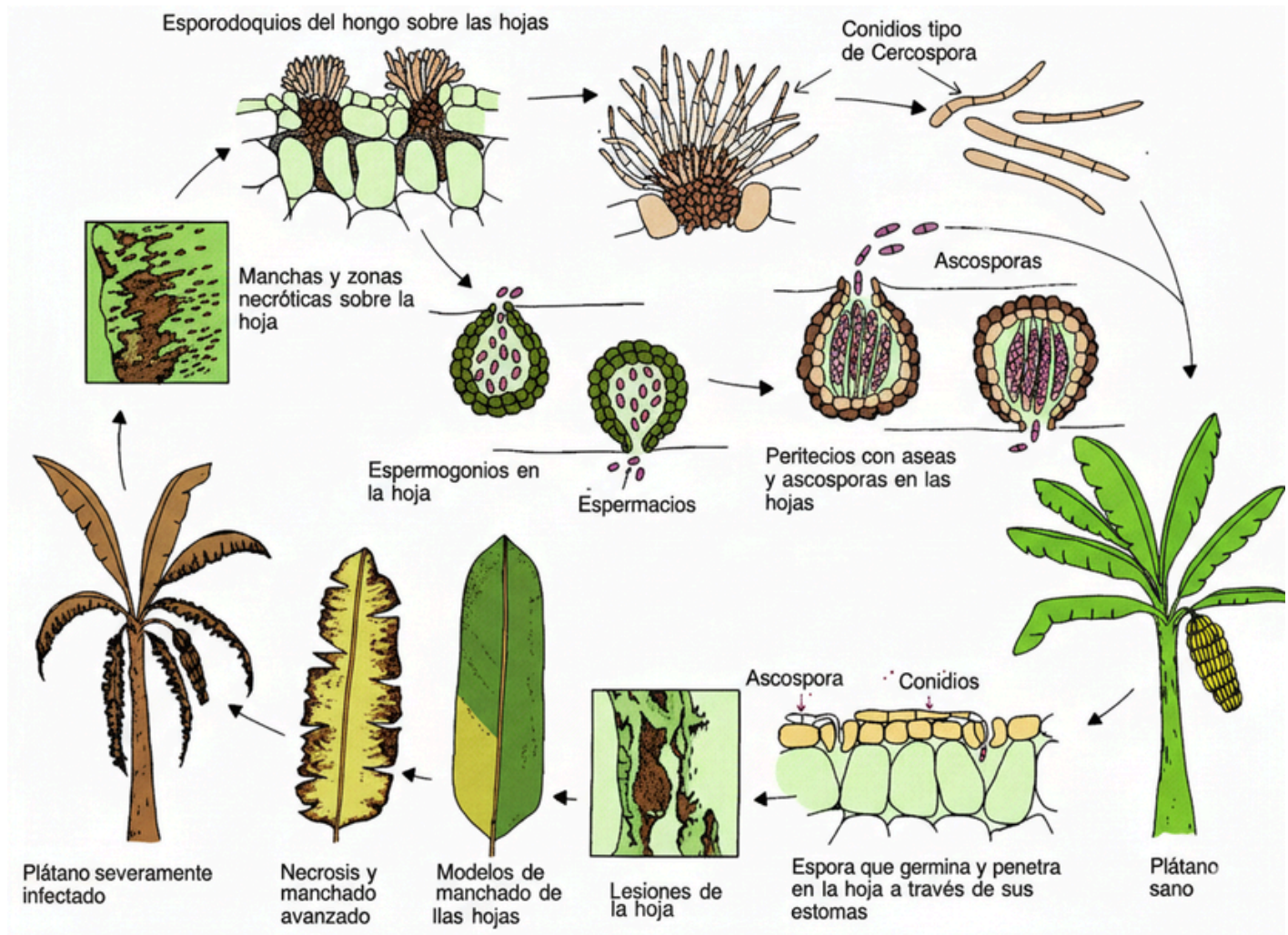


Figura 4. Ciclo de vida de *Mycosphaerella fijiensis* (modificada a partir de Agrios, 2005).

Estadio 4: La sintomatología se caracteriza por la presencia de manchas de forma oval, con una coloración que varía según la superficie foliar: marrón o café oscuro en el envés y negra en el haz (Figs. 5D, 5E).

Estadio 5: Esta fase se caracteriza por una mancha de tonalidad negra uniforme, con morfología elíptica, rodeada de un halo amarillo y con una depresión incipiente en su región central (Fig. 5F).

Estadio 6: Cuando la enfermedad progresa hasta esta etapa avanzada, la región central de la lesión se deseca y presenta un tono blanco-grisáceo, permitiendo distinguir fácilmente los peritecios (Figs. 5G, 5H) (Marcelino et al., 2012).

4. Monitoreo de la enfermedad

Este método se basa en medir el nivel de desarrollo de la enfermedad de acuerdo con los signos que se presentan en las plantas infectadas, el número y tipo de lesiones, el porcentaje de área foliar enferma, el número de hoja más joven infectada y el promedio ponderado de la infección. El sistema consiste en estimar visualmente el área foliar afectada en todas las hojas de las plantas que están cercas de florecer sin la necesidad de cortar la hoja. La evaluación tiene seis grados que incluyen la escala de Stover modificada por Gauhl, se eligen las plantas próximas a emitir la inflorescencia, considerando todas las hojas presentes en la planta con excepción de la hoja cigarro o candela y las hojas dobladas. Se cuentan las hojas de abajo hacia arriba y posteriormente se enumeran de arriba hacia abajo (Orozco-Santos, 2013).

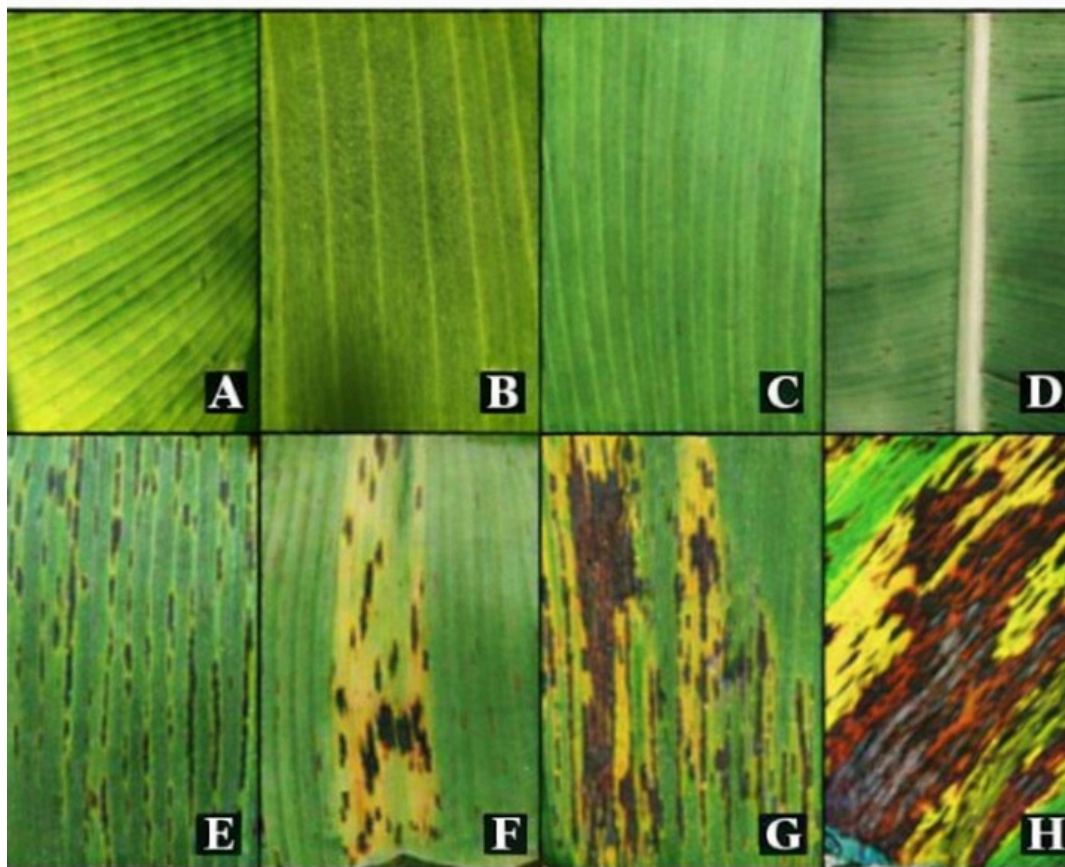


Figura 5. Estadios de la enfermedad (modificada de Torres-Centeno, 2025).

5. Estrategias de manejo de la enfermedad

Esta enfermedad de los bananos (Sigatoka negra), ha sido ampliamente estudiada e investigada, por lo que cuenta con diversos métodos de manejo y control, los cuales se describen a continuación:

5.1 Control legal

De acuerdo con la NOM-010-FITO-1995, se prohíbe la introducción al país o en tránsito internacional plantas de plátano (*Musa spp.*), sus partes y productos, así como envases y embalajes, cuando estos sean originarios o proceden de países afectados por plagas cuarentenarias del plátano (DOF, 1996). Esta normativa obliga a productores y transportistas a cumplir medidas estrictas: uso de certificados fitosanitarios, permisos de movilización, destrucción de residuos vegetativos, transporte en vehículos cerrados y limpios, y aplicación

periódica de fungicidas en zonas infestadas. Además, esta NOM prohíbe movilizar hojas, vástagos y cormos fuera de las áreas cuarentenadas, mientras que la fruta puede transportarse solo bajo condiciones sanitarias verificadas.

5.2 Manejo integrado

La lucha sostenible contra los agentes patógenos se basa en el manejo integrado de las enfermedades, que consiste en las aplicaciones conjuntas de los métodos biológicos, físicos, culturales y químicos que reduzcan los riesgos para la salud, el medio ambiente y la economía (Hollier, 2004). Diversas prácticas culturales se han propuesto dentro de un manejo integrado de la enfermedad. Estas incluyen la remoción de hojas afectadas o porciones de ellas, la eliminación de plantas ya cosechadas y la reducción de la humedad del suelo. Asimismo, se recomienda ajustar las densidades de plantación, realizar un adecuado deshije, implementar sistemas de drenaje y métodos de riego

apropiados, controlar las malezas, y aplicar fertilización tanto química como biológica, esta última mediante el uso de micorrizas y bacterias del género *Azospirillum* (Marín et al., 2003).

5.3 Control cultural

Por control cultural se entiende la modificación de ciertas prácticas del cultivo con el fin de generar un ambiente no favorable para el patógeno, afectar su reproducción y diseminación (Martínez et al., 2011). De acuerdo con Orozco-Santos (2013), el manejo de la Sigatoka negra se fundamenta en tres prácticas culturales. La primera es el uso eficiente de agua mediante métodos de riego optimizados que reduzcan la saturación de humedad en el suelo y favorezcan su aireación. La segunda, es el control de malezas y eliminación de hojas del banano para evitar microclimas húmedos que favorezcan el crecimiento del hongo. Tercera, la generación de canales de drenado del exceso de agua para evitar encharcamientos. Se recomienda ampliamente llevar un monitoreo para detectar, retirar y quemar las hojas infectadas en las primeras fases de la infección.

5.4 Control biológico

Esta estrategia se fundamenta en la aplicación foliar de microorganismos antagonistas capaces de generar sustancias antibióticas o enzimas líticas que afectan directamente las esporas o los tubos germinativos del patógeno (Zuluaga et al., 2007). En este contexto, el empleo de cepas de *Bacillus cereus* y *Serratia entomophila*, en combinación con fungicidas sistémicos y de contacto, ha mostrado ser efectivo para disminuir la incidencia de la enfermedad. No obstante, los autores señalan que es necesario evaluar su eficacia y rentabilidad en condiciones de campo para confirmar su viabilidad práctica (González et al., 1996; 1997). Los *Bacillus subtilis* y *Bacillus amyloliquefaciens* producen metabolitos que inhiben el desarrollo de las esporas y micelio del patógeno (Guzmán-Quesada, 2012).

En el caso de del extracto de la planta *Melaleuca alternifolia* en combinación con las bacterias *Lysinibacillus sphaericus*, *Enterobacter cloacae* y *Bacillus velezensis*, se redujo la enfermedad de manera significativa, confirmando que la combinación de extractos vegetales y bacterias son una herramienta eficaz para prevenir las infecciones patológicas de los cultivos y disminuyendo la aplicación de químicos sintéticos. Un estudio reciente reportó que una cepa de *Pseudomona plecoglossicida* tiene un alto potencial para controlar la Sigatoka negra y mejorar el desarrollo y productividad del banano. Estas bacterias producen enzimas ACC desaminasas, que reducen el etileno y facilitan el control de enfermedades (Marcano et al., 2024). También se ha evaluado la actividad antifúngica del quitosano contra el hongo causante de la Sigatoka negra. Los resultados mostraron que este compuesto ejerce un efecto inhibitorio sobre la fase sexual del patógeno, logrando una supresión del 100% en la germinación de las ascosporas. De acuerdo con Ayala et al. (2014), el quitosano presenta una función dual como fungicida y fertilizante. La combinación de inyecciones vasculares de *B. subtilis* cada 14 días, y aspersiones foliares de extracto de ajo y clavo en plantas de plátano "Macho" (*Musa balbisiana*, var. Chifle) disminuyó la severidad de la Sigatoka negra en un 58.1 % (Salvador-Adriano et al., 2025).

5.5 Control químico

Este tipo de control es el más esencial en el manejo de enfermedades de plantas, utilizando fungicidas para inhibir el crecimiento de los hongos. En el caso de la Sigatoka negra, el uso de fungicidas es crucial y debe integrarse en un sistema de manejo integrado. Esto implica el uso continuo de fungicidas sistémicos y de contacto en emulsiones con agua o aceite. Los triazoles (DMIs) incluyen compuestos como propiconazole, tebuconazole, fenbuconazole y difenoconazole, con un riesgo de resistencia medio.

Los benzimidazoles, como benomyl y carbendazim, tienen un alto riesgo de resistencia. Las aminas, como tridemorph y spiroxamina, presentan un riesgo de resistencia bajo a medio. Las anilino pirimidinas, como pirimentanil, tienen un riesgo de resistencia medio. Las estrobilurinas, como azoxystrobin, tryfloxistrobin y pyraclostrobin, presentan un alto riesgo de resistencia. Los ditiocarbamatos y los derivados del isoftalonitrilo, como mancozeb y clorotalonil, tienen un bajo riesgo de resistencia. Finalmente, los extractos vegetales, como *Melaleuca alternifolia*, también presentan un bajo riesgo de resistencia (Orozco-Santos, 2013). Torres-Magaña (2025) evaluó el efecto de tres inductores de resistencia, ácido salicílico (AS), lignosulfonatos de aluminio (LA) y ácido glutámico (AG). Los resultados evidenciaron que los inductores de resistencia tuvieron un impacto positivo en el control de la enfermedad, el mantenimiento del área foliar, el crecimiento del hijo y el incremento en el peso del racimo.

6. Nuevas tendencias de para el control de la enfermedad

La inducción a resistencia es un proceso por el cual las plantas activan sus mecanismos de defensa contra los patógenos, esto mediante el uso de sustancias (proteínas, bioestimulantes, reguladores de crecimiento vegetal, elicitores microbianos, terpenos, fitoalexinas, aminoácidos, etc.) que estimulan los genes de resistencia. En este caso, las sustancias pueden ser producidas por la propia planta o aplicadas externamente; a esto se le conoce como inductores de resistencia (Laredo *et al.*, 2015). Los inductores de resistencia en las plantas se activan por los factores bióticos y abióticos, los cuales se presentan dependiendo del agente inductor y el tipo de daño que provoca en la planta. La inducción a resistencia biótica se produce cuando el inductor es un organismo vivo, como un hongo, un insecto, una bacteria, etc. y la resistencia abiótica se genera cuando el inductor es un factor físico o químico, es decir; altas o bajas

temperaturas, el estrés hídrico o algún compuesto químico (Peteira, 2020). En el caso de los bananos, se han realizado pruebas con varios productos que participan en la activación de los mecanismos de defensa de las plantas contra el hongo *M. fijiensis*. La aplicación combinada de ácido salicílico y óxido de calcio ejerce un efecto significativo en la reducción del promedio ponderado de infección (PPI) de la enfermedad foliar en banano (Torres-Centeno, 2025; Orozco-Santos, 2024).

7. Conclusión

La producción de bananos en México tiene retos fitosanitarios, destacando la sigatoka negra (*M. fijiensis*) como la enfermedad más devastadora. Se expone su origen, diseminación, biología y el impacto económico que genera en las regiones productoras, además de los distintos métodos de control: legales, culturales, biológicos, químicos. A pesar de los avances en la investigación de la enfermedad, aún no se puede prescindir del uso de moléculas sintéticas en el control de la sigatoka negra, sin embargo, el enfoque actual se orienta hacia un manejo integrado de la enfermedad. Este manejo consiste en utilizar, además de moléculas sintéticas, elicitores, bioestimulantes, prácticas de manejo cultural y legal, así como microorganismos y extractos vegetales que contribuyan al control eficaz de la enfermedad, reduciendo el impacto de la utilización de moléculas sintéticas.

8. Referencias

- Agrios, G. N. (2005). Plant diseases caused by fungi. *Plant pathology*, 385-614.
- Ayala, A., Colina, M., Molina, J., Vargas, J., Rincón, D., Medina, J., ... & Cárdenas, H. (2014). Evaluación de la actividad antifúngica del quitosano contra el hongo *Mycosphaerella fijiensis* Morelet que produce la sigatoka negra que ataca el plátano. *Revista Iberoamericana de Polímeros*, 15(6), 312-338.

- Carlier, J., Zapater, M., Lapeyre, F., Jones, D., & Maurichon, X. (2000). Septoria leaf spot of banana: A newly discovered disease caused by *Mycosphaerella eumusae* (anamorph *Septoria eumusae*). *Phytopathology*, 90(8), 884–890. <https://doi.org/10.1094/PHYTO.2000.90.8.884>
- Crous, P., & Maurichon, X. (2002). *Mycosphaerella eumusae* and its anamorph *Pseudocercospora eumusae* spp. nov.: causal agent of eumusae leaf spot disease of banana. *Sydowia*. Diario Oficial de la Federación. (1996). Norma Oficial Mexicana NOM-010-FITO-1995, Por la que se establece la cuarentena exterior para prevenir la introducción de plagas del plátano. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/856597/1_NOM_18NOV1996.pdf
- González, J. M., Ramírez, L. A., & Pérez, R. D. (2019). Evaluación del manejo integrado para el control de enfermedades foliares en banano (*Musa* spp.) en sistemas de producción tropical. *Revista Agroalimentaria*, 25(1), 45–58.
- González, R., Bustamante, E., & Shannon, P. (1997). Control Biológico en el manejo integrado de *Mycosphaerella fijiensis*. 16-19. Mercedes de Guácimo, Limon, Costa Rica.
- González, R., Bustamante, E., Shannon, P., Okumoto, S., & Leandro, G. (1996). Selección de microorganismos quitinolíticos para el control de la sigatoka negra del banano (*Mycosphaerella fijiensis*).
- Guzmán-Quesada, J. A. (2012). Manejo integrado de la Sigatoka negra en banano y plátano. Corporación Bananera Nacional (CORBANA).
- Hollier, C. (2004). Integrated pest management. *Plant Pathology. Concepts, and laboratory*, 337-344. Boca Ratón, Florida, Estados Unidos: CRC Press.
- Lara, P., López, L., & Carrion G. (2015). Nematodos fitoparásitos asociados a raíces de plátano (*Musa acuminata* AA) en el. *Revista Mexicana de Fitopatología*.
- Laredo, E., Martínez, J., Ilína, A., Guillen, L., & Hernández, F. (2017). Aplicación de ácido jasmónico como inductor de resistencia vegetal frente a patógenos. Texcoco, México, México: Rev. Méx.
- López, S., & Castaño J. (2019). Manejo integrado del mal de Panamá [*Fusarium oxysporum* Schlechtend: Fr. sp. cubense (E.F. SM.) W.C. Snyder & H.N. Hansen]: una revisión. *Revista U.D.C.A. Actualidad y Divulgación Científica*.
- Marcano, Esther I., Díaz-Alcántara, C. A., Pimentel Pujols, Á. R., Vicioso Alcalá, Á. F., & Núñez Ramos, P. A. (2024). Use of native plant growth promoting bacteria (PGPR) in the control of *Mycosphaerella fijiensis* in organic banana plantations in Dominican Republic. *Revista de Investigación e Innovación Agropecuaria y de Recursos Naturales*, 11(2), 47-56. <https://doi.org/10.53287/tcga1188ja16w>.
- Marcelino, L., González, V., & Ríos, D. (2012). El cultivo del plátano (*Musa paradisiaca* L.) en Panamá. Panamá: IDIAP.
- Marín, D., Romero, R., Guzmán, M., & Turner, S. (2003). Sigatoka negra: una amenaza creciente para el cultivo del banano. 87(3):208-222. Sociedad Estadounidense de Fitopatología. doi:10.1094/PDIS.2003.87.3.208
- Martínez, I., Villata, R., Soto, E., Murillo, G., & Guzmán, M. (2011). Manejo de la sigatoka negra en el cultivo de banano. 2. Costa Rica: Corbana.
- Orozco, R., & Ramírez, S. (1991). La sigatoka negra del plátano (*Mycosphaerella fijiensis*) en el estado de Colima. *Revista Mexicana de Fitopatología* 9(2):69-75. Colima, Colima, México.
- Orozco-Santos, M. (2013). La Sigatoka Negra y su Manejo Integrado en Banano. Tecomán, Colima, México: INIFAP. doi:ISBN: 978-607-37-0019-1
- Orozco-Santos, M. (2024). Actualidades en el manejo integrado de sigatoka negra en banano. *TC*, 1(1), 81. <https://www.acorbat-rtc.com/assets/doc/Conferencias/5.%20RTC2481.pdf>

Peteira, O. (2020). Revista de Protección Vegetal. SciELO.
[http://scielo.sld.cu/scielo.php?](http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S101027522020000100001)

[script=sci_arttext&pid=S101027522020000100001](http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S101027522020000100001)

Ploetz, L. (2000). La enfermedad más importante del banano y el plátano: Una breve introducción a la historia, importancia y manejo de la sigatoka negra. Memorias Reunión ACORBAT 2000, 117. Ecuador: ACORBAT.

Salvador-Adriano, M., Constantino-Salazar, F. U., Salvador-Figueroa, M., Salgado-Mora, M. G., Moreno-Castillo, B., & Adriano-Anaya, M. D. L. (2025). Efecto de *Bacillus subtilis* ANT01 sobre la severidad de sigatoka negra en plátano “macho” (*Musa balbisiana*). *Biotecnia*, 27. <https://doi.org/10.18633/biotecnia.v27.2475>

SIAP. (2024). Panorama Agroalimentario. México, México: Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. https://nube.agricultura.gob.mx/cierre_agricola/

Torres-Centeno, A. (2025). Evaluación de inductores de resistencia y calcio en la incidencia de *Mycosphaerella fijiensis* en plátano *Musa cavendish* AAA. Tesis de licenciatura. Instituto Tecnológico del Valle de Morelia.

Torres-Magaña, J. (2025). Efecto de poda temprana, calcio e inductores de resistencia en la incidencia de *Pseudocercospora fijiensis* (Sinónimo de *Mycosphaerella fijiensis*) EN “*Musa cavendish* AAA”. Tesis de maestría. Instituto Tecnológico Superior de Los Reyes.

Valverde Luna, M. E. (2019). “Manejo y prevención de Sigatoka negra (*Mycosphaerella fijiensis*) en el cultivo de banano, en la hacienda Banaloli 1, zona de Babahoyo. Obtenido de <http://dspace.utb.edu.ec/handle/49000/6149>

Zuluaga, C., Patiño, L., & Collazos, J. (2007). Integración de Inducción de Resistencia con Bacterias Quitinolíticas en el Control de la Sigatoka Negra (*Mycosphaerella fijiensis* Morelet) en Banano. 60, 3891-3905. Medellín, Antioquia, Colombia: Rev. Fac. Agr. Medellín. http://www.scielo.org.co/scielo.php?pid=S030428472007000200004&script=sci_arttext

Cita:

Torres Centeno, J. A., Torres Magaña, J. de J. J., & Valdivia Rojas, G. (2026). El asesino silencioso del banano: *Mycosphaerella fijiensis*. In *Biotecnológica Magazine* (Vol. 4, Number 2, pp. 1-9). Zenodo. <https://doi.org/10.5281/zenodo.20146245>

Proteínas inteligentes: la nueva era de los alimentos funcionales



Víctor Jael Morales-Cázares, Víctor Manuel Ocaño-Higuera, Wilfrido Torres-Arreola, Francisco Rodríguez-Félix y Enrique Márquez Ríos*

Departamento de Investigación y Posgrado en Alimentos, Universidad de Sonora, Blvd. Luis Encinas y Rosales S/N, Col. Centro, Hermosillo, Sonora, México.

*Autor para correspondencia: Enrique Márquez Ríos, correo electrónico: enrique.marquez@unison.mx

Foto: Angela Kotsell

Tema

Las proteínas no solo nutren, también determinan la textura, estabilidad y calidad de muchos alimentos cotidianos. Este artículo aborda cómo la modificación química de proteínas ha dado lugar a las llamadas “proteínas inteligentes”. Estas proteínas permiten mejorar la funcionalidad de los alimentos y actuar como vehículos de compuestos benéficos para la salud. Así, se abren nuevas posibilidades en el desarrollo de alimentos funcionales

1.Introducción

Cuando escuchamos la palabra “proteínas”, casi siempre pensamos en el músculo de un atleta, en la clara de huevo del desayuno o en el filete que ponemos en la parrilla. Se sabe que las proteínas son fundamentales para construir y reparar tejidos, mantener los músculos fuertes y sostener funciones vitales; pero si miramos un poco más de cerca, descubrimos que en los alimentos las proteínas hacen mucho más que nutrir, son las responsables silenciosas de que muchos productos tengan la forma, el sabor y la textura que conocemos.

Piensa en un pan esponjoso; la glutenina y la gliadina, dos proteínas del trigo, se entrelazan formando una red que atrapa las burbujas de aire y permite que el pan crezca. Sin ellas, tendríamos panes planos y quebradizos. En la mayonesa, la mezcla de aceite y agua es naturalmente inestable, pero las proteínas de la yema de huevo actúan como un “pegamento” en la interfase, manteniendo la emulsión (mezcla de agua y aceite) estable y cremosa. Sin estas proteínas, la mayonesa se separaría en cuestión de minutos. ¿Y qué hay de la espuma de un capuchino? Allí entran en acción las proteínas de la leche, que se organizan alrededor de burbujas de aire formando una capa protectora que mantiene la espuma firme.

Estos son solo algunos ejemplos que muestran cómo, sin darnos cuenta, las proteínas trabajan en segundo plano para que nuestros alimentos sean apetecibles. Pero aquí aparece un problema: no siempre funcionan como quisiéramos. Algunas proteínas se disuelven mal, otras pierden su estabilidad con el calor y hay muchas que

simplemente no logran mantener un alimento homogéneo por mucho tiempo. La buena noticia es que la ciencia está encontrando soluciones. En los últimos años, los investigadores han aprendido a modificar las proteínas de manera controlada, logrando que sean más solubles, más estables y, en algunos casos, capaces de hacer cosas sorprendentes, como transportar antioxidantes o facilitar la absorción de minerales. Estas “proteínas inteligentes” no solo mejoran la calidad de los alimentos, sino que las convierten en verdaderas herramientas para la salud.

comportamiento es útil en la cocina casera, pero en la industria puede convertirse en un problema. Por ejemplo, en productos enlatados o pasteurizados, las proteínas pueden coagular demasiado y afectar la textura o el aspecto del alimento. Estas limitaciones hacen que la industria busque soluciones para mejorar la funcionalidad de las proteínas, sin perder su valor nutricional. Aquí es donde entra la ciencia de la modificación.

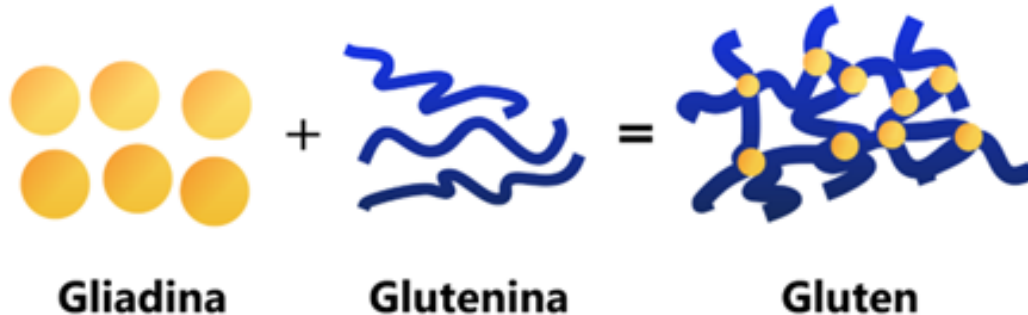


Figura 1. La gliadina y la glutenina interactúan formando la red de gluten.

2. Las limitaciones de las proteínas naturales

Aunque las proteínas son moléculas versátiles, no siempre cumplen perfectamente las expectativas de la industria alimentaria ni de los consumidores. Un ejemplo común son las bebidas proteicas. Seguro has visto en el gimnasio a alguien bebiendo un batido de proteínas, pero si dejas reposar esa bebida por unos minutos, es probable que notes que parte del polvo se sedimenta en el fondo. Eso ocurre porque algunas proteínas, como las de suero o las vegetales, no se disuelven fácilmente en agua. Otro caso son los aderezos y salsas; la mayonesa o una vinagreta necesitan mantenerse homogéneas, sin que el aceite y el agua se separen. Aquí las proteínas actúan como “puentes” entre ambos líquidos, pero muchas veces no son lo suficientemente estables y la mezcla termina separándose con el tiempo. Además, hay proteínas que son muy sensibles al calor. Piensa en lo que pasa cuando hierves un huevo: la clara líquida se convierte en una masa blanca y firme porque las proteínas se desnaturalizan. Este

3. La ciencia en el mejoramiento de las proteínas

Modificar una proteína no significa transformarla en algo artificial o irreconocible. Lo que hacen los científicos es alterar de manera controlada su estructura, normalmente en regiones específicas, para mejorar su desempeño en los alimentos.

Una forma de entenderlo es imaginar una llave que abre una puerta, pero que a veces se atasca porque los dientes no encajan bien. Con pequeños ajustes, esa llave puede girar suavemente y abrir la cerradura sin problemas. De manera parecida, la modificación química de proteínas “afina” su estructura para que encajen mejor en el sistema alimentario.

Entre los métodos más comunes encontramos:

- Acetilación y succinilación: consisten en añadir pequeños grupos químicos a la proteína para que se vuelva más soluble en agua. Esto es especialmente útil en bebidas, donde no queremos grumos ni sedimentos.
- Fosforilación: incorpora grupos fosfato, lo que permite a la proteína retener más agua y estabilizar emulsiones.

- Glicosilación: une azúcares a la proteína, lo que la hace más estable frente al calor y más resistente en procesos de almacenamiento. Este tipo de modificación también mejora la capacidad de formar espumas, algo esencial en productos como mousses o capuchinos.

Lo interesante es que estos cambios ocurren a nivel molecular, pero tienen un impacto tangible en nuestra experiencia cotidiana al comer. Gracias a estas técnicas, los alimentos se vuelven más atractivos, seguros y duraderos.

4. Del laboratorio al alimento: ¿qué cambia realmente cuando se modifica una proteína?

Para facilitar la comprensión de cómo se modifican las proteínas, es importante conocer que estas moléculas presentan distintos niveles estructurales, desde una secuencia lineal de aminoácidos hasta estructuras tridimensionales complejas. Cuando se habla de modificarlas químicamente, es común pensar que se trata de un cambio drástico o artificial. Sin embargo, estas modificaciones suelen ser pequeños ajustes controlados cuyo objetivo no es transformar la proteína, sino mejorar la manera en que se comporta dentro de un alimento.

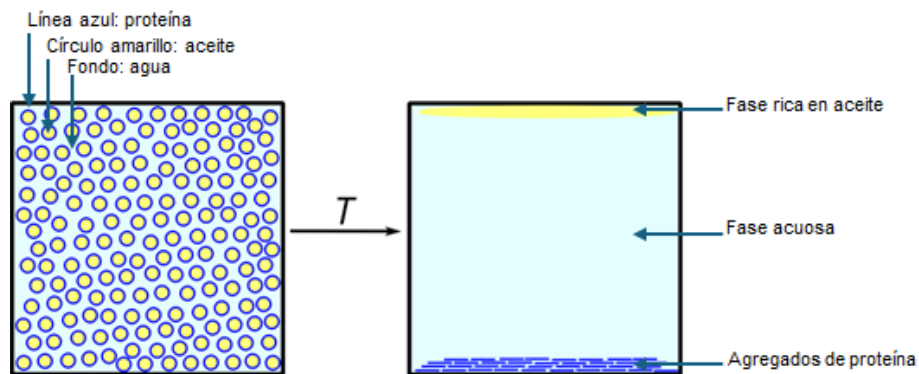


Figura 2. Proceso de separación de una mezcla inestable a través del tiempo (T). A la izquierda, la proteína (azul) intenta mantener el aceite (amarillo) en el agua. A la derecha, la mezcla se separa, provocando que el aceite suba (debido a que es menos denso que el agua) y la proteína se sedimente.

Las proteínas pueden imaginarse como cadenas largas que se pliegan formando estructuras tridimensionales. Esa forma determina cómo interactúan con el agua, las grasas o el aire. Al modificar una proteína, los científicos actúan principalmente sobre su superficie, incorporando grupos químicos en puntos específicos que influyen en estas interacciones, sin alterar la estructura básica de la molécula. Uno de los cambios más importantes es la mejora de la solubilidad. Muchas proteínas naturales tienden a agruparse y formar grumos, especialmente en bebidas. Al introducir cargas eléctricas adicionales, las proteínas interactúan mejor con el agua y permanecen dispersas, lo que se traduce en productos más homogéneos y visualmente atractivos.

Otro aspecto clave es la estabilidad. Las proteínas modificadas pueden resistir mejor el calor, los cambios de pH o el almacenamiento prolongado, ayudando a conservar la textura y apariencia del alimento. Es importante señalar que estas modificaciones no buscan alterar el valor nutricional de las proteínas. En general, su capacidad de aportar aminoácidos se mantiene, y el organismo las digiere de forma similar a las proteínas no modificadas. En este sentido, la modificación química puede entenderse como un “ajuste fino” que optimiza propiedades funcionales sin cambiar la esencia de la proteína.

Estos cambios, que ocurren antes de que el alimento llegue al consumidor, explican por qué algunas proteínas pueden adquirir funciones adicionales. Al mejorar su solubilidad y estabilidad, se crea la base para que actúen no solo como ingredientes estructurales, sino también como componentes con funciones más avanzadas, dando paso al concepto de “proteínas inteligentes”.

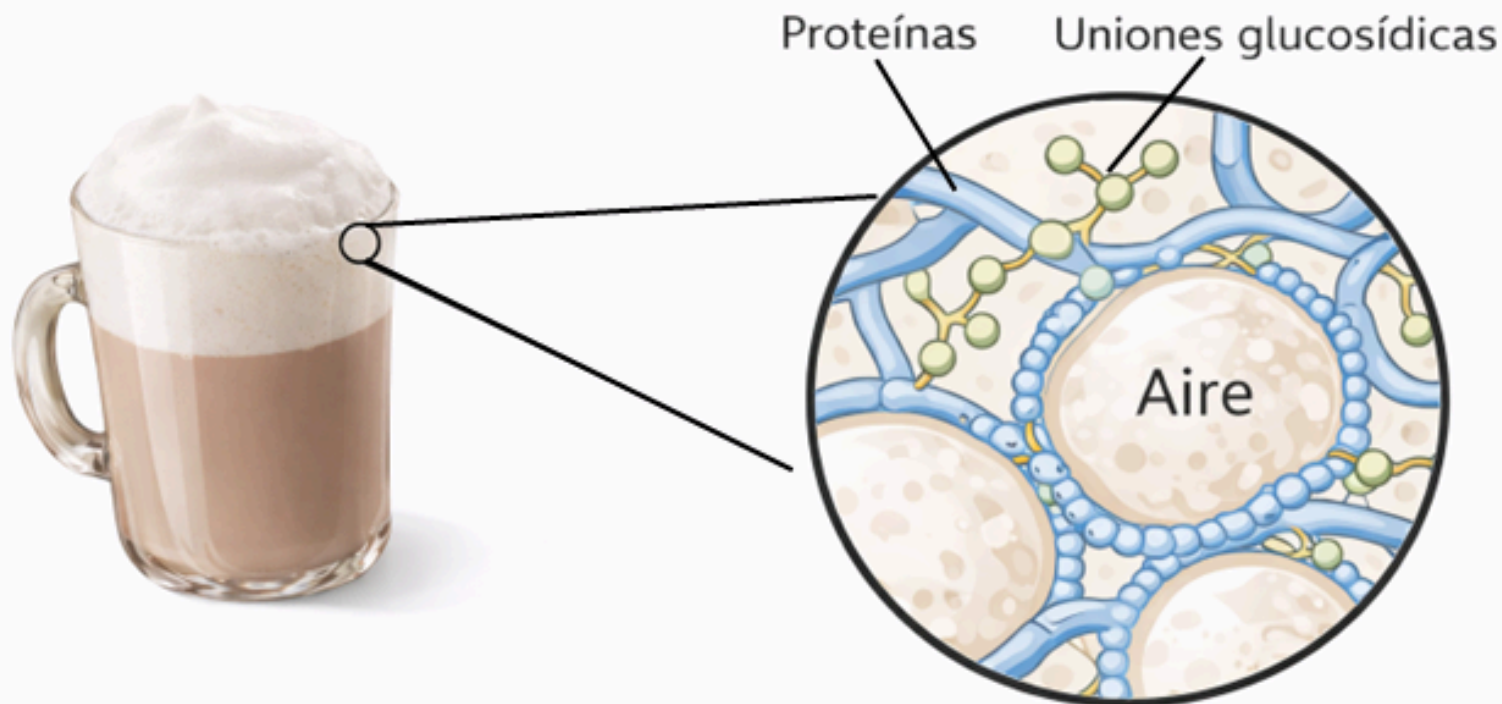


Figura 3. Estabilización de espumas mediante el atrapamiento de aire en estructuras de proteínas glicosiladas.

5. Aplicaciones en la mesa y en el futuro

Aunque pueda sonar como ciencia ficción, estas tecnologías ya se están aplicando en la industria alimentaria.

- Bebidas proteicas mejoradas: gracias a la modificación, ya existen productos que se mantienen estables durante semanas sin formar grumos. Esto es clave en bebidas deportivas o en suplementos para personas mayores.
- Snacks funcionales: se están desarrollando galletas, barras y cereales donde las proteínas no solo aportan energía, sino que también ayudan a transportar antioxidantes o a mejorar la digestibilidad.
- Alimentos para poblaciones vulnerables: uno de los campos más prometedores es el de los alimentos diseñados para niños, adultos mayores o personas con deficiencias nutricionales. Por ejemplo, proteínas modificadas que facilitan la absorción de calcio podrían ser clave en la prevención de la osteoporosis.

Aunque muchas de las modificaciones químicas de proteínas se han desarrollado ampliamente a nivel experimental, en los alimentos comerciales predominan cambios inducidos por procesos industriales, como por

ejemplo la reacción de Maillard, así como tratamientos enzimáticos y físicos. Estos procesos ocurren de manera cotidiana en productos que consumimos a diario, como el pan tostado, la leche en polvo, los yogures, el café con leche o las fórmulas infantiles, donde las proteínas interactúan con azúcares y otros componentes, modificando su estructura. Incluso en alimentos como quesos procesados, bebidas proteicas y productos horneados, estas transformaciones mejoran la textura, estabilidad y vida útil. Aunque no siempre son visibles, estos cambios implican modificaciones a nivel molecular que permiten optimizar la funcionalidad de las proteínas sin comprometer su seguridad para el consumo.

De cara al futuro, se habla incluso de alimentación personalizada. Con base en análisis genéticos o de salud, cada persona podría recibir alimentos diseñados a su medida, con proteínas modificadas para suplir sus necesidades específicas: más hierro para quienes tienen anemia, más antioxidantes para quienes buscan protegerse del estrés oxidativo, o proteínas de fácil digestión para quienes sufren problemas gástricos.



Figura 4. Niveles estructurales de las proteínas. Las proteínas se organizan desde una secuencia de aminoácidos (estructura primaria), pasando por plegamientos locales como hélices y láminas (estructura secundaria), hasta una conformación tridimensional (estructura terciaria) y, en algunos casos, la asociación de varias subunidades (estructura cuaternaria).

6. Seguridad y confianza del consumidor

Una de las preguntas inevitables es: ¿es seguro consumir proteínas modificadas químicamente? La respuesta es sí, siempre que se trate de modificaciones aprobadas y reguladas por organismos internacionales, como la FDA (Food and Drug Administration), en Estados Unidos o la EFSA (European Food Safety Authority), en Europa. Estos cambios no buscan crear moléculas artificiales extrañas, sino mejorar lo que la naturaleza ya ofrece. Sin embargo, la percepción del consumidor es un reto. Muchas personas desconfían cuando escuchan términos como “químico” o “modificado”. Aquí la clave está en la comunicación, explicar que se trata de herramientas seguras, probadas y diseñadas para mejorar la salud. De hecho, algunos procesos de modificación ocurren incluso de manera natural en los alimentos durante la cocción o la fermentación; lo que hace la ciencia es optimizarlos.

7. Hacia una alimentación más inteligente

Estamos en un momento emocionante para la ciencia de los alimentos. La modificación química de proteínas abre la puerta a una nueva generación de productos que no solo alimentan, sino que también previenen enfermedades, mejoran la calidad de vida y responden a

las necesidades de cada persona. Lejos de ser un lujo, esta tecnología puede convertirse en una herramienta fundamental en un mundo donde la nutrición es un desafío global: desde la lucha contra la desnutrición en países en desarrollo hasta la prevención de enfermedades crónicas en sociedades industrializadas. Las proteínas inteligentes son pieza importante del futuro de los alimentos funcionales. Y lo mejor es que ese futuro ya está llegando a nuestra mesa, una bebida más estable, un snack más nutritivo o un suplemento más eficaz a la vez.

8. Referencias

- de Oliveira, F. C., Coimbra, J. S. R., de Oliveira, E. B., Zuñiga, A. D. G., & Rojas, E. E. G. (2016). Food protein-polysaccharide conjugates obtained via the Maillard reaction: A review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 56(7), 1108–1125.
- Huang, S., Feng, X., Yue, W., Madjirebaye, P., Deng, X., Fan, Y., Chen, J., & Wu, X. (2025). Effects of chemical modifications on allergenicity and functional properties of silkworm pupae proteins. *Food Chemistry*, 477, 143635.

Li, F., Wu, X., Liang, Y., & Wu, W. (2023). Potential implications of oxidative modification on dietary protein nutritional value: A review. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 22, 714–751.

Li, L., Huang, Y., Ding, Q., Wang, D., Yuan, T., Song, G., Seong, H., & Gong, J. (2025). Formation and functional improvement of α -casein, β -lactoglobulin, and hyaluronic acid conjugates via the Maillard reaction: Comparison with different mass ratios. *Food Chemistry*, 475, 143322.

Liang, P. J., Chen, S. M., Fang, X., & Wu, J. F. (2024). Recent advance in modification strategies and applications of soy protein gel properties. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 23, e13276.

Parandi, E., Mousavi, M., Assadpour, E., Kiani, H., & Jafari, S. M. (2024). Sesame protein hydrolysate–gum Arabic Maillard conjugates for loading natural anthocyanins: Characterization, *in vitro* gastrointestinal digestion and storage stability. *Food Hydrocolloids*, 148, 109490.

Sun, Z., Liu, H., & Li, X. (2024). Precision in protein chemical modification and total synthesis. *Chem*, 10, 767–799.

Tang, Q., Roos, Y. H., & Miao, S. (2024). Structure and gelation mechanism of plant proteins versus dairy proteins and evolving modification strategies. *Trends in Food Science & Technology*, 147, 104464.

Teodorowicz, M., van Neerven, J., & Savelkoul, H. (2017). Food processing: The influence of the Maillard reaction on immunogenicity and allergenicity of food proteins. *Nutrients*, 9(8), 835.

Ye, S. J., Park, H. J., & Baik, M. Y. (2025). Modification of plant proteins as alternatives to animal proteins: A review. *Food Science and Biotechnology*, 34, 349–363.

Zeng, W., Xue, J., Geng, H., Liu, X., Yang, J., Shen, W., Yuan, Y., Qiang, Y., & Zhu, Q. (2024). Research progress on chemical modifications of tyrosine residues in peptides and proteins. *Biotechnology and Bioengineering*, 121, 799–822.

Zheng, L., San, Y., Xing, Y., & Regenstein, J. M. (2024). Rice proteins: A review of their extraction, modification techniques and applications. *International Journal of Biological Macromolecules*, 268, 131705.

Zhao, P., Zhang, Z., Ran, W., Bai, T., Cheng, J., & Zhang, J. (2025). Recent advances, challenges, and functional applications of protein chemical modification in the food industry. *Foods*, 14(16), 2784.

Sobre el autor:

El Dr. Enrique Márquez Ríos realizó sus estudios de doctorado y posdoctorado en el Centro de Investigación en Alimentación y Desarrollo (CIAD), unidad Hermosillo. Actualmente es Profesor de la Universidad de Sonora, miembro de la Academia Mexicana de Ciencias y del SNII como nivel 3.

Cita:

Morales-Cázares, V. J., Ocaño-Higuera, V. M., Torres-Arreola, W., Rodríguez-Félix, F., & Márquez Ríos, E. (2026). Proteínas inteligentes: la nueva era de los alimentos funcionales. *Biotecnológica Magazine*, 4(2), 10–15.
<https://doi.org/10.5281/zenodo.20146479>



Genética de precisión: El futuro de la cebada y la cerveza

Maximiliano Pedraza Mejía 1, Myriam Guadalupe Rodríguez Gandarilla1, Julio Armando Massange Sánchez 1*

1 Centro de Investigación y Asistencia en Tecnología y Diseño del Estado de Jalisco, A.C. (CIATEJ), Unidad de Biotecnología Vegetal, Zapopan, México. Camino Arenero 1227, El Bajío, 45019, Zapopan, Jalisco.

*Correspondencia: jmassange@ciatej.mx

Foto: Aflo

Tema

Aquí exploramos cómo la genética de precisión está transformando el mejoramiento de la cebada, el cereal clave para la producción de cerveza. Mostramos cómo herramientas como el cultivo in vitro y el sistema CRISPR/Cas9 permiten generar nuevas variedades con mejores características, así como los retos regulatorios que acompañan su aplicación en el campo.

1.Introducción

La cerveza ha acompañado a la humanidad durante más de 9,000 años, desde sus orígenes en la antigua Mesopotamia hasta convertirse en una de las bebidas más consumidas del mundo. Detrás de cada vaso hay mucho más que historia: existe un proceso biológico fascinante en el que los azúcares del grano se transforman en aromas, sabores y espuma gracias a la acción de la levadura, en presencia de agua y lúpulo. En el centro de esta transformación se

encuentra la cebada (*Hordeum vulgare* L.), ingrediente esencial de la mayoría de las cervezas. No es casualidad que entre el 30% y el 40% de su producción global se destine a la elaboración de cerveza (Figura 1).

La industria cervecera enfrenta el desafío de asegurar un suministro suficiente de grano para una demanda global en crecimiento, en un contexto marcado por el cambio climático. Sequías más frecuentes, olas de calor y otras condiciones ambientales extremas afectan directamente el rendimiento y la calidad de la cebada, poniendo en riesgo la estabilidad del cultivo y, con ello, toda la cadena productiva. Frente a este escenario, el mejoramiento genético se ha convertido en una herramienta estratégica para desarrollar nuevas variedades más resistentes y productivas. Así, la innovación en el campo no solo fortalece este cultivo agrícola, sino también a toda una industria.



Figura 1. Cebada y cerveza: la ciencia detrás de cada tarro.

Mejoramiento genético: una historia más antigua que la cerveza

Hace más de 10,000 años, mucho antes de que existieran los laboratorios y las herramientas moleculares, el mejoramiento genético ya estaba en marcha. Los primeros agricultores, guiados por la intuición, seleccionaban las semillas de las plantas más vigorosas o fáciles de cosechar. Sin saberlo, estaban eligiendo características determinadas por los genes, es decir, por el «manual de instrucciones» que guía el desarrollo de cada planta y define su tamaño, su resistencia a las enfermedades y su capacidad de adaptación al clima. Durante siglos, la cebada se mejoró de manera empírica, y muchas de esas variedades tradicionales siguen siendo valiosas en la actualidad, pues representan la base de la diversidad genética que ha permitido cultivar este cereal en entornos muy diversos. En el siglo XIX, la ciencia comenzó a explicar lo que los agricultores ya practicaban en el campo. Las ideas de Darwin sobre la selección y los principios de la herencia descritos por Mendel sentaron las bases del mejoramiento

genético moderno, en el que los cruzamientos entre distintas variedades permitieron combinar rasgos deseables de forma más dirigida y eficiente. Esto marcó el inicio de una nueva etapa: una selección basada en el conocimiento científico y no solo en la observación. Décadas más tarde, este camino conduciría al desarrollo de herramientas biotecnológicas capaces de modificar la cebada con una precisión impensable en el pasado.

¿Del azar a la precisión? Herramientas tecnológicas para la cebada del futuro

En esta nueva era, el mejoramiento genético ha dejado atrás el ensayo y error para convertirse en una estrategia de alta precisión. Herramientas actuales como la secuenciación de genomas, el cultivo in vitro y la edición genética no solo permiten identificar genes clave, sino también comprender cómo interactúan entre sí y cómo responden a distintas condiciones ambientales. La combinación de estas tecnologías abre la puerta a programas de mejora mucho más eficientes, capaces de desarrollar variedades que resistan el cambio climático sin perder la calidad maltera que busca la industria.

CRISPR/Cas9: las tijeras moleculares de precisión

El mejoramiento de precisión emplea herramientas conocidas como «tijeras moleculares»: enzimas capaces de cortar el ADN en sitios definidos para modificar con exactitud secuencias asociadas al rendimiento, a la resistencia a enfermedades o a la calidad del grano. Entre ellas, el sistema CRISPR/Cas9 se ha consolidado como la tecnología más versátil y prometedora de la biotecnología vegetal actual. Este sistema funciona gracias a un equipo de dos: la enzima Cas9 y una molécula de ARN guía, que actúa como un «GPS molecular» para localizar el punto exacto del corte. Una vez que el sistema reconoce su objetivo (ayudado por una breve secuencia de control llamada PAM), la enzima realiza el corte.

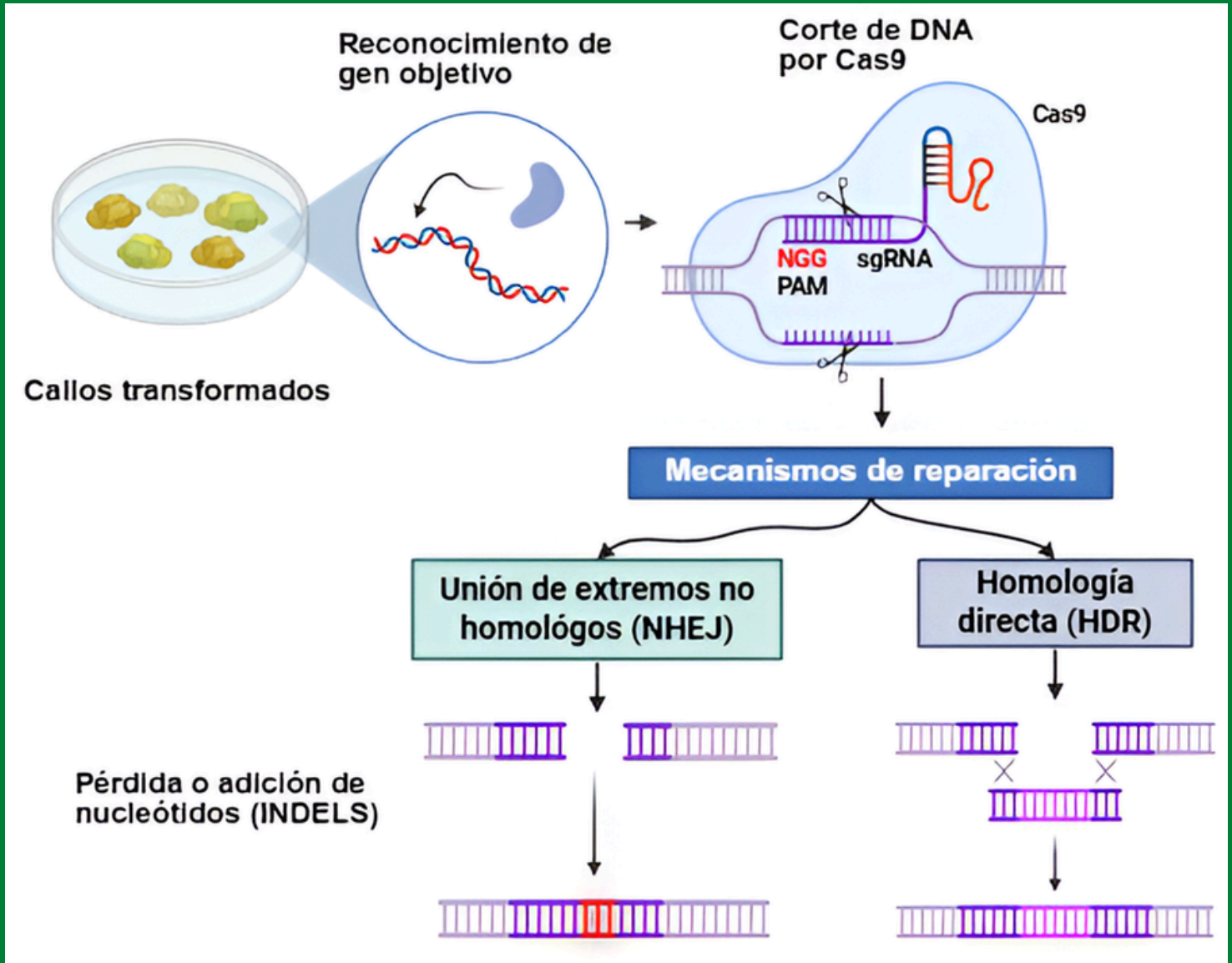


Figura 2. Cómo funciona el sistema CRISPR/Cas9 para editar genes. Se muestra cómo la herramienta CRISPR/Cas9 corta el ADN en un punto específico y cómo la célula repara ese corte mediante dos mecanismos naturales: la unión de extremos no homólogos (NHEJ), que puede generar pequeñas modificaciones, y la recombinación dirigida por homología (HDR), que permite introducir cambios más precisos. Figura creada con BioRender.com.

Es entonces cuando entra en juego la propia biología de la planta. Al activarse sus mecanismos naturales de reparación del ADN, pueden ocurrir dos tipos de “arreglos”. Uno es la unión de extremos no homólogos (NHEJ), una reparación rápida pero poco precisa, que puede “apagar” un gen al introducir pequeños cambios en su secuencia. El otro es la recombinación dirigida por homología (HDR), un proceso mucho más exacto que utiliza un molde para “reescribir” de manera específica una parte del ADN. El resultado son nuevas variedades con rasgos potenciados, logradas con una precisión que hasta hace poco parecía ciencia ficción (Figura 2).

Cultivo *in vitro*: el comienzo de la nueva cebada

Las plantas poseen una capacidad extraordinaria llamada totipotencialidad, que permite que una sola célula regenere un organismo completo. Esta propiedad es el pilar del cultivo *in vitro*, una técnica en la que tejidos vegetales se desarrollan en condiciones controladas de laboratorio, bajo una dieta estricta de nutrientes, temperatura y luz.

En el caso de la cebada, el proceso comienza con fragmentos de tejido —como embriones inmaduros— que dan origen a callos: masas de células con alta capacidad de multiplicación.

Estos callos funcionan como una «pizarra en blanco» biológica, convirtiéndose en el lienzo ideal para la edición genética, ya que a partir de ellos se pueden regenerar plantas completas que ya portan los cambios deseados.

Para guiar este desarrollo, se emplean reguladores de crecimiento. Aunque estas sustancias existen en la naturaleza, en el laboratorio se utilizan versiones sintéticas (como el 2,4-D o el dicamba) que actúan como señales precisas para optimizar el proceso. Así, el cultivo in vitro se consolida como el paso indispensable para que las innovaciones genéticas pasen del diseño a la realidad (Figura 3).

¿Cómo se combinan el cultivo in vitro y el sistema CRISPR/Cas9?

Una vez obtenidos los callos, el siguiente paso es introducir los componentes del sistema CRISPR/Cas9 en sus células. Este proceso, denominado transformación genética, consiste en «entregar» a la célula las instrucciones moleculares necesarias para que el sistema localice y edite el gen objetivo.

En el mundo vegetal, existen dos métodos principales para lograr esta entrega. El primero utiliza a *Agrobacterium tumefaciens*, una

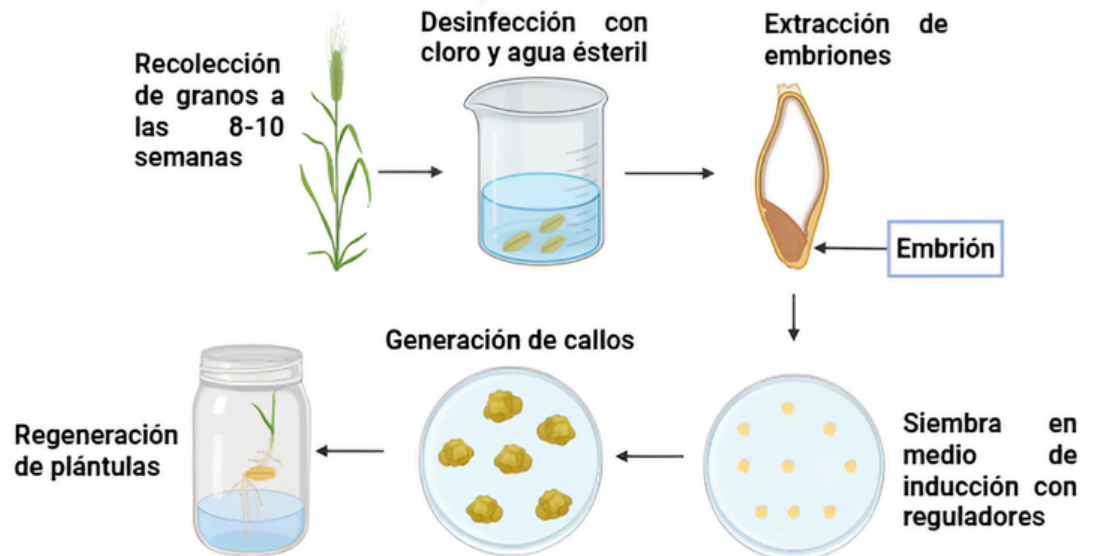


Figura 3. Cultivo in vitro: de una célula a una planta completa. Esquema del proceso que va desde la selección de embriones inmaduros hasta la formación de callos (tejido celular indiferenciado) y la regeneración de plántulas completas en condiciones controladas de laboratorio. Figura creada con BioRender.com.

bacteria del suelo conocida como la «ingeniera genética de la naturaleza» por su capacidad natural de transferir ADN a las plantas. El segundo método, más directo y mecánico, es la biobalística o «pistola de genes». Esta técnica consiste en disparar micropartículas de oro o de tungsteno recubiertas con el material genético hacia los tejidos vegetales. Aunque la biobalística es muy versátil, suele ser más costosa y requiere una calibración meticulosa para asegurar que las células reciban el mensaje sin sufrir daños (Figura 4).

Edición genética en acción: avances en cebada cervecera

Ahora que conocemos cómo funcionan las «tijeras moleculares»,

surge una pregunta natural: ¿qué se ha logrado realmente con el sistema CRISPR/Cas9 en este cultivo? Esta tecnología ya permite modificar genes específicos para obtener plantas con rasgos superiores, lo que impacta tanto en el campo como en la fábrica (Tabla 1).

Uno de los avances más prometedores es la edición del gen HvMlo. Estos están vinculados a la susceptibilidad a enfermedades; al modificarlos, se han obtenido variedades resistentes a *Blumeria graminis*, el hongo responsable del oídio. Este logro no solo protege las cosechas, sino que también permite una producción más sostenible al reducir drásticamente la necesidad de fungicidas químicos.

Pero la innovación no se queda en el campo; también llega a la maltería. Al editar los genes *Hina*, que controlan la dureza del grano, se ha logrado una textura que optimiza el malteado. Esto permite una liberación más eficiente de azúcares y enzimas, mejorando la maceración y, en última instancia, elevando la calidad sensorial de la cerveza que llega a nuestro vaso.

Retos y regulación: Más allá del laboratorio

El uso de herramientas como CRISPR/Cas9 enfrenta retos que van más allá del laboratorio. Aunque esta tecnología permite realizar cambios precisos en el ADN sin necesidad de incorporar genes de otras especies, su aplicación suele evaluarse en marcos regulatorios diseñados décadas antes de la aparición de la edición genética. En muchos casos, los desarrollos obtenidos mediante CRISPR/Cas9 se analizan bajo criterios similares a los de los organismos genéticamente modificados tradicionales, aun cuando algunas de las modificaciones pueden ser comparables a las que ocurren de manera natural o mediante mejoramiento convencional. Actualizar y definir lineamientos específicos para estas nuevas herramientas brindaría la claridad necesaria a investigadores, productores y autoridades. Una regulación moderna facilitaría la transferencia responsable de la ciencia al campo e, indirectamente, a la industria.

Así, países con una fuerte tradición agrícola, y particularmente México, podrían aprovechar la edición genética para fortalecer su soberanía alimentaria y su industria cervecera, manteniendo siempre los más altos estándares de bioseguridad y confianza pública.

El futuro de la cebada y la cerveza

La cerveza es, en esencia, el reflejo del éxito en el cultivo de la cebada. Por ello, cada avance en su mejoramiento genético impacta directamente en la calidad, la sostenibilidad y la competitividad de toda la cadena productiva. Ante la crisis climática, optimizar este cereal no es solo una necesidad técnica; es una estrategia vital para preservar su valor económico y su papel en la seguridad alimentaria global.

Herramientas moleculares como CRISPR/Cas9 abren un panorama prometedor para mejorar, de manera más precisa y eficiente, características agronómicas y tecnológicas. Sin embargo, aún queda camino por recorrer para comprender plenamente sus alcances y garantizar su aplicación responsable. El desarrollo de marcos regulatorios claros y actualizados será fundamental para equilibrar la innovación biotecnológica con la seguridad alimentaria y la protección de la biodiversidad. Si se logra ese

| Tabla 1. Cómo CRISPR/Cas9 está transformando el mejoramiento de la cebada para la agricultura y la cerveza. | | | |
|---|---|---|-----------------------------|
| Gen estudiado | ¿Qué cambia en la planta? | ¿Para qué sirve? | Literatura recomendada |
| <i>HvLOXs</i> | Mayor estabilidad del grano durante almacenamiento | Mayor eficiencia para la industria cervecera | Zeng et al., 2025 |
| <i>HvMlo</i> | Mayor resistencia al hongo <i>Blumeria graminis</i> | Reduce pérdidas por enfermedad y disminuye el uso de fungicidas | Koide et al., 2023 |
| <i>HvGA3ox1</i> | Plantas más bajas y resistentes al acame | Mejor adaptación a sequía y al cambio climático | Cheng et al., 2023 |
| <i>HvHina</i> | Cambios en la dureza del grano | Optimiza el proceso de malteado y la calidad sensorial | Jiang et al., 2022 |
| <i>HvCsIF6</i> | Menor contenido de β -glucanos | Mejora la filtración del mosto y la calidad de la cerveza | García-Giménez et al., 2020 |
| <i>HvHordeínas</i> | Disminuyen proteínas similares al gluten | Cebada con menor contenido de gluten | Sánchez-León et al., 2018 |

equilibrio, estas herramientas podrán contribuir de manera responsable al futuro del campo... y también al de la cerveza.

Referencias

- Cheng, J., Hill, C., Han, Y., He, T., Ye, X., Shabala, S., Guo, G., Zhou, M., Wang, K., & Li, C. (2023). New semi-dwarfing alleles with increased coleoptile length by gene editing of gibberellin 3-oxidase 1 using CRISPR-Cas9 in barley (*Hordeum vulgare* L.). *Plant Biotechnology Journal*, 21(4), 806-818. <https://doi.org/10.1111/pbi.13998>
- García-Giménez, G., Barakate, A., Smith, P., Stephens, J., Khor, S. F., Doblin, M. S., Hao, P., Bacic, A., Fincher, G. B., Burton, R. A., Waugh, R., Tucker, M. R., & Houston, K. (2020). Targeted mutation of barley (1,3;1,4)- β -glucan synthases reveals complex relationships between the storage and cell wall polysaccharide content. *The Plant Journal*, 104(4), 1009-1022. <https://doi.org/10.1111/tpj.14977>
- Jiang, Y., Li, J., Liu, B., Cao, D., Zong, Y., Chang, Y., & Li, Y. (2022). Novel Hina alleles created by genome editing increase grain hardness and reduce grain width in barley. *Transgenic Research*, 31(6), 637-645. <https://doi.org/10.1007/s11248-022-00324-8>
- Koide, H., Hisano, H., & Yaeno, T. (2023). CRISPR/Cas9-based generation of mlo mutants for allelic complementation experiments to elucidate MLO function in barley. *Journal Of General Plant Pathology*, 89(3), 153-158. <https://doi.org/10.1007/s10327-023-01120-w>
- Sánchez-León, S., Gil-Humanes, J., Ozuna, C. V., Giménez, M. J., Sousa, C., Voytas, D. F., & Barro, F. (2017). Low-gluten, nontransgenic wheat engineered with CRISPR/Cas9. *Plant Biotechnology Journal*, 16(4), 902-910. <https://doi.org/10.1111/pbi.12837>
- Zeng, Z., Wang, H., Luo, Y., Chen, W., Xu, M., Wei, H., Chen, Z., Xiang, T., Wang, L., Han, N., Huang, X., & Bian, H. (2025). CRISPR/Cas9-mediated editing of barley lipoxygenase genes promotes grain fatty acid accumulation and storability. *GM Crops & Food*, 16(1), 482-497. <https://doi.org/10.1080/21645698.2025.2523069>

Sobre los autores:



Maximiliano Pedraza Mejía es estudiante de la Maestría en Innovación Biotecnológica del CIATEJ. Su trabajo perfecciona el uso de «tijeras moleculares» en variedades mexicanas de cebada, combinando el cultivo in vitro con marcadores visuales para asegurar ediciones genéticas precisas y exitosas.



Myriam Guadalupe Rodríguez Gandarilla es investigadora posdoctoral de la Secihti en la Unidad de Biotecnología Vegetal del CIATEJ. Su trabajo transforma los virus de plantas en herramientas biotecnológicas para fortalecer la resistencia de los cereales frente a los desafíos de la sequía.



Julio Armando Massange Sánchez es investigador titular en la Unidad de Biotecnología Vegetal del CIATEJ. Su trabajo se centra en desarrollar variedades de cebada y arroz más resistentes al cambio climático, mediante herramientas como el cultivo in vitro y las tijeras moleculares CRISPR/Cas9, que permiten modificar genes con gran precisión.

Cita: Pedraza Mejía, M., Rodríguez Gandarilla, M. G., & Massange Sánchez, J. A. (2026). Genética de precisión: El futuro de la cebada y la cerveza. *Biotecnológica Magazine*, 4(2), 16-21. <https://doi.org/10.5281/zenodo.20148008>



Origami de ADN: ciencia doblada en creatividad y función

Dra. Norma Y. Hernández Saavedra

Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste, S.C.

Foto: shironanakajusinau

Tema

El origami de ADN es una técnica innovadora en el ámbito de la biotecnología que permite diseñar y construir estructuras tridimensionales de ADN a escala nanométrica. Esta técnica se basa en la capacidad del ADN para formar enlaces específicos, aprovechando su conocida estructura de doble hélice, lo que permite la creación de formas complejas y personalizadas con aplicación en los campos de medicina, tecnología e investigación científica.

1. Introducción

El origami de ADN es una nanotecnología innovadora en el ámbito de la biotecnología que permite diseñar y construir estructuras tridimensionales de ácido desoxirribonucleico (ADN) que utiliza combinaciones programadas de oligonucleótidos complementarios cortos para plegar una gran cadena única de ADN en formas precisas en dos y tres dimensiones (2D y 3D, respectivamente). Este método se

basa en la capacidad del ADN para formar enlaces específicos, complementarios (Fig. 1, T=A y G=C), aprovechando su conocida estructura de doble hélice, lo que permite la creación de formas complejas y personalizadas.

Como sabemos, el ADN (ácido desoxirribonucleico) es la molécula que contiene la información genética necesaria para el desarrollo, funcionamiento y reproducción de todos los seres vivos. Como se muestra en la figura 1, esta molécula está formada por unidades llamadas nucleótidos (Fig. 1-1 a 1-4). Cada nucleótido tiene un grupo fosfato (indicado en la Fig. 1 con una P en círculos anaranjados), un azúcar (desoxirribosa, indicado en la Fig. 1 con pentágonos violeta) y una de cuatro bases nitrogenadas: 1) adenina (A), 2) timina (T), 3) citosina (C) y 4) guanina (G) (Martínez-Frías, 2010). Esta molécula que tiene forma similar a una escalera de caracol (doble hélice), actúa como un manual de instrucciones o “plano biológico” para construir proteínas y otros componentes de las células (NIH, 2026; Fig. 1).

2. Nanotecnología de Origami de ADN

A nivel científico, el origami de ADN es una técnica creada en 2006 en la que se utiliza una hebra larga de ADN como "andamio" y cientos de hebras cortas como "grapas" que se unen mediante pares de bases complementarios para autoensamblar nanoestructuras en 2D y 3D (Rothmund, 2006). El exquisito control de forma (a nanoescala) de este material inherentemente biocompatible (Fig. 2), se combina con la capacidad de abordar espacialmente las estructuras de origami con diversas cargas, como: fármacos, anticuerpos, secuencias de ácidos nucleicos, moléculas pequeñas y partículas inorgánicas. Esta flexibilidad programable permite la fabricación de dispositivos nanométricos precisos, que ya han demostrado un gran potencial para aplicaciones biomédicas como la administración de fármacos, la biodetección (método tecnológico diseñado para identificar y cuantificar sustancias mediante el uso de componentes de origen biotecnológico) y la formación de nanoporos sintéticos (canales a escala nanométrica incorporados artificialmente en membranas de materiales inorgánicos). A diferencia de los nanoporos biológicos, no dependen de proteínas naturales, lo que los hace mucho más resistentes y versátiles para la ingeniería (Kearney et al., 2016).

2.1 ¿Cómo se fabrica el origami de ADN?

El origami de ADN se basa en el plegado de una larga cadena de ADN monocatenaria o andamiaje, en una forma prediseñada utilizando cientos de hebras individuales de ADN más pequeñas llamadas grapas. Cada grapa tiene múltiples sitios de unión capaces de unir las partes más distantes de la hebra del andamiaje mediante apareamiento de bases cruzado. Un origami de ADN plano, típico, puede contener hasta 200 hebras de grapas. Las estructuras planas se pueden ensamblar en estructuras tridimensionales más complejas. El

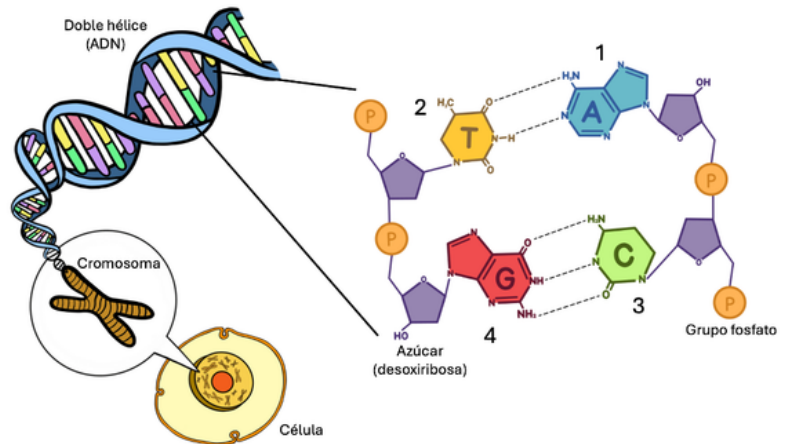


Figura 1. La imagen ilustra la estructura jerárquica del material genético, desde la célula y el núcleo hasta las bases nitrogenadas que forman el ADN. En el ADN, las bases específicas se emparejan mediante enlaces de hidrógeno: adenina (A) con timina (T) y citosina (C) con guanina (G). Cada nucleótido, el componente básico del ADN, consta de un grupo fosfato (P), un azúcar (desoxirribosa) y una base nitrogenada, que en conjunto forman la estructura de doble hélice de la molécula de ADN (Canva).

autoensamblaje en un solo paso se utiliza para construir origami de ADN, donde se añade un exceso de grapas a una mezcla de reacción con el andamiaje. Las estructuras de origami de ADN se diseñan computacionalmente con la ayuda de software de diseño (Fig. 3).

El proceso, consta básicamente de tres pasos: 1) La selección y/o diseño de la secuencia de ADN. Se elige una hebra larga de ADN que actuará como el "andamiaje" para la estructura diseñada. Esta hebra larga es fundamental, ya que determinará la forma básica de la estructura final. 2) El diseño de las secuencias cortas. Se diseñan cuidadosamente secuencias cortas de ADN que se unirán a la hebra en

lugares específicos. Estas secuencias actúan como "grapas" moleculares, doblando y asegurando la hebra larga en la forma tridimensional deseada. 3) Ensamblaje. Al mezclar la hebra larga con las secuencias cortas en condiciones controladas, el ADN se autoensambla de manera natural en la estructura tridimensional planeada, gracias a la complementariedad de las bases nucleotídicas (Fig. 3). Finalmente, se llevan dos pasos de verificación, el de primera línea es la electroforesis en gel o mediante espectroscopía (Fig. 4A), mientras que la segunda es la caracterización mediante microscopía electrónica (Fig. 4B).

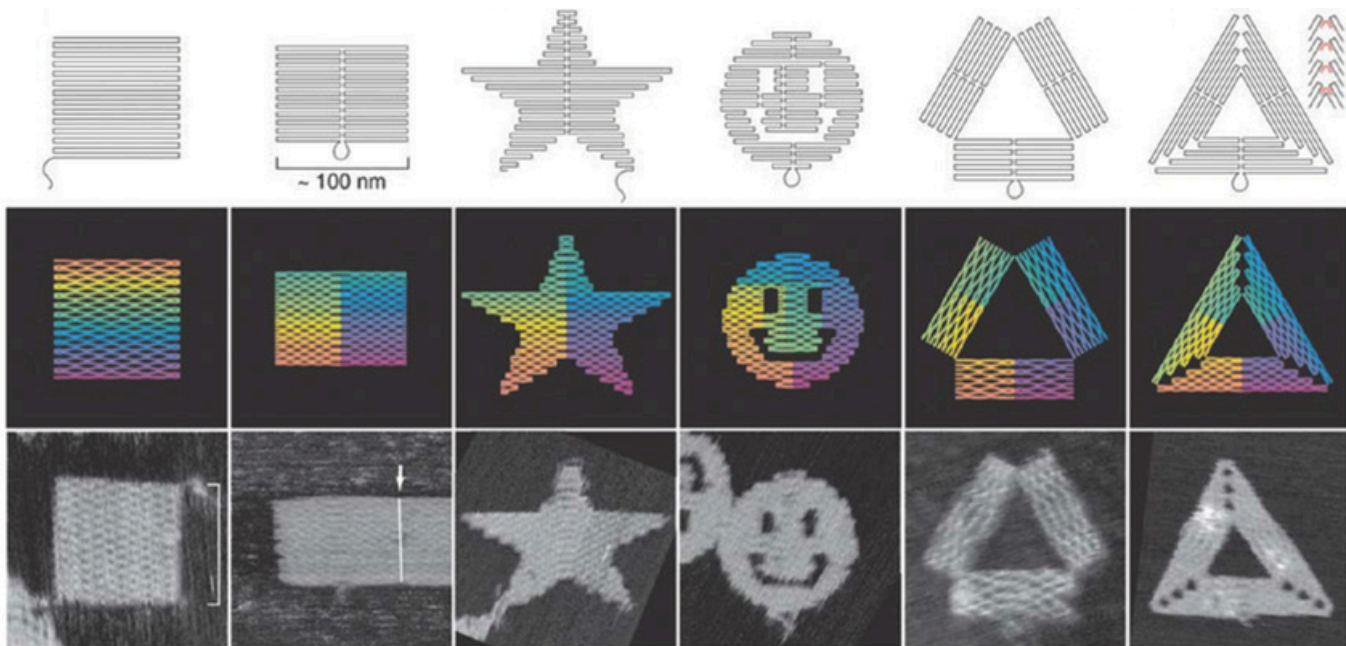


Figura 2. Ejemplos de estructuras en 2D de origami de ADN. Fila superior (dibujo), rutas de plegado. De izquierda a derecha: cuadrado, rectángulo, estrella, disco con tres agujeros, triángulo con dominios rectangulares y triángulo agudo con dominios trapezoidales y puentes entre ellos. Segunda fila: diagramas que muestran la curvatura de las hélices en los cruces (donde las hélices se tocan) y lejos de ellos (donde las hélices se separan). El color indica el índice del par de bases a lo largo de la trayectoria de plegamiento; el rojo corresponde a la primera base y el morado a la número 7000. Tercera fila: imágenes de las estructuras sintetizadas, documentadas mediante Microscopía de Fuerza atómica (AFM, por sus siglas en Inglés) (Modificado de Rothmund, 2006).

3. ¿Para qué sirven los origamis de ADN?

El ADN actúa como portador fundamental de información genética, y sus propiedades únicas le permiten usarse como un componente estructural versátil para la ingeniería y el autoensamblaje de nanoestructuras. La fabricación de plantillas de ADN ha mejorado significativamente las nanoestructuras de ADN autoensambladas, y este progreso es muy evidente en el campo de la nanotecnología del ADN, especialmente en el origami de ADN, que es altamente efectivo para la síntesis ascendente de nanoestructuras definidas con precisión, cuyo tamaño varía desde decenas de nanómetros hasta submicrómetros. Las notables capacidades del origami de ADN abren numerosas posibilidades en el contexto de las aplicaciones biotecnológicas y tecnológicas (Tabla 1). En la literatura se han sugerido muchas aplicaciones potenciales, incluidos la

inmovilización de enzimas, los sistemas de administración de fármacos y el autoensamblaje nanotecnológico de materiales, etc. Aunque el ADN no es la elección natural para construir estructuras activas para aplicaciones nanorrobóticas, debido a su falta de versatilidad estructural y catalítica, ofrece excelentes andamiajes para el autoensamblaje dirigido de materiales a escala nanométrica, desde nanopartículas hasta proteínas, con posibles aplicaciones en la construcción de dispositivos nanoelectrónicos/nanofotónicos y nanoarreglos de proteínas/ligandos (Lin et al., 2006).

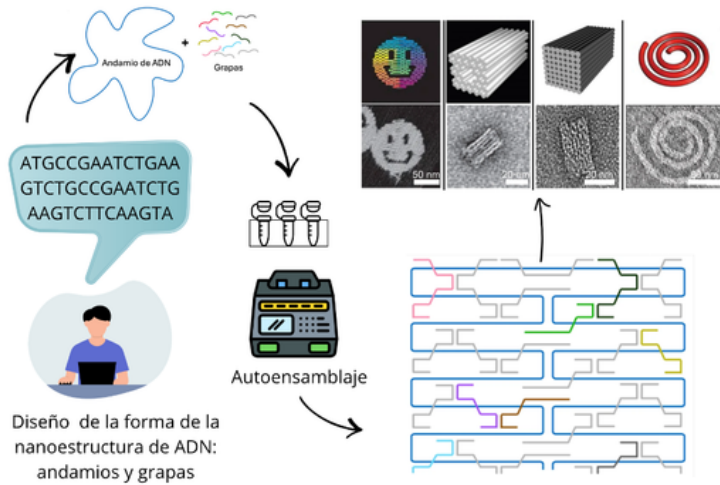


Figura 3. Esquema del proceso de fabricación del origami de ADN. Diseño, síntesis de precursores y autoensamblaje. Un ADN de andamiaje monocatenario largo (azul) está plegado por un conjunto de grapas cortas (coloreadas) en una forma prescrita. En la parte superior derecha se muestran ejemplos de origami de ADN reales (línea superior, diseño; línea inferior microfotografías de vitas de micrografía electrónica de transmisión (Kearney et al., 2016; Zhou et al., 2023)).

4. Áreas de aplicación del modelo origami de ADN

El origami de ADN tiene un vasto potencial aplicación en varias áreas, entre las que se pueden mencionar (Fig. 5):

1. **Investigación científica:** Desarrollo de modelos detallados para estudiar interacciones moleculares complejas y comprender mejor los mecanismos biológicos.
2. **Tecnología:** Fabricación de circuitos y dispositivos electrónicos a escala nanométrica, abriendo nuevas posibilidades en el diseño de componentes electrónicos.
3. **Medicina:** Creación de nanorobots capaces de transportar medicamentos directamente a células específicas, aumentando la eficiencia y reduciendo efectos secundarios.
4. **Diseño:** Los científicos utilizan software especializado como Cadnano para programar cómo deben plegarse las hebras a escala molecular.

Las ventajas del uso de la tecnología del origami de ADN son principalmente su:

1. **Precisión:** Permite un control extremadamente preciso sobre la forma y el tamaño de las estructuras, lo que es crucial para aplicaciones delicadas.
2. **Escalabilidad:** Ofrece la posibilidad de diseñar desde estructuras relativamente simples hasta las más complejas, adaptándose a las necesidades del proyecto.
3. **Versatilidad:** Es adaptable a una amplia gama de aplicaciones, gracias a su capacidad para formar una diversidad de estructuras.

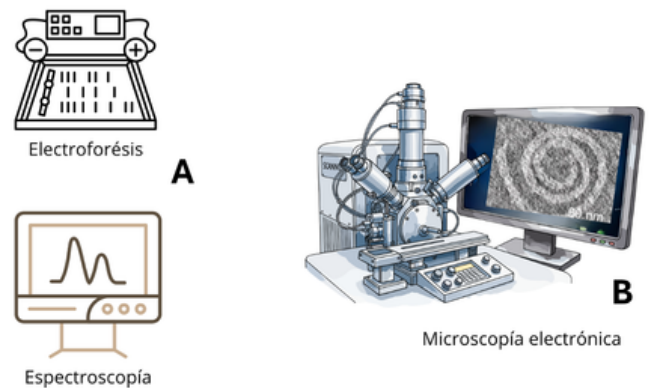


Figura 4. Métodos de verificación en la fabricación de origami de ADN (Canva).

Tabla 1. Funciones de nanomateriales basados en origami de ADN (elaborado a partir de Zhan et al., 2023).

| Nanomateriales basados en ADN Origami | | Función |
|--|---|--|
| Nanomateriales inorgánicos | Sílice y compuestos | Aumentar la estabilidad estructural y funcional de nanoestructuras diseñadas a medida, permitiéndoles sobrevivir en entornos biológicos hostiles (como dentro del cuerpo humano) y facilitando su uso en aplicaciones avanzadas de nanotecnología. |
| | Fosfato de calcio y nanotubos de carbono | Diseñados para maximizar la eficacia terapéutica, proteger el material genético de carga y permitir una liberación controlada en el lugar de la enfermedad. |
| | Nanocúmulos metálicos, semiconductores y magnéticos | Construir nanomáquinas y sensores inteligentes que aprovechan la capacidad de reconocimiento biológico del ADN y la funcionalidad inorgánica de los metales/semiconductores. |
| Nanomateriales biológicamente relevantes | Polímeros | Diseñar herramientas personalizadas que pueden navegar por el entorno biológico, interactuar con células de manera programada y liberar carga útil de forma controlada. |
| | Enzimas | "Andamio" o "caja" programable que permite controlar la posición, orientación y actividad de las enzimas en escalas nanométricas para aplicaciones en bioingeniería, medicina y ciencia de materiales. |
| | Proteínas y otras biomoléculas | Herramientas de ingeniería para interactuar con el entorno celular, diagnosticar enfermedades y entregar terapias de manera dirigida y eficiente. |
| Membranas nanoingenierizadas con origami de ADN | Autoensamblaje guiado de membranas | Ingeniería de superficies celulares, administración dirigida de fármacos y creación de biomateriales sintéticos funcionales. Esta técnica permite organizar nanoestructuras de ADN sobre bicapas lipídicas (membranas) para interactuar con células de manera precisa. |
| | Manipulación de membranas preexistentes | |
| | Nanoporos de ADN | |
| Nanofotónica basada en origami de ADN | Nanopartículas metálicas | Para construir "nanoestructuras funcionales" con precisión atómica, sirviendo como andamios programables para posicionar componentes (nanopartículas, colorantes) a escala nanométrica |
| | Funcionalización anisotrópica específica de sitio | |
| | Superestructuras y nanoestructuras plasmónicas | |
| Emisores Cuánticos | Control de distancia a nanoescala por ADN Origami | El origami de ADN actúa como una "placa de pruebas" (breadboard) molecular que coloca emisores en hotspots (puntos calientes) con precisión atómica, algo inalcanzable con métodos de nanofabricación tradicionales. |
| | Control de Orientación por ADN Origami | |
| Fluorescencia de Emisores Individuales Mejorada por Plasmón | "Plataforma estructural" para organizar emisores y metales, superando los límites de la microscopía óptica convencional para estudiar la vida a nivel molecular. | |
| Espectroscopía Raman de Superficie de Molécula Individual Mejorada | "Nanoantena" o "caja de herramientas" que organiza nanopartículas metálicas (oro o plata) con precisión extrema, creando "puntos calientes" (hotspots) donde las señales Raman de las moléculas se amplifican hasta cien mil millones de veces. | |

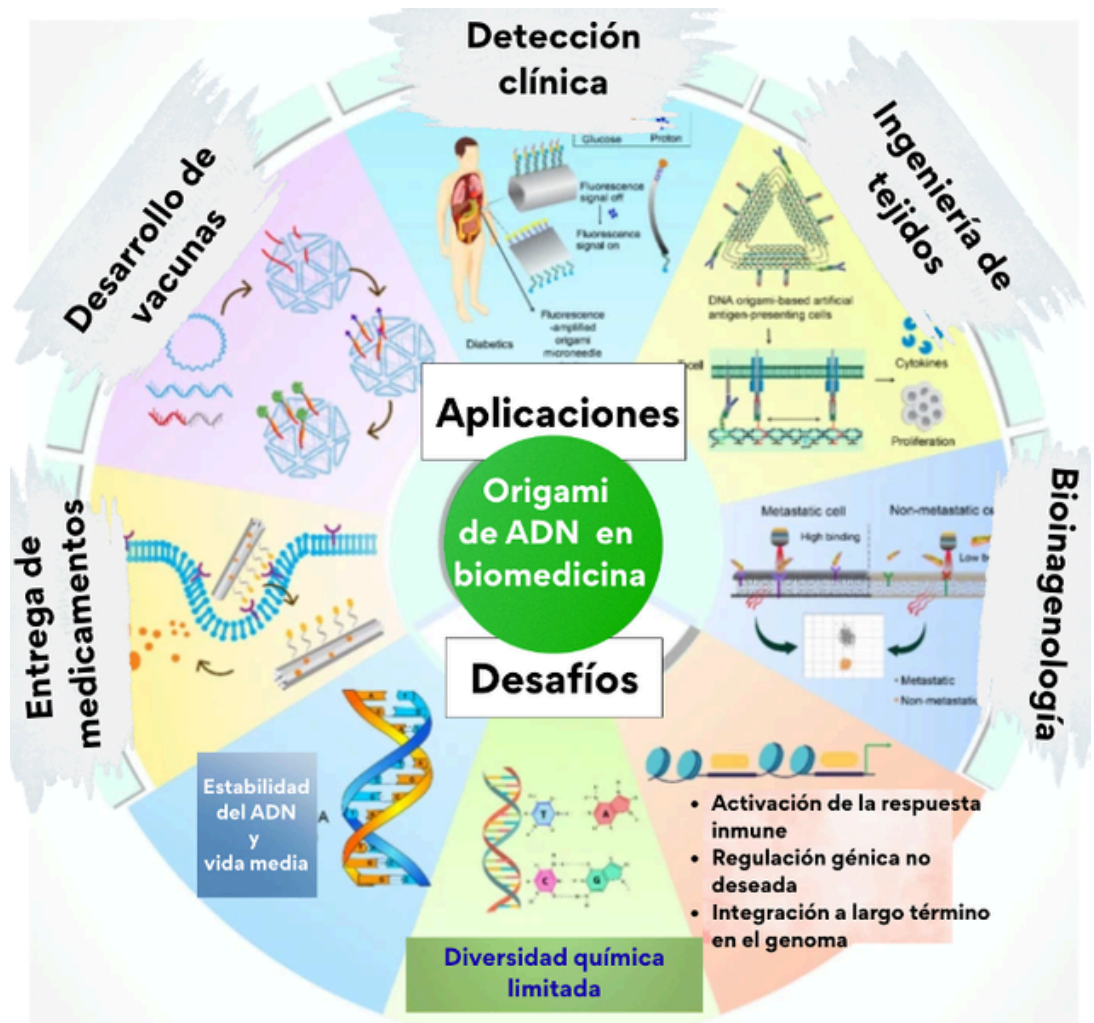


Figura 5. Ejemplos de aplicaciones del origami de ADN en biomedicina (Modificado de Chen et al., 2025).

5. Usos específicos y potenciales de los origamis de ADN

En un amplio panorama, el origami de ADN representa un avance significativo en nuestra capacidad para manipular la materia a nivel molecular, proporcionando nuevas soluciones a retos en biotecnología, medicina y más allá. Esta técnica abre puertas a innovaciones que podrían transformar múltiples campos de la ciencia y la tecnología. Prueba de ello se muestra en la Tabla 2, en la que se citan desde las aplicaciones más básicas, hasta las más avanzadas, siendo un recurso potencial que parece estar subexplotado.

Tabla 2. Usos de la tecnología del origami de ADN (elaborado a partir de Wang et al., 2017(1), Wu et al., 2024(2); Fang et al., 2023(3); He et al., 2023(4); Cho et al., 2022(5); Glembockyte et al., 2021(6); Mostafa et al., 2023(7).

| Usos del origami de ADN | Descripción | Ref. |
|--|--|------------|
| Andamiaje para Enzimas | Para organizar enzimas artificiales, mejorando su eficiencia en cascadas bioquímicas. | 1 |
| Nanoelectrónica y Materiales Funcionales | Para la construcción de microchips más pequeños utilizando grafeno u otros materiales, así como la fabricación de nanoalambres metálicos. | 1 |
| Fabricación de Nanoestructuras Inorgánicas | Para crear "nanomoldes" para dirigir el crecimiento de metales (como oro o plata) o minerales (como la sílice) en formas específicas, permitiendo la síntesis de nanoestructuras no metálicas prediseñadas. | 1 |
| Biosensores Nanométricos | Para la detección precisa de biomoléculas, enzimas, virus, microARN y otras sustancias en entornos biológicos, mejorando la sensibilidad del diagnóstico. | 2 |
| Desarrollo de Vacunas | Para mejorar el diseño de vacunas recombinantes mediante la estructuración precisa de antígenos | 2 |
| Nanomedicina e Inmunoterapia | Para la interacción con el sistema inmunológico, manipulación de membranas lipídicas y regulación de procesos bioquímicos. | 2 |
| Nanorrobótica y Estudios de Biología Molecular | Para la construcción de nanorobots capaces de realizar tareas médicas específicas, como la activación de receptores celulares. | 2 |
| Ensamblaje de Nanoestructuras | Permiten la disposición precisa de materiales con resolución menor a 10 nanómetros, son útiles para la creación de poliedros de alambre o estructuras 3D complejas | 3 |
| Ingeniería de Superficies Celulares | Para hacer funcional la superficie de células, facilitando el estudio y control de su comportamiento, así como en la creación de células sintéticas. | 3 |
| Sensores Biomoleculares y Diagnóstico | Para el desarrollo de biosensores y en la detección de enfermedades, permitiendo la monitorización en tiempo real de la dinámica microambiental de la membrana celular. Elaboración de sensores con límites de detección ultra bajos para identificar moléculas, incluyendo virus o biomarcadores de enfermedades al concentrar la luz en volúmenes extremadamente pequeños. | 3, 4, 5, 7 |
| Administración de Fármacos (Drug Delivery): | Para transportar medicamentos directamente a células diana (especialmente en tratamientos contra el cáncer), mejorando la precisión y reduciendo la toxicidad dada su biocompatibilidad y capacidad de diseño. | 3, 4 |
| Nanoporos Artificiales y Transporte Molecular | Para construir nanoporos sintéticos (canales) que cruzan bicapas lipídicas, lo que permite el transporte controlado de iones y moléculas, simulando proteínas de membrana naturales. | 3 |

Tabla 2. Usos de la tecnología del origami de ADN (elaborado a partir de Wang et al., 2017(1), Wu et al., 2024(2); Fang et al., 2023(3); He et al., 2023(4); Cho et al., 2022(5); Glembockyte et al., 2021(6); Mostafa et al., 2023(7). Continuación...

| | | |
|---|---|---|
| Computación Molecular | Cómo estructuras de ADN para almacenamiento de datos y procesamiento de información a nivel molecular. | 4 |
| Biofísica y Ciencias de los Materiales | Para la construcción de citoesqueletos sintético y estudios de interacción proteína-ADN. | 4 |
| Nanofotónica y Plasmonica | Para la creación de nanoantenas ópticas ultrapequeñas para dirigir la emisión de luz de una sola molécula en una dirección específica. | 5 |
| Dispositivos Optoelectrónicos | Para mejorar el diseño de diodos orgánicos emisores de luz (OLEDs) y fuentes de fotón único mediante el posicionamiento preciso de moléculas. | 5 |
| Bioimagen y Medicina | Para el desarrollo de marcadores fluorescentes precisos para investigación biológica y técnicas avanzadas de diagnóstico de enfermedades. | 5 |
| Investigación fundamental | Para estudiar fenómenos cuánticos al colocar emisores dentro de nanocavidades plasmónicas (efecto Purcell). | 5 |
| Detección de Moléculas Individuales | Para detectar concentraciones bajísimas de biomoléculas (ARN, ADN, proteínas) al intensificar la señal fluorescente de un solo marcador (Single-Molecule Sensing). | 6 |
| Nanoscopía y Bioimagen Avanzada | Para visualizar estructuras biológicas con una resolución espacial y temporal mucho mayor que los métodos de microscopía convencionales, superando los límites de difracción de la luz. | 6 |
| Nanoantenas de ADN (DNA Nanoantennas) | Para aumentar la fotoestabilidad de los fluoróforos (evitando que se "apaguen" rápido o sufran fotoblanqueo) y mejorar la intensidad de la señal (hasta más de 1600 veces en algunos casos) | 6 |
| Biofísica de molécula única | Ayuda a estudiar procesos biológicos rápidos, como el plegamiento de proteínas o interacciones moleculares, gracias a la alta resolución temporal que proporciona. | 6 |
| Diagnóstico "Point-of-Care" (en el lugar de atención) | Para inmovilizar emisores de luz en "hotspots" (puntos calientes) plasmónicos diseñados a medida permite el desarrollo de pruebas diagnósticas rápidas y portátiles. | 6 |
| Creación de Nanoantenas de Alta Precisión (DONA) | Para posicionar nanopartículas metálicas a distancias muy pequeñas (1-2 nm), lo que es crucial para maximizar el efecto SERS, superando la aleatoriedad de las técnicas tradicionales. | 7 |
| Detección de Moléculas Individuales (Single-Molecule SERS): | Para colocar una sola molécula analito en el centro de un hotspot (espacio interparticular) para analizar su huella dactilar vibracional única. | 7 |
| Caracterización de Biomoléculas | Para estudiar proteínas (como citocromo c, peroxidasa de rábano) y otras moléculas a nivel de una sola unidad. | 7 |
| Detección de Contaminantes o Analitos Específicos | Para medir trazas de sustancias, por ejemplo, dietilestilbestrol (DES) en alimentos, utilizando aptámeros (ADN corto) funcionales en la estructura de origami. | 7 |
| Estudios Estructurales y Físicoquímicos | Para explorar fenómenos espectroscópicos sutiles, como la sustitución isotópica y el ensanchamiento homogéneo de los picos Raman en moléculas individuales. | 7 |

Sin, embargo, a pesar de la disponibilidad de diversas herramientas para diseñar y ensamblar estructuras de origami de ADN, aún hay importantes desafíos para su aplicación práctica generalizada fuera del ámbito académico. Entre los problemas clave podemos mencionar (Chen et al., 2025; Zhou et al., 2023):

- El largo tiempo de los procesos de fabricación.
- El alto costo de las grapas de oligonucleótidos.
- La estabilidad de las nanoestructuras de ADN en condiciones fisiológicas debido a su dependencia de los iones Mg_2 .
- Diversidad química limitada a pesar de su alta programabilidad. Actualmente, métodos como la amplificación por PCR son los más avanzados para la producción rentable de andamios y grapas, mientras que enfoques como la producción de fagos genéticamente modificados son prometedores para la síntesis a gran escala.
- Otros aspectos muy relevantes como lo son: provocar una respuesta inmune y/o una regulación génica no deseada, así como la posibilidad de su integración (a largo plazo) en el genoma.

6. Conclusiones

Para utilizar eficazmente las estructuras de origami de ADN en la administración clínica de fármacos, es crucial profundizar en la comprensión de su farmacocinética y farmacodinámica en organismos vivos, garantizando así su seguridad y eficacia. Abordar los posibles efectos adversos, como la respuesta inmunitaria y la interferencia con la regulación génica endógena, sigue siendo un reto importante en este campo. Estrategias como las modificaciones químicas de las cadenas de ADN pueden ayudar a mejorar la biocompatibilidad y reducir los riesgos, allanando el camino para aplicaciones terapéuticas más seguras.

A medida que los esfuerzos se orientan hacia la comercialización, se exploran estrategias como la combinación de la reprogramación de andamios con la recuperación de grapas para prolongar la vida útil, eficientar los costosos reactivos de ADN y minimizar los residuos. Además, se podría mejorar la eficiencia y la rentabilidad de la fabricación al mejorar los métodos de producción y recuperación de grapas, especialmente para aquellos con modificaciones costosas, de forma que se acelere la transición de las tecnologías del origami de ADN a aplicaciones prácticas en el mundo real.



La investigación futura deber centrarse en abordar estos problemas de fabricación y estabilidad, explorar la funcionalidad para la administración dirigida y desarrollar sistemas de liberación controlada, todo ello mientras se superan los obstáculos regulatorios para facilitar su aplicación en clínica y un uso biotecnológico más amplio.

La investigación futura debe centrarse en superar estos desafíos de fabricación y estabilidad, desarrollar funciones de entrega dirigidas y sistemas de liberación controlada, y afrontar los obstáculos regulatorios para facilitar aplicaciones clínicas y biotecnológicas más amplias.

7. Referencias

- Chen, R., Jia, X., Pang, W. *et al.* (2025). Applications of DNA origami in biomedicine: advances, challenges, and prospects. *Adv Compos Hybrid Mater* **8**, 375. <https://doi.org/10.1007/s42114-025-01457-0>.
- Cho, Y.D., Park, S.H.H., Huh, J-H. *et al.* (2022). DNA as grabbers and steerers of quantum emitters. *Nanophotonics*, **12** (3). <https://www.degruyterbrill.com/document/doi/10.1515/nanoph-2022-0602/html>.
- Fang Y, Chen X, Qi Q, Lin M, Liang Q. (2026). DNA Origami and Its Applications in Synthetic Biology. *Adv Sci (Weinh)* **13**(2):e13357. <https://doi.org/10.1002/advs.202513357>.
- Glembocyste V., Grabenhorst L., Trofymchuk K., Tinnefeld K. (2021). DNA Origami Nanoantennas for Fluorescence Enhancement. *Acc. Chem. Res.* **54**, 17, 3338–3348. <https://doi.org/10.1021/acs.accounts.1c00307>.
- He Z, Shi K, Li J, Chao J. (2023). Self-assembly of DNA origami for nanofabrication, biosensing, drug delivery, and computational storage. *iScience*. **26**(5):106638. <https://doi.org/10.1016/j.isci.2023.106638>.
- Kearney C.J., Lucas C.R., O'Brien F.J., Castro C.E. (2016). DNA Origami: Folded DNA-Nanodevices That Can Direct and Interpret Cell Behavior. *Adv Mater.* **28**(27):5509-24. <https://doi.org/10.1002/adma.201504733>.
- Lin C, Liu Y, Rinker S, Yan H. (2006). DNA tile based self-assembly: building complex nanoarchitectures. *Chem. Phys Chem.* **11**;7(8):1641-7. <https://doi.org/10.1002/cphc.200600260>.
- Martínez-Frías M.L. (2010). Estructura y función del ADN y de los genes. I Tipos de alteraciones de la función del gen por mutaciones. *Medicina de Familia. SEMERGEN*, **35**(5):273-277. Doi: [10.1016/j.semerg.2009.12.014](https://doi.org/10.1016/j.semerg.2009.12.014).
- Morneau, M., Whitham, S. (2021). DNA origami. *Nat Rev Methods Primers* **1**,12. <https://doi.org/10.1038/s43586-021-00013-6> (infografía).
- Mostafa A, Kanehira Y, Dutta A, Kogikoski S Jr, Bald I. (2023). Single-Molecule Surface-Enhanced Raman Scattering Measurements Enabled by Plasmonic DNA Origami Nanoantennas. *J Vis ExpJul* **21**;(197). doi: [10.3791/65310](https://doi.org/10.3791/65310).
- NIH. 2026. Acidos nucleicos. *National Human Genome Research Institute*. Consultado 06/04/2026.
- Rothmund, P. (2006). Folding DNA to create nanoscale shapes and patterns. *Nature* **440**, 297–302. <https://doi.org/10.1038/nature04586>.
- Wang P., Meyer T.A., Pan V., Dutta P.K., Ke Y. (2017). The Beauty and Utility of DNA Origami. *Chem*, **2**(3):359-382. <https://doi.org/10.1016/j.chempr.2017.02.009>.
- Wu Y, Wu X, Tian R, Wang Y, Ding B, Jiang Q. (2024). Precise construction of DNA origami-based materials for functional regulation on biological interface. *Smart Mol.*, **2**(1):e20230032. <https://doi.org/10.1002/smo.20230032>.
- Zhan P., Peil A., Jiang Q., et al. (2023). Recent Advances in DNA Origami-Engineered Nanomaterials and Applications. *Chemical Reviews*. **123** (7):3976-4050. <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acs.chemrev.3c00028?ref=pdf>
- Zhou, Y., Dong, J., Wang, Q. (2023). Fabricating higher-order functional DNA origami structures to reveal biological processes at multiple scales. *NPG Asia Mater* **15**, 25. <https://doi.org/10.1038/s41427-023-00470-3>.

Cita:

Hernández Saavedra, N. Y. (2026). Origami de ADN: ciencia doblada en creatividad y función. *Biotecnológica Magazine*, **4**(2), 20–31. <https://doi.org/10.5281/zenodo.20146632>



El Kéfir de leche: consorcio microbiano y salud

Macario Savin Amador*

Universidad Tecnológica de La Paz, SN, La Paz Baja California Sur.

*Correspondencia: msavin@utlp.edu.mx

Foto: Axel Makhalov

1. Introducción

La palabra kéfir procede del turco keif o keyif, ese término se usaba para describir la “agradable sensación” o el “sentirse bien” que uno experimenta después de consumirlo (MK et al., 2026). En la etimología se vincula al placer o bienestar asociado a beber este fermentado; por eso algunos textos en inglés aclaran que su nombre deriva de la palabra turca que significa “sentirse bien después de comer” (Justel et al., 2025). El kéfir de leche es una bebida acidificada, cremosa, viscosa y ligeramente burbujeante que se origina cuando un consorcio de microorganismos, bacterias ácido lácticas, bacterias acéticas y levaduras que transforma la leche en una bebida viva y nutritiva (Bazán et al., 2024). Más allá de su sabor ácido y cremoso, el kéfir es un ejemplo natural de biotecnología: durante la fermentación, sus habitantes cooperan para producir compuestos beneficiosos que mejoran la digestibilidad de la leche y aportan nuevas propiedades (Ströher et al., 2025).

2. Un universo en un grano de kéfir

Los granos de kéfir son pequeñas matrices de proteínas y polisacáridos en las que los microorganismos encuentran refugio. Al desecarse, los granos contienen aproximadamente 57 % de kefirano (un polisacárido responsable de la textura viscosa), 33 % de proteínas, 4 % de grasa y 6 % de cenizas. Cuando estos granos entran en contacto con la leche, se reactivan y fermentan el sustrato, reduciendo la lactosa y generando una bebida con bajas concentraciones de etanol y ácidos orgánicos (Bazán et al., 2024). Este proceso da como resultado recuentos de bacterias y levaduras superiores a 10⁶ UFC/mL y un sabor ligeramente ácido y afrutado.

3. ¿Quiénes forman la comunidad del kéfir?

3.1 Bacterias: las primeras en actuar

Las bacterias ácido lácticas constituyen entre el 60 % y el 80 % de la microbiota del kéfir (Kurniawan, Milanda y Kusuma, 2025).

Dos especies dominan este grupo: *Lactobacillus kefiranofaciens* y *Lactobacillus kefir*, conocidas por su capacidad para producir kefirano (es el principal polisacárido que da estructura a los granos de kéfir) y acidificar la leche, llamadas bacterias ácido lácticas (BAL). Les acompañan *Lactococcus lactis*, *Leuconostoc mesenteroides* y *Streptococcus thermophilus*, que contribuyen al sabor y producen bacteriocinas, sustancias con actividad antibacteriana. Las bacterias acéticas, como *Acetobacter*, aportan entre el 5 % y el 20 % de la comunidad y generan ácido acético, que da aroma avinagrado (Kurniawan, Milanda y Kusuma, 2025).

La composición del kéfir varía según el origen geográfico y el método de cultivo. Por ejemplo, los granos tibetanos o bulgaros son ricos en *Kluyveromyces marxianus*, mientras que los brasileños destacan por *Candida kefir*. Además, se han detectado pequeñas proporciones de *Bifidobacterium* (1–5 %), que enriquecen la diversidad (Kurniawan, Milanda y Kusuma, 2025). Recientemente, se ha observado que las bacterias también liberan vesículas extracelulares asociadas a la producción de kefirano y a la formación de biofilms (Li et al., 2024).

Lactococcus lactis produce ácido láctico, usando un pequeño truco y éste consiste en “comerse” los azúcares de la leche y transformarlos. Cuando no hay oxígeno, *L. lactis* descompone moléculas como la glucosa o la lactosa (ambos azúcares) en fragmentos más simples a través de la glucólisis (ruta metabólica citoplasmática fundamental que descompone una molécula de glucosa); de ese proceso obtiene energía y produce piruvato (es una molécula pequeña de tres carbonos). Después, una enzima llamada lactato deshidrogenasa toma el piruvato y lo reduce a ácido láctico. En esta reacción se recicla el cofactor NAD^+ (nicotinamida adenina dinucleótido), lo que permite que la glucólisis siga funcionando. Por cada molécula de azúcar que degrada, la bacteria produce dos moléculas de ácido láctico. El ácido se expulsa al exterior, acidificando el entorno y generando un pequeño “voltaje” a través de la membrana, algo que ayuda a la bacteria a sobrevivir (Fig. 1). Esta capacidad de acidificar rápidamente la leche es la que hace que *L. lactis* sea tan valiosa para la industria alimentaria y la conservación de alimentos.

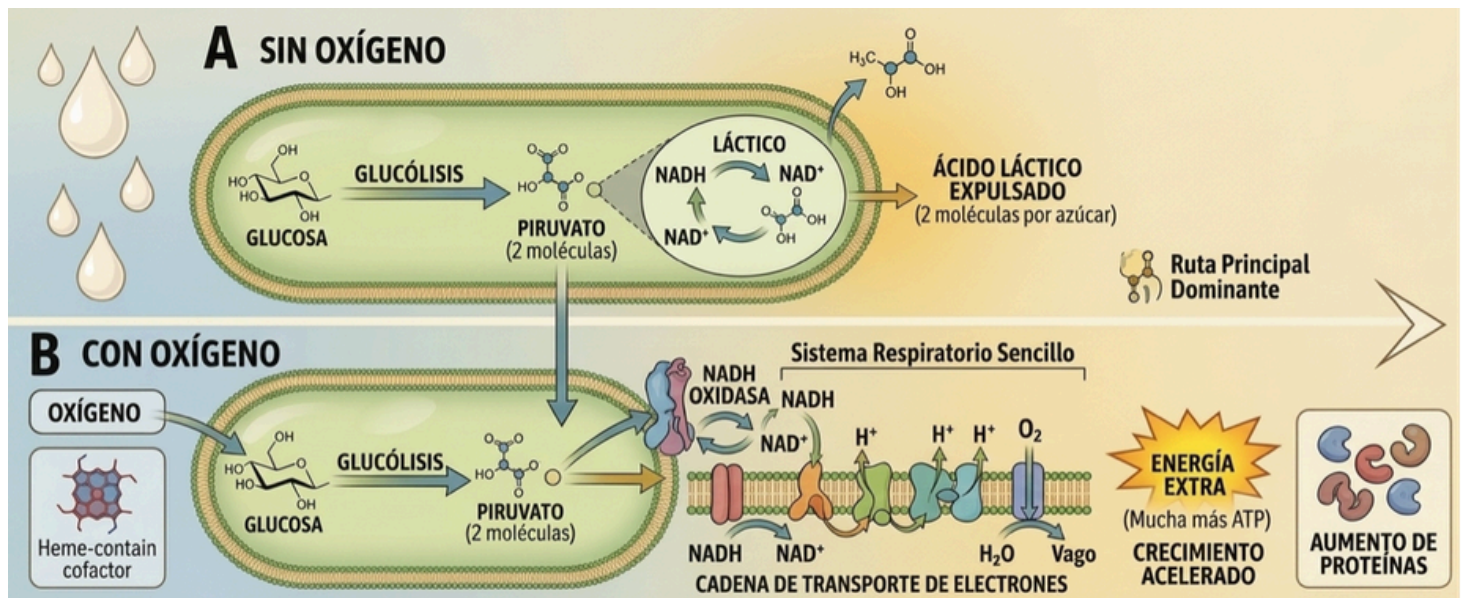


Figura 1. Ruta metabólica de *Lactococcus lactis* bajo diferentes condiciones de disponibilidad de oxígeno. A) Sin Oxígeno (condición fermentativa): Representación de la ruta homoláctica donde la glucosa se transforma en piruvato mediante la glucólisis, produciendo energía (ATP) y ácido láctico como metabolito final, con el consecuente reciclaje de NAD^+ . B) Con Oxígeno (condición respiratoria): Ante la presencia de oxígeno y el cofactor hemo, la bacteria activa una cadena de transporte de electrones y la enzima NADH oxidasa. Imagen creada con la asistencia de la IA Google Gemini (2026), basada en la descripción técnica del autor.

Aunque puede vivir sin oxígeno, *L. lactis* no es estrictamente anaerobia: si dispone de oxígeno y de una coenzima como el hemo, activa un sistema respiratorio sencillo una NADH (nicotinamida adenina dinucleótido reducido) oxidada y una cadena de transporte de electrones) que aumenta su crecimiento y la producción de proteínas, aunque la fermentación láctica sigue siendo su vía principal. Así, gracias a su versatilidad metabólica, esta bacteria se ha convertido en un aliado indispensable de los alimentos fermentados.

3.2 Levaduras: las maestras del burbujeo

Las levaduras aportan efervescencia, sabor y vitaminas. Las especies predominantes son *Saccharomyces cerevisiae*, *Kluyveromyces marxianu*, *Kluyveromyce lactis* y *Kazachstania unisporus*, encargadas de producir etanol y dióxido de carbono. Otros géneros como *Candida*, *Pichia* y *Debaryomyces* se encuentran en menor proporción y contribuyen a la variedad aromática (Kurniawan, Milanda y Kusuma, 2025). Durante el almacenamiento, la comunidad fúngica puede cambiar: algunos estudios reportan una transición de *Kazachstania* hacia hongos filamentosos como *Penicillium* y *Aspergillus* (Ströher et al., 2025).

La efervescencia del kéfir no es algo añadido artificialmente: es el resultado de la actividad metabólica de las levaduras que conviven en los granos junto con bacterias lácticas. Durante la fermentación, las levaduras hidrolizan (rompen moléculas) la lactosa en glucosa y galactosa y luego fermentan esos azúcares, obteniendo energía, liberando etanol y dióxido de carbono (CO₂). Este CO₂ queda atrapado en el líquido y se escapa en forma de burbujas al abrir el envase, generando la sensación “chispeante” del kéfir (Fig. 2).

Durante el metabolismo de aminoácidos y azúcares, algunas levaduras entre ellas *S. cerevisiae* y *K. marxianus* sintetizan alcoholes superiores como el feniletanol. Este compuesto y otros alcoholes son

considerados “compuestos aromáticos relevantes” del kéfir; derivan de la hidrólisis de glucosa y del catabolismo de aminoácidos por bacterias y hongos o levaduras. Feniletanol aporta notas florales (rosa, violeta, miel) y especiadas, y se ha asociado específicamente con la actividad de levaduras y de *Lactobacillus kefirifaciens* (Ströher et al., 2025).

Además la actividad lipolítica de las levaduras y bacterias genera cetonas como 2-heptanona y 2-nonanona. Estas moléculas tienen aromas de queso curado, especias o fruta ahumada y están presentes a lo largo de la fermentación del kéfir. Otros compuestos como la acetona y el acetoino, que tienen umbrales de percepción muy bajos, aportan notas mantecosas y mejoran las sensaciones

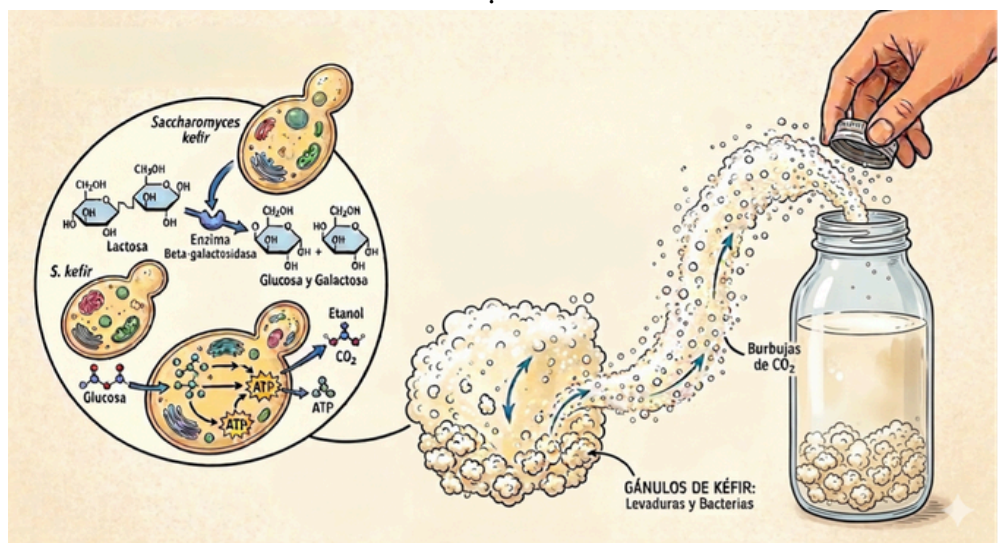


Figura 2. Bioquímica de la efervescencia. Los gránulos de kéfir actúan como pequeñas fábricas biológicas que hidrolizan la lactosa y liberan burbujas de CO₂. Este proceso natural es el responsable del toque chispeante y el sabor característico de esta bebida fermentada. Imagen creada con la asistencia de la IA Google Gemini (2026), basada en la descripción técnica del autor.

aromáticas y gustativas. Los ácidos carboxílicos como butanoico, hexanoico u octanoico, formados a partir del metabolismo de lípidos y carbohidratos, proporcionan matices que van desde queso maduro hasta toques vegetales (Ströher et al., 2025).

Pero aquí no acabamos ya que la esterificación entre los alcoholes producidos por levaduras y los ácidos carboxílicos genera ésteres que aportan aromas afrutados y dulces; la levadura del género *Kazachstania* se asocia con notas frutales y especiadas que enriquecen el sabor del kéfir.

4. Una alianza simbiótica

El kéfir es un ejemplo vivo de cooperación. Las BAL degradan la lactosa y acidifican el medio, creando un ambiente apto para levaduras resistentes a la acidez y a su vez, las levaduras secretan CO₂, etanol y vitaminas que estimulan el crecimiento bacteriano. *L. kefiranofaciens* sintetiza kefirano, un polisacárido que

da cuerpo a la bebida y podría actuar como prebiótico (Kurniawan, Milanda y Kusuma, 2025).

5. Del laboratorio al bienestar: estudios recientes

Las BAL no solo fermentan: generan ácidos orgánicos, dióxido de carbono, etanol y péptidos bioactivos que pueden mejorar la digestibilidad y reducir la lactosa (Ströher et al., 2025). Un estudio de 2024 demostró que fermentaciones controladas de 24 horas producen kéfir estable con buena textura y bajo contenido de lactosa (Bazán Tantaleán et al., 2024). Otro trabajo comparó el uso de cultivos definidos y la técnica tradicional de “backslopping” (usar una porción de kéfir para inocular la siguiente tanda). Aunque el backslopping generó mayores cargas microbianas y más BAL, los cultivos definidos conservaron mayor diversidad bacteriana y aumentaron la producción de interferón y en modelos murinos con alergia (Baars et al., 2025).

Tabla 1. Formación de compuestos aromáticos en el kéfir.

| Compuesto / Grupo | Origen Metabólico | Notas Sensoriales | Organismos Asociados |
|--|--|--|---|
| Alcoholes Superiores (ej. feniletanol) | Hidrólisis de glucosa y catabolismo de aminoácidos. | Notas florales (rosa, violeta, miel) y especiadas. | <i>S. cerevisiae</i> , <i>K. marxianus</i> y <i>L. kefiranofaciens</i> . (Saygili, Yerlikaya y Akpinar, 2023) |
| Acetona y Acetoíno (ambos pertenecientes al grupo de las cetonas) | Metabolismo de carbohidratos/lípidos. | Notas mantecosas; mejoran sabor y aroma. | Microbiota del kéfir. (Ströher et al., 2025). |
| Cetonas (ej. 2-heptanona, 2-nonanona) | Actividad lipolítica (metabolismo de grasas). | Queso curado, especias o fruta ahumada. | Levaduras y bacterias (Ströher et al., 2025). |
| Acetona y Acetoíno | Metabolismo de carbohidratos/lípidos. | Notas mantecosas; mejoran sabor y aroma. | Microbiota del kéfir (Ströher et al., 2025). |
| Ácidos Carboxílicos (ej. butanoico, hexanoico) | Metabolismo de lípidos y carbohidratos. | Queso maduro hasta toques vegetales. | Microbiota del kéfir (Xiao et al., 2023) |
| Ésteres | Esterificación: Reacción entre alcoholes y ácidos carboxílicos. | Aromas afrutados y dulces. | Género <i>Kazachstania</i> (Frag et al., 2020) |

En modelos animales, el kéfir muestra propiedades antiinflamatorias y antioxidantes. Ratones alimentados con kéfir preparado con leche cruda presentaron menores reacciones alérgicas cutáneas que aquellos que consumieron kéfir de leche calentada (Baars et al., 2023). En otros estudios, el consumo de kéfir aumentó el número de células caliciformes (pequeños "fábricas de moco" unicelulares situadas en el revestimiento de varios órganos, principalmente en el tracto respiratorio y digestivo) y la abundancia de *Lactobacillus* en modelos de colitis, elevando los niveles de butirato, un ácido graso de cadena corta con efectos antiinflamatorios (Campos et al., 2026). Los beneficios también se reflejan en seres humanos. Un ensayo con estudiantes coreanos que bebieron 150 mL de kéfir diario durante dos semanas mostró un

aumento en bacterias productoras de lactato como *Bifidobacterium breve* y *Weissella koreensis*, así como un incremento en la producción de ácidos grasos de cadena corta (Choi et al., 2025). Además, la literatura asocia el consumo regular de kéfir con efectos hipocolesterolémicos (sustancias o compuestos naturales que tienen la función de reducir los niveles elevados de colesterol en la sangre), hipotensivos (son sustancias que reducen la presión arterial alta, como la hipertensión a niveles seguros), antimicrobianos (sustancias capaces de destruir o detener el crecimiento de microorganismos nocivos como bacterias) y ansiolíticos (sustancia para reducir los síntomas de la ansiedad, la angustia y el nerviosismo) (Maione et al., 2024).

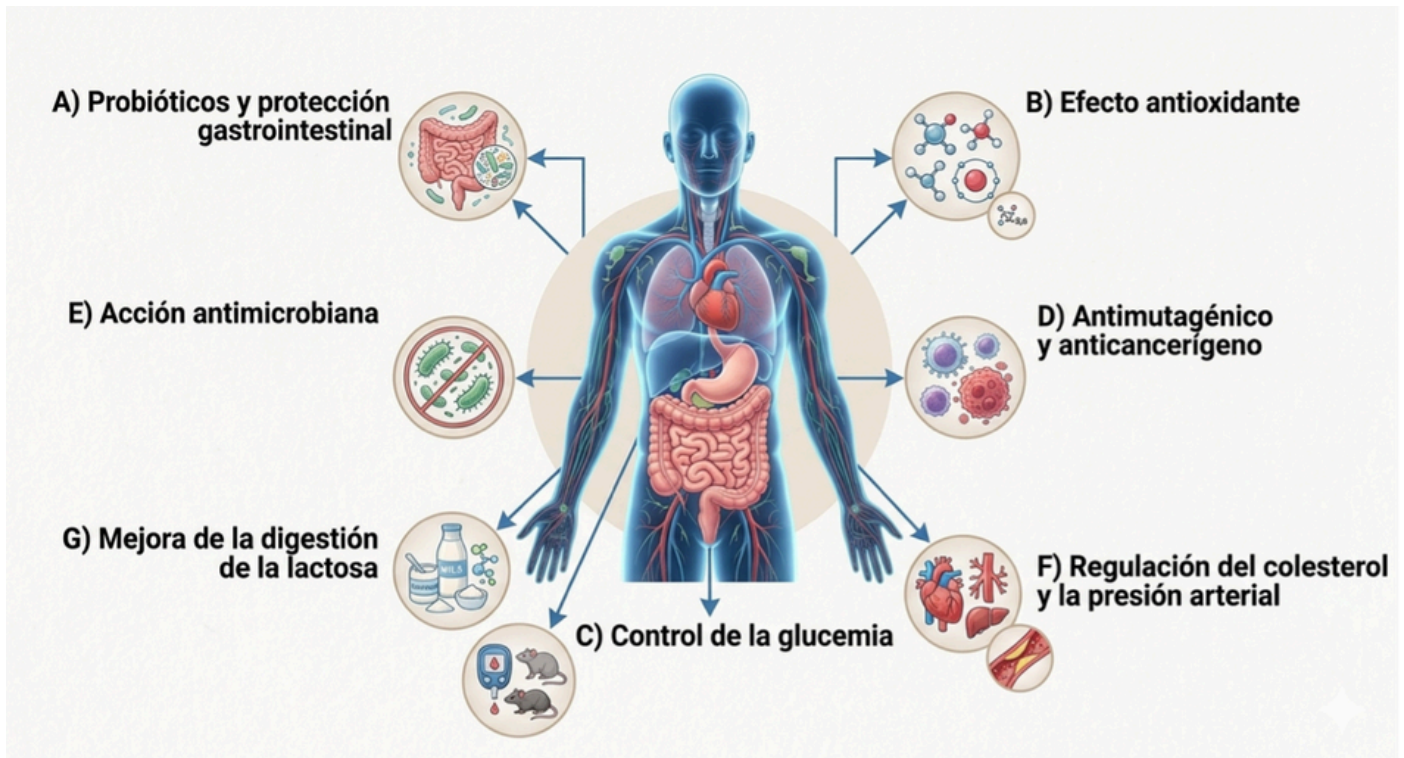


Figura 3. Mapa de beneficios del kéfir. (A) Probióticos y protección en el tracto gastrointestinal, (B) Defensa antioxidante, (C) Control de la glucemia, (D) Antimutagénico y anticarcinogénico, (E) Acción antimicrobiana, (F) Regulación del colesterol y la presión arterial, (G) Mejora de la digestión de la lactosa. Imagen creada con la asistencia de la IA Google Gemini (2026), basada en la descripción técnica del autor.

A) Probióticos y protección en el tracto gastrointestinal

Los granos de kéfir aportan una mezcla de bacterias lácticas y bifidobacterias que ayudan a mantener la homeostasis intestinal. La fermentación produce exopolisacáridos como el kefirano, que favorece la reparación de la mucosa y potencia la inmunidad, por lo que se considera un posible tratamiento para enfermedades intestinales (Salari et al., 2022). Cepas específicas como *Liquorilactibacillus mali* K8 y *Lentiactobacillus diolivorans* 1Z han demostrado resistir el estrés gastrointestinal e inhibir patógenos como *Salmonella* (Fig. 3) (Abatemarco Júnior et al., 2018).

B) Efecto antioxidante

El kéfir contiene péptidos, aminoácidos (triptófano, cisteína, taurina y tirosina) y vitaminas A y E producidos durante la fermentación, así como enzimas antioxidantes como superóxido dismutasa y catalasa (Kumar et al., 2021). Estudios *in vitro* y en animales muestran que la fermentación de la leche incrementa hasta tres veces el contenido de compuestos fenólicos respecto a la leche sin fermentar, y que el kéfir de agua rico en polifenoles (p. ej., de kiwi o granada) posee fuerte capacidad reductora y protege contra el daño oxidativo en modelos celulares. En ratones, el kéfir aumentó la actividad de catalasa y superóxido dismutasa y redujo la proteólisis, sugiriendo protección frente a lesiones gástricas inducidas por etanol (Fig. 3) (Brasil et al., 2019).

C) Control de la glucemia

El kéfir se perfila como un alimento funcional para el control glucémico. Las bacterias lácticas presentes en el kéfir pueden inhibir enzimas digestivas como la α -glucosidasa y la α -amilasa, reduciendo así la respuesta glucémica postprandial (Calatayud et al., 2021).

estudios con ratas diabéticas, la administración de kéfir durante un mes disminuyó significativamente la glucemia plasmática (Calatayud et al., 2021). Un ensayo clínico en 60 pacientes diabéticos indicó que el consumo diario de kéfir redujo de manera significativa la glucosa en ayunas, lo que respalda su potencial como coadyuvante en el control de la diabetes (Fig. 3) (Alihosseini et al., 2017).

D) Antimutagénico y anticarcinogénico

La suplementación con kéfir puede activar linfocitos T CD4⁺ y macrófagos M1 (Pro-inflamatorios), aumentando la producción de citocinas que inhiben la proliferación de células tumorales (Moreno et al., 2007). Componentes como polisacáridos, proteínas, péptidos y polifenoles interfieren en enzimas implicadas en la carcinogénesis y promueven la apoptosis. Bacterias aisladas de kéfir han mostrado capacidad antimutagénica de hasta 98.5 % al unirse a mutágenos y facilitar su excreción (Khoury et al., 2014). Estudios con líneas celulares sugieren que el kéfir puede detener el ciclo celular y desencadenar la muerte de células cancerígenas en colon (Fig. 3) (Hosono et al., 1990).

E) Acción antimicrobiana

Las bacterias y levaduras del kéfir generan metabolitos (ácido láctico, peróxido de hidrógeno, dióxido de carbono, acetaldehído y bacteriocinas) que inhiben el crecimiento de patógenos (John y Deeseenthum, 2015). Se han identificado bacteriocinas específicas (por ejemplo, ST8KF) y cepas de *Lactiplantibacillus plantarum* capaces de producir peróxido de hidrógeno con actividad antibacteriana (Powell et al., 2007). Investigaciones muestran que cultivos de *Lactobacillus acidophilus* y *L. kefiranofaciens* aislados de kéfir inhiben eficazmente patógenos como *Salmonella*, *Escherichia coli* y *Shigella* (Santos et al., 2003). El polisacárido kefirano también exhibe efectos antifúngicos contra especies como *Aspergillus flavus* (Fig. 3) (Gamba et al., 2015).

F) Regulación del colesterol y la presión arterial

El kéfir contiene ácidos linoleicos conjugados y péptidos bioactivos capaces de reducir el colesterol sérico y la presión arterial. Estos compuestos facilitan la síntesis de ácidos biliares y disminuyen la absorción del colesterol (Guzel-Seydim et al., 2006). Estudios en animales muestran que ratas alimentadas con soya fermentada con kéfir registraron menores niveles de colesterol total y LDL respecto al control (Liu et al., 2005). En el caso del kéfir de agua, investigaciones con ratas Wistar demostraron una mejora significativa del perfil lipídico y disminución del peso corporal y de la grasa hepática (Fig. 3) (Alsayadi et al., 2014).

G) Mejora de la digestión de la lactosa

Aunque el kéfir contiene lactosa residual, las β -galactosidasas producidas por sus microorganismos pueden aumentar la digestibilidad de la lactosa (Sharma et al., 2023). Un estudio indicó que la actividad β -galactosidasa en kéfir era 60 % superior a la del yogur y que los consumidores experimentaron una reducción del 71 % en la flatulencia (Hertzler y Clancy, 2003). Diversas investigaciones recientes corroboran que el consumo de kéfir mejora la absorción de lactosa y alivia los síntomas gastrointestinales relacionados con su intolerancia (Fig. 3) (Sharma et al., 2023).

H) Manejo del kéfir casero y controversias

Algunas investigaciones recientes han señalado que no todo es positivo en el kéfir: hay riesgos de contaminación si se emplean granos sin control higiénico. Algunos trabajos científicos señalan que los granos de kéfir pueden albergar bacterias oportunistas; un estudio sobre 30 lotes de granos tradicionales detectó coliformes y especies potencialmente patógenas (por ejemplo, *Hafnia paralvei* y *Escherichia coli*) y se advirtió de que la bebida obtenida con esos granos puede suponer un riesgo sanitario si no se controla adecuadamente (Çırpıcı y Çetin, 2023).

Otro estudio más reciente analizó la microbiota de granos de leche kefir durante la fermentación y comprobó que, a pesar de la rápida acidificación, ciertas bacterias como *Listeria monocytogenes*, *Salmonella senftenberg* y *E. coli* O157:H7 sobrevivían durante la fermentación y el almacenamiento refrigerado, subrayando la necesidad de usar leche pasteurizada, higiene estricta y refrigeración eficiente (Maughan et al., 2026). Por su parte, organismos de salud pública han recordado que las fermentaciones cortas pueden no eliminar patógenos acidotolerantes como *E. coli* O157:H7 y recomiendan asegurar que el pH baje rápidamente por debajo de 4.6, emplear ingredientes pasteurizados y evitar la contaminación cruzada (Parto y Loewe, 2026).

6. Conclusiones

El kéfir de leche es un ejemplo claro de biotecnología cotidiana: una comunidad de bacterias y levaduras transforma la leche en una bebida con textura, sabor y propiedades únicas. Este consorcio microbiano degrada la lactosa, genera compuestos como el kefirano y el ácido láctico, y produce aromas y gases que dan lugar a su carácter efervescente. Los resultados experimentales indican que, además de mejorar la digestibilidad, el consumo regular de kéfir puede fortalecer la microbiota intestinal, modular el sistema inmunitario y aportar beneficios antiinflamatorios y antioxidantes. Asimismo, la acidez del producto reduce muchas bacterias, pero algunas especies acidotolerantes persisten, lo que plantea la necesidad de buenas prácticas sanitarias. Es importante que para disfrutar con seguridad el kéfir depende de ciertas pautas: utilizar siempre leche pasteurizada y granos de calidad, fermentar en condiciones controladas hasta lograr un pH inferior a 4.5 y refrigerar de inmediato el producto final. En definitiva, el kéfir demuestra cómo la tradición y la ciencia pueden converger en un alimento versátil y

beneficioso, siempre que se elabore con responsabilidad y limpieza.

7. Literatura citada

AAbatemarco J., M., Sandes, S. H. C., Ricci, M. F., Arantes, R. M. E., Nunes, Á. C., Nicoli, J. R. (2018). Protective effect of *Lactobacillus diolivorans* 1Z, isolated from Brazilian Kefir, against *Salmonella enterica* serovar typhimurium in experimental murine models. *Frontiers in Microbiology*. <https://doi.org/10.3389/FMICB.2018.02856>

Alihosseini, N., Moahboob, S. A., Farrin, N., Mobasseri, M., Taghizadeh, A., & Ostadrahimi, A. R. (2017). Effect of probiotic fermented milk (Kefir) on serum level of insulin and homocysteine in type 2 diabetes patients. *Acta Endocrinologica (Bucharest)*, 13, 431–436. <https://doi:10.4183/aeb.2017.431>

Alsayadi, M., Jawfi, Y Al., Belarbi, M., Soualem-Mami, Z., Merzouk, H., & Sari, D. C. (2014). Evaluation of anti-hyperglycemic and anti-hyperlipidemic activities of water kefir as probiotic on streptozotocin-induced diabetic Wistar rats. *Journal of Diabetes Mellitus*, 4, 85–95. <https://doi:10.4236/jdm.2014.42015>

Baars, T., van Esch, B., Diks, M., et al. (2023). Raw milk kefir: microbiota, bioactive peptides, and immune modulation. *Food & Function*, 14, 1648-1661. <https://doi.org/10.1039/d2fo03248a>

Baars, T., van Esch, B., Diks, M., van Ooijen, L., Zhang, Z., Dekker, P., ... & Kort, R. (2025). Bacterial diversity, bioactive peptides, and enhanced immunomodulatory effects in raw milk kefir made with defined starter cultures versus backslipping. *International Dairy Journal*, 164, 106202. <https://doi.org/10.1016/j.idairyj.2025.106202>

Bazán Tantaleán, D. L., Del-Río, P. G., Cortés Diéguez, S., Domínguez, J. M., & Pérez Guerra, N. (2024). Main composition and visual appearance of milk kefir beverages obtained from four consecutive 24- and 48-h batch subcultures. *Processes*, 12(7), 1419. <https://doi.org/10.3390/pr12071419>

Brasil, G. A., Moraes, F. S. A., Falsoni, R. M. P., Resende, M. S., Andrade, T. U., & Lima, E. M. (2019). Pretreatment with water kefir promotes a decrease in ulcer development in an ethanol-acidified ulcer model. *The FASEB Journal*, 33, 760. https://doi.org/10.1096/fasebj.2019.33.1_supplement

Calatayud, M., Börner, R. A., Ghyselinck, J., Verstrepen, L., De Medts, J., & Van den Abbeele, P. (2021). Water kefir and derived pasteurized beverages modulate gut microbiota, intestinal permeability and cytokine production *in vitro*. *Nutrients*, 13, 3897. <https://doi.org/10.3390/nu13113897>

Campos, I. X., Paris, V. F., Pereira, M. D. F. A., Alpino, G. D. C. Á., Bernardes, A. L., Ávila, L. G. M. D., et al. (2026). Milk Kefir Beverage Improves Histomorphometry, Reduces Inflammatory Infiltrates and *Desulfovibrio* and Increases *Lactobacillus* in IL-10^{-/-} Mice. *Journal of Food Science*, 91(2), e70879. <https://doi:10.1111/1750-3841.70879>

Choi, Y., Keum, G. B., Kang, J., Doo, H., Kwak, J., Kim, H., et al. (2025). Evaluation of kefir consumption on gut microbial diversity in a healthy young population using full-length 16S rRNA sequencing. *Frontiers in Microbiology*, 16, 1587831. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2025.1587831>

Çırpıcı, B. B., & Çetin, B. (2023). Determining the safety of kefir grains for public health. *Food Bioscience*, 53, 102648. <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2023.102648>

Farag, M. A., Jomaa, S. A., Abd El-Wahed, A., & R. El-Seedi, H. (2020). The many faces of kefir fermented dairy products: Quality characteristics, flavor chemistry, nutritional value, health benefits, and safety. *Nutrients*, 12(2), 346. <https://doi.org/10.3390/nu1202034>

Gamba, R. R., Koyanagi, T., Peláez, A. L., De Antoni, G., & Enomoto, T. (2021). Changes in microbiota during multiple fermentation of kefir in different sugar solutions revealed by High-Throughput sequencing. *Current Microbiology*. <https://doi.org/10.1007/S00284-021-02501-0>

- Guzel-Seydim, Z. B., Seydim, A. C., Greene, A. K., & Taş, T. (2006). Determination of antimutagenic properties of acetone extracted fermented milks and changes in their total fatty acid profiles including conjugated linoleic acids. *International Journal of Dairy Technology*, 59, 209–215. <https://doi.org/10.1111/j.1471-0307.2006.00265.x>
- Hertzler, S. R., & Clancy, S. M. (2003). Kefir improves lactose digestion and tolerance in adults with lactose maldigestion. *Journal of the American Dietetic Association*, 103, 582–587. <https://doi.org/10.1053/jada.2003.50111>
- Hosono, A., Tanabe, T., & Otani, H. (1990). Binding properties of lactic acid bacteria isolated from Kefir milk with mutagenic amino acid pyrolyzates. *Milchwissenschaft-Milk Science International*, 45, 647–651.
- John, S. M., & Deeseenthum, S. (2015). Properties and benefits of kefir- A review. *Songklanakarinn Journal of Science and Technology*, 37, 275–282.
- Justel, M. A., Outeiriño, E. B., & Guerra, N. P. (2025). Production of Kefir and Kefir-like Beverages: Fundamental Aspects, Advances, and Future Challenges. *Processes*, 14(1), 73. <https://doi.org/10.3390/pr14010073>
- Khoury, N., El-Hayek, S., Tarras, O., El-Sabban, M., El-Sibai, M., & Rizk, S. (2014). Kefir exhibits anti-proliferative and pro-apoptotic effects on colon adenocarcinoma cells with no significant effects on cell migration and invasion. *International Journal of Oncology*, 45, 2117–2127. <https://doi.org/10.3892/ijo.2014.2635>
- Kumar, M. R., Yeap, S. K., Mohamad, N. E., Abdullah, J. O., Masarudin, M. J., & Khalid, M. (2021). Metagenomic and phytochemical analyses of Kefir water and its subchronic toxicity study in BALB/c mice. *BMC Complementary Medicine and Therapies*. <https://doi.org/10.1186/S12906-021-03358-3>
- Kurniawan, Milanda, T., & Kusuma, S. A. F. (2025). Kefir as a functional probiotic: microbial composition and health effects. *Frontiers in Food Science and Technology*, 5, 1725280. <https://doi.org/10.3389/frfst.2025.1725280>
- Li, P., Bai, Y., Li, S., & Zhang, Z. (2024). Characterisation of kefir-derived lactic acid bacteria and their extracellular vesicles. *Current Research in Food Science*, 9, 100925. <https://doi.org/10.1016/j.crfs.2024.100925>
- Liu, J. R., Lin, Y. Y., Chen, M. J., Chen, L. J., Lin, C. W. (2005). Antioxidative activities of kefir. *Asian-Australasian Journal of Animal Sciences*, 18, 567–572. <https://doi.org/10.5713/ajas.2005.567>
- Maione, A., Imperato, M., Buonanno, A., Salvatore, M. M., Carraturo, F., De Alteriis, E., ... & Galdiero, E. (2024). Evaluation of potential probiotic properties and in vivo safety of lactic acid bacteria and yeast strains isolated from traditional home-made kefir. *Foods*, 13(7), 1013. <https://doi.org/10.3390/foods13071013>
- Maughan, L., Koolman, L., Macori, G., Killian, C., Fanning, S., Whyte, P., & Bolton, D. J. (2026). Microbiota dynamics and bacterial pathogen survival during milk kefir fermentation and storage. Available at SSRN 6320064. <https://doi.org/10.2139/ssrn.6320064>
- MK, A., Singh, B. P., Sarkar, P., Hassan, M. Z., Abidi, K. H., Kovaleva, E. G., ... & Hati, S. (2026). A comprehensive review on kefir: composition, microbial diversities, meta-analysis and biological significances on human health. *Food Production, Processing and Nutrition*, 8(1), 6. <https://doi.org/10.1186/s43014-025-00351-y>
- Moreno, L. A., Matar, C., Farnworth, E., & Perdígón, G. (2007). Study of immune cells involved in the antitumor effect of kefir in a murine breast cancer model. *Journal of Dairy Science*, 90, 1920–1908. <https://doi.org/10.3168/jds.2006-07>

Parto, N., & Loewe C. (authors). (2024). Section 3.12 Kefir. In McIntyre, L. (editor), and the Fermented Foods working group. Safety of fermented foods. Assessing risks in fermented food processing practices and advice on how to mitigate them. Environmental Health Services, BC Centre for Disease Control. December 2024. Available from: http://www.bccdc.ca/resource-gallery/Documents/Educational%20Materials/EH/FPS/Food/Fermented/Fermented_Foods_Guidance-3.12_Kefir.pdf

Powell, J. E., Witthuhn, R. C., Todorov, S. D., & Dicks, L. M. T. (2007). Characterization of bacteriocin ST8KF produced by a Kefir isolate *Lactobacillus plantarum* ST8KF. *International Dairy Journal*, 17, 190–198. <https://doi.org/10.1016/j.idairyj.2006.02.012>

Salari, A., Hashemi, M., & Afshari, A. (2022). Functional properties of kefir in the medical field and food industry. *Current Pharmaceutical Biotechnology*, 23, 388–395. <https://doi.org/10.2174/138920102266621032212142>

Santos, A., San Mauro, M., Sanchez, A., Torres, J. M., & Marquina, D. (2003). The antimicrobial properties of different strains of *Lactobacillus* spp. isolated from kefir. *Systematic and Applied Microbiology*, 26, 434–437. <https://doi.org/10.1078/072320203322497464>

Saygili, D., Yerlikaya, O., & Akpınar, A. (2023). The effect of using different yeast species on the composition of carbohydrates and volatile aroma compounds in kefir drinks. *Food Bioscience*, 54, 102867. <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2023.102867>

Sharma, H., Ozogul, F., Bartkiene, E., & Rocha, J. M. (2023). Impact of lactic acid bacteria and their metabolites on the techno-functional properties and health benefits of fermented dairy products. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 63, 4819–4841. <https://doi.org/10.1080/10408398.2021.2007844>

Ströher, J. A., Oliveira, W. D. C., de Freitas, A. S., Salazar, M. M., da Silva, L. D. F. F., Bresciani, L., ... & Malheiros, P. D. S. (2025). A global review of geographical diversity of kefir microbiome. *Fermentation*, 11(3), 150. <https://doi.org/10.3390/fermentation11030150>

Xiao, R., Liu, M., Tian, Q., Hui, M., Shi, X., & Hou, X. (2023). Physical and chemical properties, structural characterization and nutritional analysis of kefir yoghurt. *Frontiers in microbiology*, 13, 1107092. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2022.1107092>

Cita:

Savín Amador, M. (2026). El Kéfir de leche: consorcio microbiano y salud. *Biotechnológica Magazine*, 4(2), 32–41. <https://doi.org/10.5281/zenodo.20146807>

Ftalatos: los compuestos ocultos en los plásticos y su impacto en la salud

Yazmin Duran-Encinas¹, Diana Barajas-Sandoval¹, María-Guadalupe Sánchez-Otero², Miguel Ángel Hurtado-Oliva³, Olivia Arjona⁴, Elena Palacios Mechetnov^{4*}

¹Postdoctorante, CIBNOR; ²Facultad de Bioanálisis, Región Veracruz, Universidad Veracruzana; ³Facultad de Ciencias del Mar de la Universidad Autónoma de Sinaloa; ⁴Metabolismo de lípidos, Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste, S.C.

*Autor de correspondencia: epalacio@cibnor.mx

Foto: Mateusz Feliksik

Tema

Todos tenemos una idea de qué son los microplásticos: pedacitos de plástico muy pequeños que contaminan todo: desde el aire y el agua de nuestras casas hasta los bosques y los mares. Pero a los ftalatos poca gente los identifica; ¿te gustaría saber qué son y cómo dañan tu salud?

1. Introducción

Los ftalatos son compuestos químicos que funcionan como “plastificantes”; es decir, hacen el plástico más suave y flexible. Esto se debe a que los ftalatos añadidos a los plásticos actúan como un “lubricante” entre las moléculas largas y complejas de los plásticos duros. Los ftalatos no están unidos al plástico mediante enlaces químicos, sino que solo están sobrepuestos; por ello, cuando dejamos una botella de plástico en el coche y ésta se calienta, los ftalatos pueden “disolverse” en el agua y así terminamos por ingerirlos. Las botellas expuestas al

calor o al sol van perdiendo ftalatos y se vuelven rígidas y quebradizas.

Pero los ftalatos no solo son plastificantes para botellas de agua; también se encuentran en las bolsas del supermercado, biberones, juguetes, envolturas para alimentos, material médico, incluso la ropa que usamos contiene ftalatos para que se sienta suave y flexible; también se usan en perfumes, jabones, cremas y champú. ¿Por qué añadir plastificantes a los perfumes? Porque los ftalatos se comportan como aceite líquido, que disuelve, transporta y fija las fragancias en la piel, dejando el olor del perfume o crema por más tiempo. Además, los ftalatos se usan en algunos medicamentos como recubrimiento para que no se desmoronen y la liberación sea más lenta y prolongue su efecto. De esta manera absorbemos estos plastificantes a través de la respiración, los esparcimos en nuestro cuerpo y los ingerimos a través de los alimentos y el agua que consumimos.

Los ftalatos representan un problema porque pueden causar cáncer, obesidad, diabetes, disminución reproductiva, mortalidad prenatal y una larga lista de afecciones. Entonces, ¿por qué usar los ftalatos en todo si afectan nuestra salud? ¿De dónde provienen? ¿Cómo podemos saber qué productos contienen para evitarlos? ¿Y por qué un plástico causa tantos problemas para la salud? Muchas preguntas, vámonos por partes.

2. ¿De dónde provienen los ftalatos?

La palabra ftalato proviene del “ácido ftálico”, un derivado del naftaleno (Fig. 1). ¿Te suena el nombre de este compuesto? Es el mismo que usaban las abuelas en los armarios como bolas de naftalina para repeler las polillas. Las polillas no se comen las telas, pero sus larvas sí comen telas de origen animal, como la seda, las pieles, las plumas y el cuero, dejando pequeños hoyos. La naftalina (o paradiclorobenceno, que es su nombre químico) es un derivado del petróleo de color blanco que libera un gas tóxico que actúa como pesticida y mata a las larvas de polillas. Ese gas también es tóxico para animales y personas; por lo tanto, las abuelas que usaban bolas de naftalina para proteger la ropa de las polillas posteriormente tenían que lavarla con vinagre o bicarbonato y dejarla al sol durante varios días para que se eliminara el olor y, junto con él, el gas tóxico. La naftalina también se usaba para eliminar hongos y purificar el agua, con resultados que podrían ser peores que los del remedio, aunque eso no se sabía antes. El uso de la naftalina como repelente de insectos se popularizó a mediados del siglo XX en Estados Unidos (EUA). Y antes de eso, ¿qué usaban como repelente de insectos para proteger la ropa? Las personas que tenían poco dinero usaban hojas de laurel, clavo e incluso de cedro, que era un poco más caro.

Origen industrial de los ftalatos

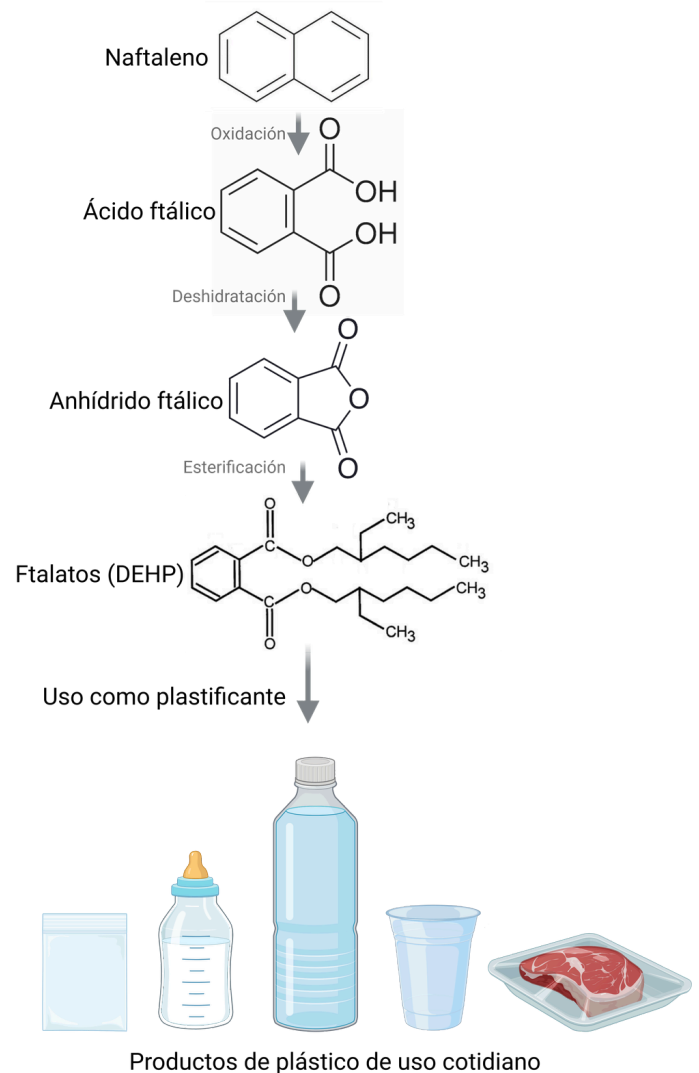


Figura 1. Origen industrial de los ftalatos. El naftaleno puede oxidarse para producir ácido ftálico y, posteriormente, anhídrido ftálico, compuestos que se utilizan como precursores en la producción de ftalatos, empleados como plastificantes en numerosos productos plásticos de uso cotidiano.

Otras personas compraban un compuesto sólido de color blanco que liberaba un gas repelente de insectos: el alcanfor, una resina obtenida de la corteza y las raíces del árbol alcanforero *Cinnamomum camphora*, que crece en el sureste asiático.

El alcanfor tiene un aroma mentolado y, además de ahuyentar insectos, sirve como descongestionante, expectorante y antiséptico y alivia los dolores musculares. Sin embargo, el alcanfor fue sustituido por la naftalina porque esta última resultaba más fácil y mucho más barata de producir. A finales del siglo XX también se dejó de usar la naftalina porque dañaba el hígado y los riñones y era carcinogénica. Además, porque había otras formas de controlar las polillas, tales como insecticidas, y porque en los armarios dejamos de usar telas de origen animal y pasamos a usar telas de plástico, como el poliéster o la microfibra, que contiene ftalatos para hacer la ropa más suave y flexible. ¿A ti te preocupan las polillas? ¿Cuántas prendas de ropa tienes hechas de plástico y cuántas de tejidos naturales?

2.1. ¿Cuántos ftalatos diferentes hay? y ¿por qué son importantes?

Debido a su proceso de producción, existen más de 100 tipos de ftalatos. Por ejemplo, los ftalatos producidos a partir del naftaleno pueden obtenerse por oxidación al aire, pero es un proceso explosivo. En 1836, el químico francés Auguste Laurent propuso un método de oxidación y unión del ácido ftálico con uno o dos alcoholes mediante la adición de mercurio. Después, se dejó de usar el mercurio y se usó ácido sulfúrico, proceso que fue patentado en 1896 (Fig. 2).

El ácido ftálico es el mismo en todos los ftalatos, pero los alcoholes a los que se unen determinan su tamaño y sus propiedades. El di(2-etilhexil) ftalato (DEHP) es el más común (Fig. 3) y se emplea con frecuencia en la fabricación de materiales médicos (bolsas de sangre, tubos, catéteres, etc.), envases alimentarios y juguetes. Otros ftalatos pequeños, tales como el dimetil ftalato (DMP) o dietil ftalato (DEP) que también se usan de manera libre, es decir sin unirse químicamente a los plásticos en otros productos como cosméticos, cremas, perfumes, insecticidas y medicamentos como antihistamínicos y analgésicos para disminuir el dolor de cabeza.

2.2. ¿Qué pasa cuando un ftalato entra al cuerpo?

Cada tipo de ftalato afecta de forma distinta al organismo. Se calcula que el 70% de los ftalatos que entran al cuerpo lo hace por vía oral (comida, bebida, medicamentos, juguetes y mamilas en el caso de los infantes). El 20% entra por la piel, a través de jabón, cremas, desodorantes, perfumes, insecticidas y ropa, y por el contacto con los asientos del automóvil. El 9% entra por inhalación de ftalatos cuando se queman plásticos, o de los ftalatos que desprenden de los automóviles al exponerse al sol. Menos del 1% se debe a materiales de curación, por ejemplo, durante cirugías o diálisis.

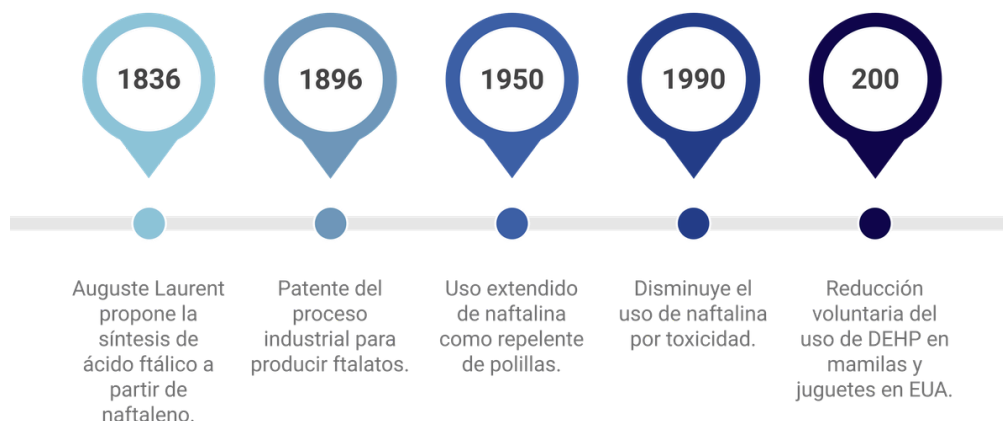


Figura 2. Línea del tiempo que muestra el origen industrial de los ftalatos. En ella se muestra el desarrollo del método para producir ácido ftálico a partir de naftaleno, su uso industrial posterior y algunos cambios recientes relacionados con la toxicidad y el uso de estos compuestos en productos del diario.

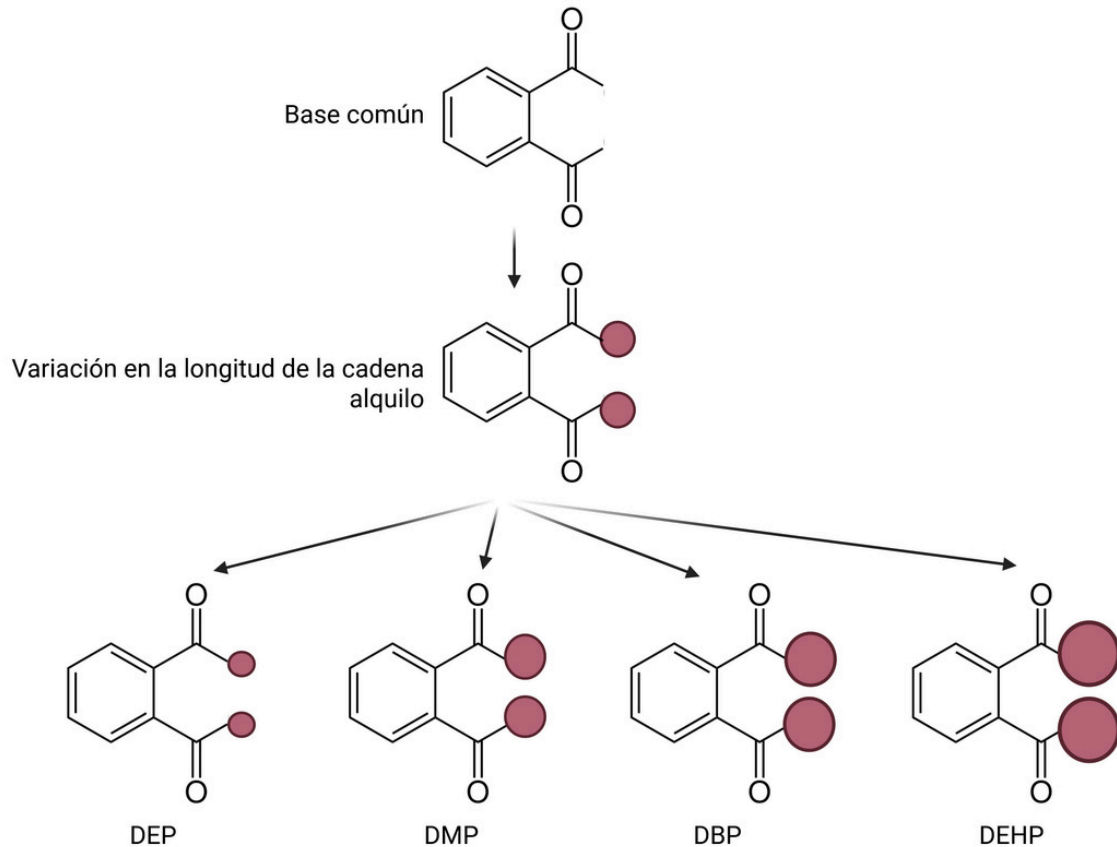


Figura 3. Estructura general de los ftalatos y variación en la longitud de sus cadenas laterales. Todos los ftalatos comparten un núcleo común derivado del ácido ftálico, las diferencias estructurales se encuentran en las cadenas de alquilo esterificadas a los grupos carboxilo. En el esquema, los círculos rojos representan las cadenas laterales, su tamaño indica el incremento de la longitud de la cadena alquilo. Se muestran ejemplos representativos de ftalatos de bajo peso molecular, como el ftalato de dietilo (DEP, por sus siglas en inglés) y el ftalato de dimetilo (DMP), y de mayor longitud de cadena, como el ftalato de dibutilo (DBP) y el ftalato de di(2-etilhexilo) (DEHP).

De todos estos ftalatos que entran al organismo, cerca del 20% (generalmente los más pequeños) se excretan por el sudor, por eso es bueno sudar cuando hacemos ejercicio o vamos a baños de vapor. Los ftalatos más grandes se excretan por la orina en un 40%. La mayor parte de ellos, junto con los microplásticos, se excretan en las heces y en la bilis.

Los ftalatos tardan unos minutos en ser absorbidos por la piel o por el tracto digestivo y entre 2 y 24 h en ser eliminados. Los ftalatos que no se excretan se van acumulando poco a poco en la grasa (Domínguez-Romero y Scheringer, 2019), pero no solo en la grasa

asociada a la obesidad (“panza-cervecera”), sino también en la grasa de muchos otros tejidos. Se han encontrado ftalatos en orina, sangre, heces, sudor, riñones, hígado, cerebro, testículos e incluso en la leche materna y en el líquido amniótico.

Por ejemplo, el DEHP se excreta en la orina en menos de 24 horas, lo cual es una muy buena noticia. Pero no se logra excretar todo el DEHP que entra al cuerpo en un solo día; se ha calculado que eliminamos solamente entre el 15 y el 40% del DEHP que ingresa al cuerpo (3.6 µg/kg/peso corporal/día) (Clark et al., 2002; Lyche et al., 2009), mientras que de otros ftalatos no hay reportes científicos.

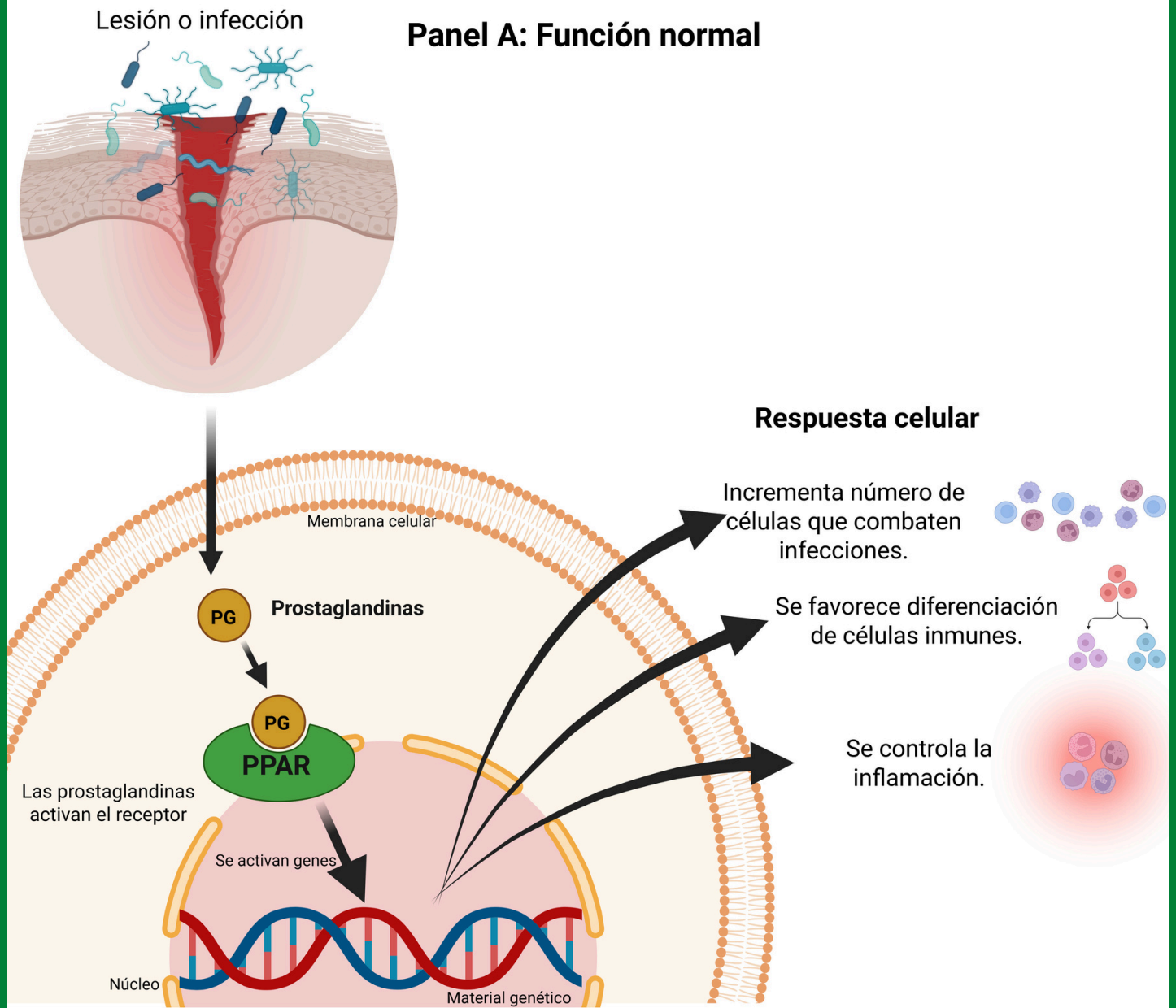


Figura 4. Panel A. Función normal. Ante una lesión o infección, las prostaglandinas (PG) se producen en la célula y se unen a receptores nucleares del tipo PPAR, lo que activa la expresión de genes que regulan la respuesta inmune. Este proceso favorece la proliferación y la diferenciación de las células inmunes y contribuye al control de la inflamación.

Eso depende del tipo de ftalato involucrado y del tejido en el que se esté acumulando. Por ejemplo, el dibutil ftalato (DBP) y el DEHP tienen principalmente efectos sobre la reproducción, mientras que el diisonil ftalato (DINP) y el diisodecil ftalato (DIDP) tienen principalmente efectos en el hígado. En el caso del DEHP, una vez que entra al cuerpo, es procesado por el hígado para ser excretado más fácilmente en la orina, con lo cual pierde en su estructura un alcohol y se convierte en mono(2-etilhexil) ftalato (MEHP); sin embargo, estructuralmente se parece mucho a la de una prostaglandina.

Las prostaglandinas son pequeñas hormonas que se producen en casi todos los tejidos ante lesiones o infecciones para regular la inflamación, el dolor y la fiebre (Fig. 4). Para regular el sistema inmune, las prostaglandinas se unen a receptores llamados receptores activados por proliferadores de peroxisomas (PPAR), localizados en el núcleo de las células. Algunos de estos receptores, cuando se unen a las

3. ¿Cómo es que los ftalatos producen enfermedades crónico-degenerativas o afectan al sistema inmune?

prostaglandinas, aumentan el número de células que combaten las infecciones, mientras que otros favorecen la diferenciación de las células inmunes. Cuando los ftalatos se unen a los PPAR, interfieren con las prostaglandinas (Ahmadian et al., 2013); por ello, si tenemos ftalatos acumulados en nuestro organismo y nos infectamos, nuestro cuerpo ya no puede producir las células necesarias para combatir la infección ni detectar células cancerosas. Así que, en primera instancia, los ftalatos afectan al sistema inmune y la capacidad de resistir las enfermedades infecciosas.

Es importante señalar que el efecto de los ftalatos puede ser a más largo plazo. Si un ftalato se acumula en el cerebro, ya no podemos reparar y producir nuevas células nerviosas y, por lo tanto, se pueden desarrollar enfermedades degenerativas como la demencia, el Parkinson o Alzheimer, particularmente en personas genéticamente predispuestas (Yang et al., 2023; Li et al., 2026; Agin et al., 2020). Las PPAR también regulan la producción de hormonas sexuales, por lo que pueden alterar la reproducción (Genuis et al., 2012). Además, si se acumula en la grasa que rodea el aparato reproductor o en las glándulas mamarias, puede desarrollarse cáncer (Dueñas-Moreno et al., 2024), dado que el sistema inmune no se deshace de las células que se dividen de manera descontrolada y continua. Una forma que tiene el cuerpo de tratar de disminuir el efecto nocivo de los ftalatos y otras toxinas es acumularlas rodeadas de mucha grasa, para que no afecten otros tejidos. Entonces, se desarrolla la obesidad y, con ella, la inflamación del síndrome X, asociada a enfermedades cardiovasculares, diabetes, etc. (Luis et al., 2021).

4.¿Por qué se siguen usando los ftalatos?

Probablemente al principio de su uso, no se conocían los efectos de los ftalatos sobre la salud humana. Actualmente, solo algunos ftalatos se han estudiado lo suficiente como para asociarse con el cáncer y otras enfermedades. La evidencia ha emergido poco a poco porque los ftalatos se encuentran en concentraciones relativamente bajas, lo que dificulta su detección. Cada tipo de ftalato entra en el cuerpo por diferentes vías, sale por otras y produce distintos efectos. El más estudiado es el DEHP; en algunos países, particularmente en la Comunidad Europea, el uso de DEHP ya está restringido. Gracias a los estudios de Bustamantes-Montes et al. (2004), se logró que las compañías en México fabricantes de mamilas y juguetes para infantes dejaran de usar DEHP, pero su uso no está oficialmente regulado. En México, se ha analizado la presencia de ftalatos en agua embotellada (Espino et al., 2014) y en nueve alimentos de la canasta básica (García-Fabila, 2021), incluyendo tortillas (García-Lara et al., 2018). En EUA, la Comisión para la Seguridad de los Productos de Consumo (CPSC, por sus siglas en inglés) prohíbe desde 2017 cantidades superiores al 0.1% de cada ftalato, en juguetes y ropa de dormir para menores de tres años (CPSC, 2017), mientras que en México no se encontró información sobre su regulación en juguetes y productos infantiles, pero sí en productos de cuidado personal, donde de acuerdo con la Secretaría de Gobernación (2010) se permiten niveles relativamente más altos de ftalatos con respecto a regulaciones internacionales. Como sociedad, podemos informarnos y presionar para no usar productos que contengan ftalatos y regular su uso en el país.

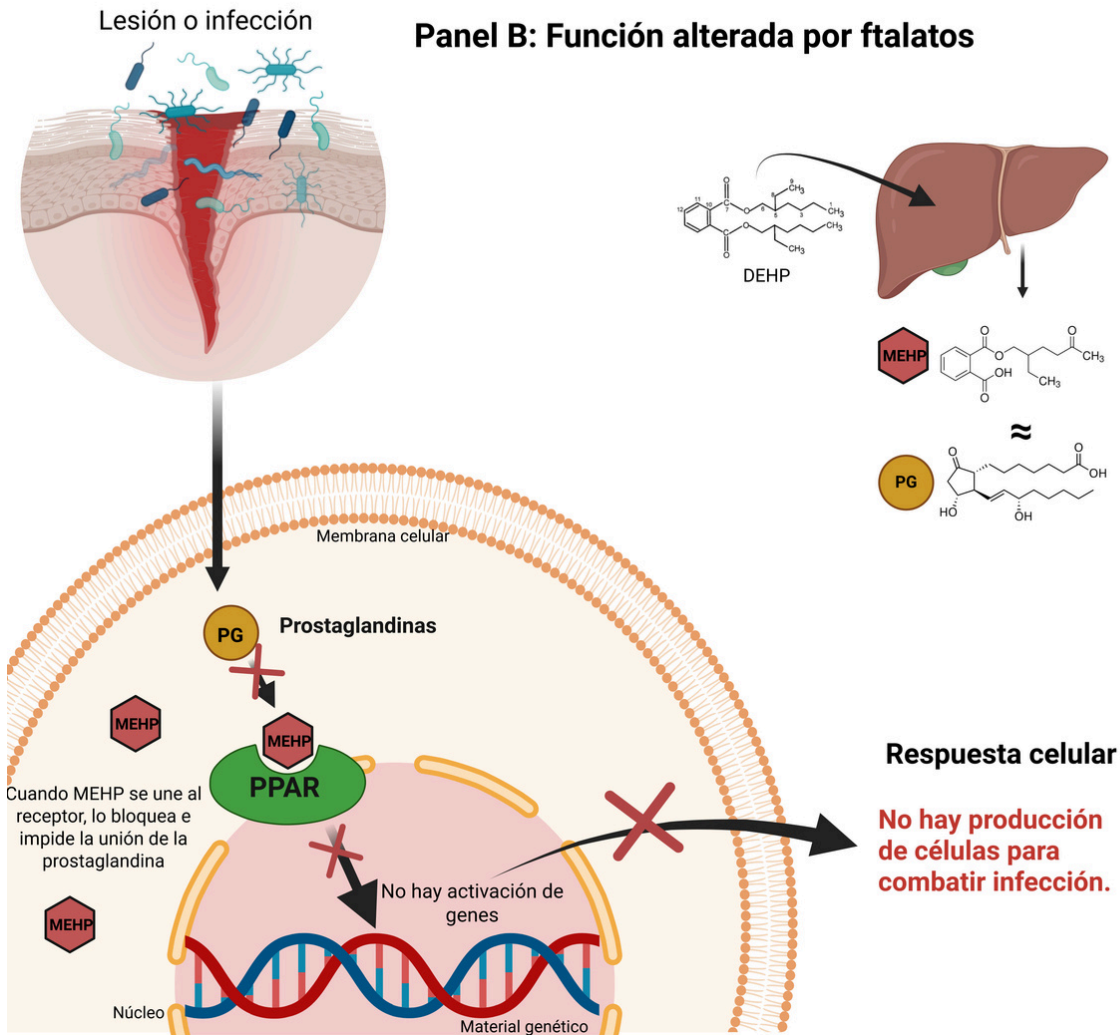


Figura 4. Panel B. Algunos ftalatos como el DEHP se metabolizan en el hígado y producen mono (2-etilhexil) ftalato (MEHP). Este compuesto puede unirse a los receptores PPAR debido a su similitud estructural con las prostaglandinas, bloqueando su unión e impidiendo la activación de genes asociados a la respuesta inmune. Como consecuencia, se reducen la producción y la diferenciación de las células encargadas de combatir infecciones.

5. ¿Qué podemos hacer para eliminar los ftalatos?

Aun si los plastificantes derivados del petróleo han dominado el mercado por su efectividad y su relativo bajo costo, su impacto negativo en la salud general de los organismos, incluido el humano, y su persistencia en el ambiente han provocado restricciones regulatorias y la búsqueda de alternativas más seguras. Actualmente se están desarrollando plastificantes biológicos derivados de aceites vegetales provenientes de la soya, la chía y el ricino, así como del ácido cítrico y del limoneno (compuestos abundantes en los limones y

naranjas), del almidón y de las cáscaras de la nuez de la India, entre otros (Akhundzada et al., 2026).

La transición del uso de plastificantes tradicionales a estos nuevos de origen biológico ayudará tanto a la recuperación de la salud de los organismos como a disminuir la huella ecológica causada por los plásticos en todo el mundo. Sin embargo, además de las acciones preventivas, la naturaleza cuenta con mecanismos propios para enfrentar este tipo de contaminación. ¿Por ejemplo, sabías que algunas bacterias y hongos pueden alimentarse de ftalatos? Así es, diversos estudios han demostrado que algunos

microorganismos son capaces de utilizar los ftalatos como fuente de carbono y energía, transformándolos en compuestos más simples y menos tóxicos, como dióxido de carbono (CO₂), agua y biomasa microbiana (González-Márquez et al., 2019). Este proceso ocurre gracias a la acción de enzimas específicas, como esterasas y dioxigenasas, que permiten hidrolizar los enlaces éster y, posteriormente, degradar el anillo aromático del compuesto (Zhang et al., 2018). Sin embargo, no todos los microorganismos poseen esta capacidad, solo aquellos que cuentan con ciertos tipos de enzimas pueden aprovechar los ftalatos como fuente adicional de carbono en ambientes contaminados. Desde una perspectiva ecológica, poseer estas enzimas representa una ventaja adaptativa para estos microorganismos, ya que les permite aprovechar un recurso que otros organismos no pueden utilizar. En este sentido, la degradación de ftalatos constituye una estrategia metabólica que favorece la supervivencia, el crecimiento y la competitividad en nichos afectados por estos contaminantes o compuestos químicos.

La eficiencia de la degradación microbiana de ftalatos está influenciada por diversos factores ambientales, entre ellos la temperatura, el pH, la salinidad, la disponibilidad de nutrientes y la presencia o ausencia de oxígeno (Kaur et al., 2023). No obstante, la concentración y la biodisponibilidad del sustrato suelen ejercer un efecto determinante en la dinámica del proceso (Gharasoo et al., 2015). Por ejemplo, concentraciones elevadas de ftalatos pueden generar efectos tóxicos e inhibir la actividad microbiana (Semple et al., 2004), mientras que concentraciones muy bajas pueden limitar la tasa de degradación al reducir la probabilidad de contacto y de aprovechamiento del compuesto (Bosma et al., 1996). Por ello, el estudio de nuevos microorganismos con capacidad degradadora de ftalatos y otros plastificantes requiere no solo su aislamiento y caracterización, sino también la evaluación de las

condiciones ambientales que optimicen su actividad metabólica y favorezcan una degradación más eficiente. El aprovechamiento dirigido de estas capacidades biológicas para reducir o eliminar contaminantes del ambiente se conoce como biorremediación.

Individualmente, podemos escoger productos libres de ftalatos, dejar de usar botellas de plástico, usar cremas, jabones y desodorantes sin fragancia, no usar bolsas de plástico ni ropa de poliéster, a favor de fibras como la lana o el algodón. Podemos hacer ejercicio para sudar y eliminar los ftalatos; evitar el consumo de alimentos empacados en plástico y optar por alimentos frescos. Algunos alimentos, como los frijoles y el tamarindo, atrapan de forma natural ftalatos y otros microplásticos y, además, contribuyen a que se excreten en las heces. Hay opciones, pero hay que mantenerse informado.

6. Referencias

- Agin, A., Blanc, F., Bousiges, O., Villette, C., Philippi, N., Demuyneck, C., Martin-Hunyadi, C., Cretin, B., Lang, S., Zumsteg, J., Namer, I. J., y Heintz, D. (2020). Environmental exposure to phthalates and dementia with Lewy bodies: Contribution of metabolomics. *Journal of Neurology, Neurosurgery & Psychiatry*, 91(9), 968-974. <https://doi.org/10.1136/jnnp-2020-322815>.
- Akhundzada, H.V., Khankishiyeva, R., Mammadova, G., Mammadov, A., Azizova, A., Salehov, A., Valiyeva, S., y Salmanov, F. (2026) Advancements and environmental impacts of plasticizers: A comprehensive review of current trends and sustainable alternatives. *Journal of thermoplastics composite materials* 0(0). <https://doi.org/10.1177/08927057261427394>.
- Ahmadian, M., Suh, J. M., Hah, N., Liddle, C., Atkins, A. R., Downes, M., y Evans, R. M. (2013). PPAR γ signaling and metabolism: the good, the bad and the future. *Nature medicine*, 19(5), 557-566. <https://doi.org/10.1038/nm.3159>.

- Bosma, T.N.P., Middeldorp, P.J.M., Schraa, G., y Zehnder, A.J.B. (1996). Mass transfer limitation of biotransformation: quantifying bioavailability. *Environmental Science & Technology*, 31(1), 248-252. <https://doi.org/10.1021/es960383u>.
- Bustamante-Montes, L. P., Lizama-Soberanis, B., Vázquez-Moreno, F., García-Fábila, M. M., Corea-Téllez, K. S., Olaiz-Fernández, G., y Borja-Aburto, V. H. (2004). Exposición infantil a plastificantes potencialmente tóxicos en productos de uso oral. *Salud Pública de México*, 46(6), 501-508.
- Clark, K., Cousins, I. T., y Mackay, D. (2002). Assessment of critical exposure pathways. En *Series Anthropogenic Compounds: phthalate esters* (pp. 227-262). Springer. <https://doi.org/10.1007/b11468>.
- Consumer Product Safety Commission (CPSC). (2017). Prohibits Certain Phthalates in Children's Toys and Child Care Products. Disponible En: <https://www.cpsc.gov/Newsroom/News-Releases/2018/CPSC-Prohibits-Certain-Phthalates-in-Childrens-Toys-and-Child-Care-Products>.
- Domínguez-Romero, E., y Scheringer, M. (2019). A review of phthalate pharmacokinetics in human and rat: what factors drive phthalate distribution and partitioning? *Drug metabolism reviews*, 51(3), 314-329. <https://doi.org/10.1080/03602532.2019.1620762>.
- Dueñas-Moreno, J., Mora, A., Capparelli, M. V., González-Domínguez, J., y Mahlkecht, J. (2024). Potential ecological risk assessment of microplastics in environmental compartments in Mexico: A meta-analysis. *Environmental Pollution*, 361, 124812. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2024.124812>.
- Espino, F. G., Montes, L. P. B., y Fábila, M. G. (2014). Presencia de ftalatos en bebidas en el estado de México. *Revista Iberoamericana para la Investigación y el Desarrollo Educativo*, 5(11).
- García Fabila, M. M. 2022. Ftalatos de dialquilo en alimentos de consumo de la población infantil del Valle de Toluca. (Tesis Doctoral, Universidad Autónoma del Estado de México). <https://ri.uaemex.mx/handle/20.500.11799/112604>.
- García Lara, B., Enciso Donis, I., Wrobel, K., y Wrobel, K. (2018). Determination of six priority phthalates and di (ethylhexyl) adipate in maize tortilla by gas chromatography-tandem mass spectrometry in multiple reaction monitoring mode. *Journal of the Mexican Chemical Society*, 62(2), 270-281. <https://doi.org/10.29356/jmcs.v62i2.359>.
- Genuis, S. J., Beesoon, S., Lobo, R. A., y Birkholz, D. (2012). Human elimination of phthalate compounds: blood, urine, and sweat (BUS) study. *The Scientific World Journal*, 2012(1), 615068. <http://doi.org/10.1100/2012/615068>.
- Gharasoo, M., Centler, F., Van Cappellen, P., Wick, L.Y., y Thullner, M. (2015). Kinetics of substrate biodegradation under the cumulative effects of bioavailability and self-inhibition. *Environmental Science & Technology*, 49(9): 5529-5537. <http://doi.org/10.1021/es505837v>.
- González-Márquez, A., Loera-Corral, O., Santacruz-Juárez, E., Tlécuítl-Beristain, S., García-Dávila, J., Viniegra-González, G., y Sánchez, C. (2019). Biodegradation patterns of the endocrine disrupting pollutant di (2-ethyl hexyl) phthalate by *Fusarium culmorum*. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 170: 293-299. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2018.11.140>.
- Kaur, R., Kumari, A., Rajput, V.D., Minkina, T., y Rajinder, K. (2023). Biodegradation of phthalates and metabolic pathways: an overview. *Environmental Sustainability*. 6: 303-318. <https://doi.org/10.1007/s42398-023-00268-7>.
- Lí, J., Yin, H., Qiu, Z., Fu, Y., Luo, Y., Wu, T., Zeng, Z., Qiu, Z., Deng, X., Wu, S., Zhang, Y., Cui, X., y Jiang, M. (2026). Exploring the phthalates-induced neurotoxicity mechanisms of neurodegenerative diseases via network toxicology, single-cell transcriptomics and molecular dynamic simulation. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 312: 119954. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2026.119954>.

Luís, C., Algarra, M., Câmara, J. S., y Perestrelo, R. (2021). Comprehensive insight from phthalates occurrence: From health outcomes to emerging analytical approaches. *Toxics*, 9(7), 157. <http://doi.org/10.3390/toxics9070157>.

Lyche, J. L., Gutleb, A. C., Bergman, Å., Eriksen, G. S., Murk, A. J., Ropstad, E., Saunders, M., y Skaare, J. U. (2009). Reproductive and developmental toxicity of phthalates. *Journal of Toxicology and Environmental Health, Part B*, 12(4), 225-249. <https://doi.org/10.1080/10937400903094091>.

Secretaría de Gobernación. (2010). Acuerdo por el que se determinan las sustancias prohibidas y restringidas en la elaboración de productos de perfumería y belleza. *Diario Oficial de la Federación*. <https://www.dof.gob.mx/>.

Semple, K.T., Doick, K.J., Jones, K.C., Burauel, P., Craven, A., y Harms, H. (2004). Defining bioavailability and bioaccessibility of contaminated soil and sediment is complicated. *Environmental Science & Technology*, 38(12), 228-231. <https://doi.org/10.1021/es040548w>.

Yang, Y., Zhang, X., Liu, Y., Li, Q., y Wang, Z. (2023). Di-(2-ethylhexyl) phthalate induces neurobehavioral impairment via oxidative stress and neuroinflammation in mice. *Environmental Pollution*, 184, 120567. <https://doi.org/10.1016/j.fct.2023.114372>.

Zhang, J., Zhang, Ch., Zhu, Y., Li, J., y Li, X. (2018). Biodegradation of seven phthalate esters by *Bacillus mojavensis* B1811. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 132, 200-207. <https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2018.04.006>.

Sobre el autor de correspondencia:

La Dra. Elena. Palacios Mechetnov es especialista en metabolismo de lípidos. Actualmente, dirige un proyecto número CBF2023-2024-4548 de análisis de ftalatos y su efecto sobre la salud.

Cita:

Duran-Encinas, Y., Barajas-Sandoval, D., Sánchez-Otero, M.-G., Hurtado-Oliva, M. Á., Olivia, A., & Palacios Mechetnov, E. (2026). Ftalatos: los compuestos ocultos en los plásticos y su impacto en la salud. *Biotechnológica Magazine*, 4(2), 42-51. <https://doi.org/10.5281/zenodo.20146996>

Escarbando en ADN antiguo

Patricia Hernández Cortés

Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste, S. C. Av. Instituto Politécnico Nacional 195, Playa Palo de Santa Rita Sur; La Paz, B.C.S., México; c.p. 23096.

pato@cibnor.mx

Foto: Joaquín Corbalan

Tema:

La paleoquímica y la paleogenética han revelado aspectos de la adaptación de las distintas especies de homínidos ancestrales que los restos de huesos fosilizados por sí solos no pueden mostrar. Gracias a que, en determinadas condiciones, el ADN puede preservarse durante miles de años, hoy podemos obtener información clave sobre seres humanos del pasado.

Nuestros primos hermanos

El primer gran hito de la paleogenética ocurrió en 2010 cuando se obtuvo el genoma completo del neandertal. La comparación entre este genoma y el humano arrojó luz sobre la evolución de esta especie extinta. Al analizar las secuencias de neandertales y de humanos modernos, se dedujo que en algún momento ambas especies se mezclaron reproductivamente (Fig. 1). No es de extrañar, por tanto, que los europeos y asiáticos modernos compartan entre el 1 % y el 4 % de sus genes, respectivamente, con los neandertales.

En 2011 se descubrió un nuevo homínido, el denisovano, que hasta hoy no cuenta con una designación taxonómica oficial como especie, fue identificado gracias a un pequeño fragmento de hueso perteneciente a una mujer que vivió hace más de 50,000 años en una cueva de Siberia. Los denisovanos, los neandertales y los humanos modernos se aparearon al menos ocasionalmente durante la era del hielo. En otra localidad de China se encontró otro denisovanano a una altitud de 3,280 metros. La altitud en la que se encontraron los restos sugiere que este homínido evolucionó en ambientes con baja concentración de oxígeno. Esta característica fue eventualmente transmitida a algunos tibetanos modernos.



Figura 1. Svante Pääbo. Director del Departamento de Genética del Instituto Max Planck de Antropología Evolutiva en Leipzig, Alemania. Premio Nobel de Medicina o Fisiología, 2022. Autor: Frank Vinken. Consultado 06/03/2026.

En 2022, el sueco Svante Pääbo, del Instituto Max Planck de Antropología Evolutiva de Alemania, fue galardonado con el Premio Nobel por estos descubrimientos sobre los genomas de homínidos extintos y la evolución humana (Fig. 2).

Pero al no contar con restos fosilizados de individuos completos, o al menos de sus cráneos, los científicos no tenían forma de saber cuál era el aspecto de los denisovanos y no podían identificar fósiles que ya pudieran estar en colecciones de museos. Esto cambió el pasado año cuando investigadores en China pudieron extraer ADN de un cráneo encontrado décadas atrás en la localidad de Harbin (Fu et al., 2025). La muestra se obtuvo raspando la placa endurecida de un solo diente. Si bien el material genético de la placa dental proviene principalmente de bacterias, también incluye ADN de la saliva y de otros fluidos de la boca. Proteínas de la placa dentaria de otros fósiles confirman que los denisovanos presentaban arcos superciliares prominentes, protuberancias ubicadas sobre las cuencas de los ojos, donde se encuentran las cejas, además de huesos gruesos y una mandíbula poderosa (Fig. 3). Con la identidad revelada, será más

fácil identificar otros denisovanos basándose en la forma de sus huesos y dientes. Encontrar más individuos ayudará sin duda a descifrar el debate si estos homínidos son una subespecie del *Homo sapiens* o una especie por sí misma.

Hace mucho, mucho tiempo

El ADN recuperado de huesos y dientes antiguos también ofrece perspectivas sobre migraciones poblacionales de hace mucho tiempo, la evolución de algunas enfermedades contagiosas y la dieta prehistórica. También puede revelar relaciones familiares para reconstrucciones genealógicas de miles de años. Con el auge de la secuenciación de genomas humanos antiguos, es posible estudiar fragmentos idénticos de código genético compartidos por distintas personas. Con esta información, los investigadores pueden estimar qué tan estrecha es la relación entre dos personas, aunque estén enterradas a 1,500 kilómetros de distancia, como se ha realizado con muestras en la estepa de Eurasia de hace 5,000 años.

Con datos arqueológicos, tales como la edad del esqueleto, el sitio en el que fueron enterrados y las relaciones genéticas de familiares enterrados cerca, pueden reconstruirse árboles genealógicos de hasta ocho generaciones. Entender el parentesco genético proporciona información sobre sociedades antiguas. En 2023 se usaron datos de ADN de caciques celtas de hace 2,500 años enterrados en el sur de Alemania y, combinados con detalles de sus cementerios, se llegó a la conclusión de que estos heredaban el poder por vía materna (Curry, 2023).

Otra información que proporcionan los genes es el legado que algunas enfermedades dejan en el pasado remoto. La peste negra, provocada por la bacteria *Yersinia pestis* y que era transmitida por las pulgas, diezmó a la mitad de la población europea hace 700 años (Fig. 4). Esta devastadora pandemia actuó como una potente fuerza selectiva, favoreciendo a las personas con un sistema inmune eficaz. La detección de esta enfermedad en los restos de personas vivas es imposible, ya que los patógenos han impulsado la evolución de algunos genes responsables del funcionamiento de nuestro sistema inmunitario.

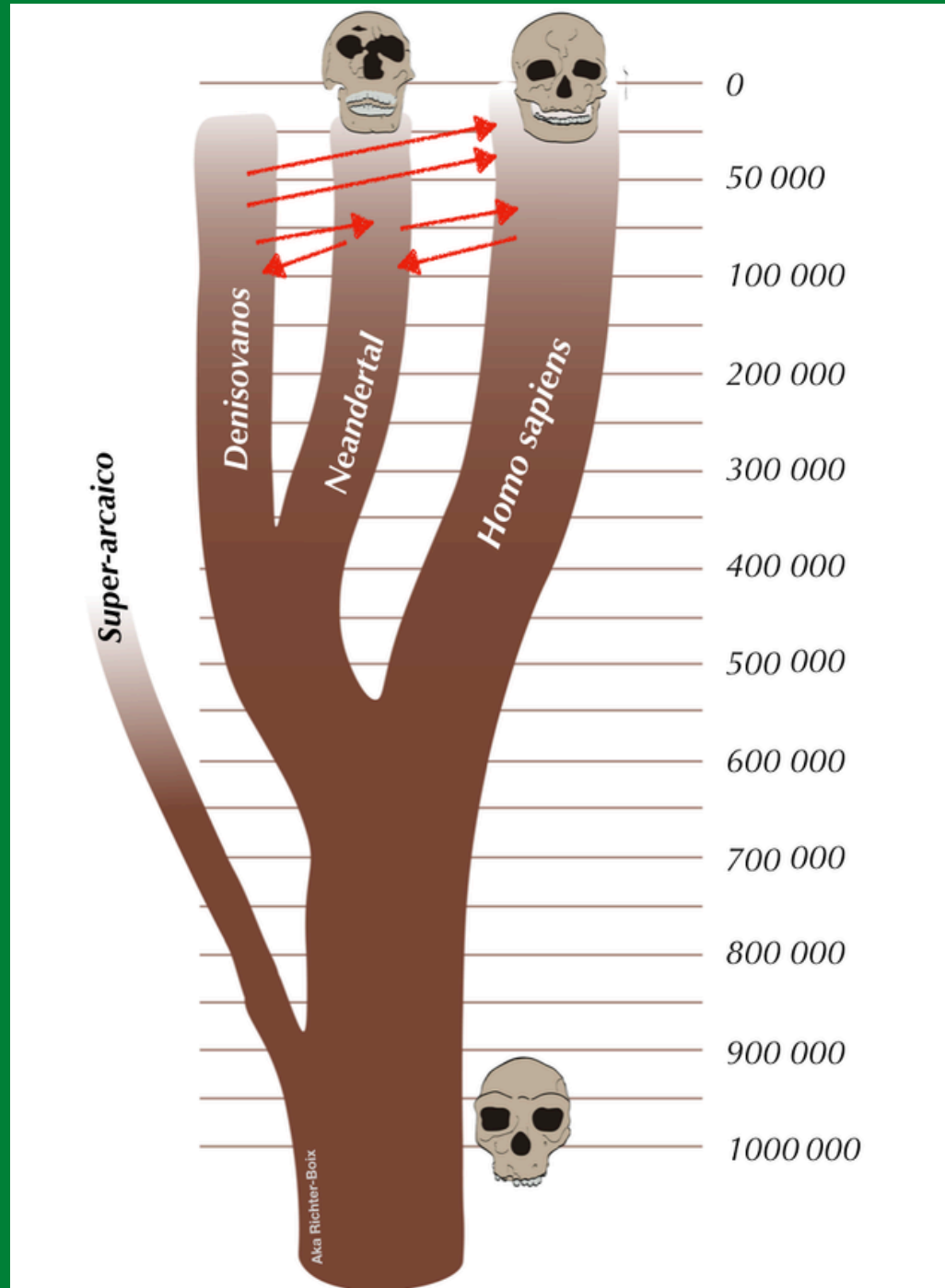


Figura 2. Árbol evolutivo humano del último millón de años, donde se aprecia la ramificación del grupo de los neandertales y los denosivanos, respecto a la de los humanos modernos, que se remonta a hace poco más de 500,000 años. Las flechas rojas representan diferentes períodos de intercambio genético entre unos grupos y otros. Tomado de [EvOikos](#), blog de biología y ecología evolutiva. Consultado 06/03/2026.



Figura 3. Aspecto deducido de los denosivanos a partir del cráneo encontrado Harbin al noroeste de China (tomado de Austin, 2021).

En 2022 se desarrollaron técnicas para identificar genes que codifican proteínas del sistema inmunitario tanto en personas que murieron por esta bacteria, como en quienes sobrevivieron a la plaga (Fig. 4). Un grupo de investigadores analizó el ADN de más de 500 personas enterradas en Londres y en Dinamarca antes, durante y después de la peste negra (Klunk et al., 2022). Entre los sobrevivientes, era más frecuente que portaran variantes de genes que estimulan una respuesta inmune frente a *Yersinia pestis*. Un gen en particular destacó: el *ERAP2*, que codifica una aminopeptidasa, una enzima que corta enlaces de proteínas y ayuda a las células del sistema inmune a reconocer y pelear contra patógenos. Una de las variantes de *ERAP2* produce la proteína completa, mientras que la otra produce una versión truncada. Las personas que heredan dos copias de la variante que codifica la enzima íntegra tenían 40% de probabilidades de sobrevivir que las que heredan dos copias de la variante trunca. En experimentos con cultivos de células del sistema inmune, se encontró que

los portadores con una copia doble de *ERAP2* también producían una mayor cantidad de citocinas y otras proteínas clave del sistema inmune, lo que hacía que la respuesta del sistema de defensa fuera más eficiente. La variante protectora *ERAP2* sigue presentándose en el 45% de la población actual de Gran Bretaña. La persistencia de esta variante sugiere que continúa favoreciéndose por selección natural hasta hoy, probablemente porque la plaga fue endémica en Europa y Asia hasta inicios del siglo diecinueve. Pero esta protección tiene un precio: la misma variante también conlleva un alto riesgo de desarrollar enfermedades autoinmunes, como la artritis reumatoide. Las técnicas de extracción y secuenciación del ADN se siguen mejorando y podrían ayudar a responder más preguntas, no solo sobre nuestros orígenes, sino también sobre el ascenso y la extinción de especies ancestrales.

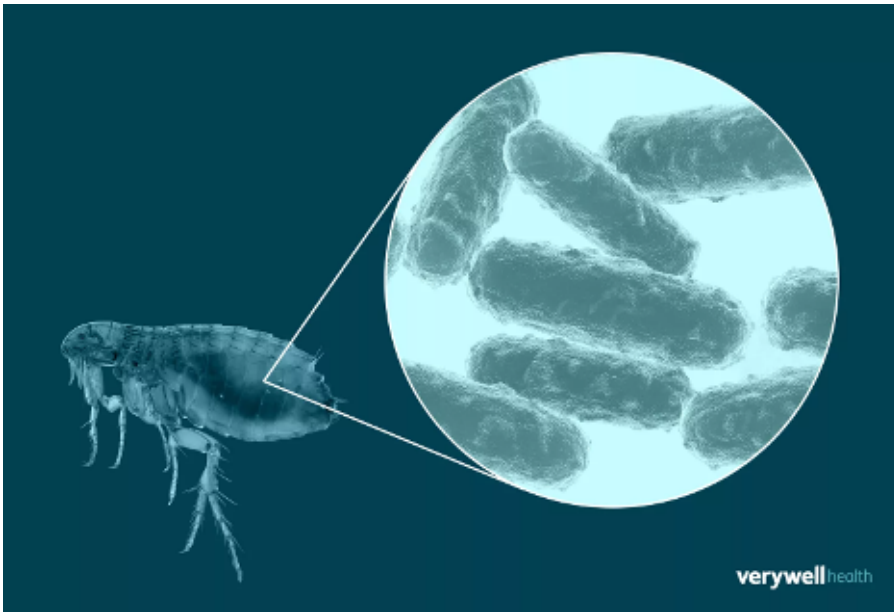


Figura 4. La peste negra, provocada por la bacteria Yersinia pestis era transmitida por las pulgas (Photo Illustration by Amelia Manley for Verywell Health; Getty Images, tomada de Brown, 2024).

Referencias

Austin H. (2021). Discovery of ‘Dragon man’ skull in China prompts rethink of human evolution. NBC News. Consultado 06/03/2026.

Brown A. (2024). Why Are We Still Hearing About Bubonic Plague in 2024? Verywell Health. Consultado 06/03/2026.

Curry A. (2023). Family ties. *Science*, 382(6666), 24-27. <https://doi: 10.1126/science.adl1577>.

Fu, Q., Cao, P., Dai, Q., Bennett, E. A., Feng, X., Yang, M. A., et al. (2025). Denisovan mitochondrial DNA from dental calculus of the > 146,000-year-old Harbin cranium. *Cell*, 188(15), 3919-3926. <https://doi.org/10.1016/j.cell.2025.05.040>.

Klunk, J., Vilgalys, T. P., Demeure, C. E., Cheng, X., Shiratori, M., Madej, J., et al. (2022). Evolution of immune genes is associated with the Black Death. *Nature*, 611(7935), 312-319. <https://doi.org/10.1038/s41586-022-05349-x>.

La milagrosa difusión de la vida hacia el vacío

Arturo Sánchez-Paz

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

Vivir significa dejar huellas. Todo lo que cotidianamente nos rodea inevitablemente preserva algo nuestro. No hay lugar en el que los organismos vivos no hayamos dejado huella.

El exquisito libro Blanco de la escritora sudcoreana Han Kang, publicado en 2017, reúne una serie de relatos breves en los que, con delicadeza, describe, entre las frágiles páginas de sus textos, diversas cosas cotidianas. Curiosamente, todas esas cosas que Kang describe con una impresionante fuerza creativa son blancas: sal, nieve, luna, arroz, leche materna, olas... En algunas culturas orientales, como la coreana, el blanco es el color tradicional del luto, de la muerte y del adiós. Es una señal de respeto y serenidad. Y precisamente, la autora opta por escribir sobre cosas blancas como un proceso transformador, “algo así como un ungüento blanco

aplicado sobre una hinchazón, como una gasa colocada sobre una herida. Algo que necesitaba”. Un vendaje para sanar el dolor que la ausencia de una hermana que no conoció le causa, una hermana que murió en los brazos de su madre “sintiendo cómo el frío entraba poco a poco en la carne, hundiéndose hasta los huesos”.

En el relato “Nube de aliento”, Kang relata que “En las mañanas frías, esa primera nube blanca de aliento que escapa es prueba de que estamos vivos. Prueba del calor de nuestros cuerpos. El aire frío entra a raudales en nuestros pulmones oscuros, absorbe el calor de nuestro cuerpo y se

exhala como una forma perceptible, blanca salpicada de gris. La milagrosa difusión de nuestras vidas hacia el vacío". Difícilmente encontraré una forma más poética de expresar que la vida deja huella y ha transformado cada espacio de nuestro planeta.

De acuerdo con el primer libro de la Biblia, el Génesis, "en el principio todo era caos, oscuridad y silencio". Moisés, al que se le atribuye la autoría de este libro, olvidó mencionar (o quizá no lo sabía) que "en el principio tampoco había oxígeno". La ausencia inicial de este elemento es fundamental para entender la historia de nuestro planeta. Cuando la Tierra se formó hace 4,500 millones de años, el aire apenas contenía un 0.0001 % de oxígeno. La evidencia más reciente sugiere que la atmósfera terrestre primitiva estaba compuesta por nitrógeno (N_2), dióxido de carbono (CO_2), monóxido de carbono (CO), agua (H_2O) y, en menor medida, metano (CH_4), hidrógeno y oxígeno. Actualmente, nuestra atmósfera contiene poco menos del 21 % de este gas (el resto es básicamente N_2 , que constituye el 78 % de la atmósfera). Nuestra atmósfera no ha sido una masa estática de gases. Diversos factores han contribuido a su evolución.

Para comprender como surgió una atmósfera rica en oxígeno, es necesario examinar los procesos que contribuyeron a su establecimiento. Antes de que se formara la atmósfera rica en oxígeno en la que habitamos hoy, la concentración de este gas era apenas detectable. Se ha sugerido que una pequeña cantidad de oxígeno llegó a la atmósfera mediante la "fotodisociación" del agua por la luz ultravioleta del sol. Debido a que nuestra atmósfera carecía de una capa de ozono que obstaculizara la entrada de la peligrosa radiación ultravioleta, esta "rompía" las moléculas de agua presentes en nuestro planeta, liberando hidrógeno (H_2) y oxígeno (O_2). El H_2 es un gas con una masa tan baja y una velocidad térmica tan alta que le permiten "escapar" de la gravedad terrestre (un

proceso que ocurre constantemente y se conoce como "escape de Jeans"). Por su parte, el oxígeno es un gas más pesado, por lo que la gravedad lo retiene en la atmósfera. La mayor parte del oxígeno así formado reaccionó con el hierro de las rocas y de los océanos, quedando atrapado para siempre en la corteza terrestre. La tasa a la que se producía oxígeno de esta forma debió ser muy similar a la de la formación de nuevas rocas y minerales que se exponían en la cambiante corteza terrestre. A este paso, el oxígeno difícilmente se acumularía en la atmósfera. Algo similar ocurrió en los planetas Venus y Marte. Lenta pero constantemente, estos planetas perdieron el agua que los cubría debido a la radiación ultravioleta, convirtiéndolos en lugares áridos y estériles.

Los primeros organismos que habitaron nuestro planeta aparecieron hace unos 3,800 millones de años. Estas primeras formas microscópicas de vida dependían de un metabolismo anaeróbico, es decir, no utilizaban oxígeno para obtener energía; en su lugar, dependían de compuestos inorgánicos (como algunos minerales o iones) presentes en el océano para generar energía. Eran tan anaeróbicas que, salvo algunas especies que toleraban el poco oxígeno que había, el oxígeno, el "elixir de la vida", las envenenaba. Entonces, hace unos 2,600 millones de años, apareció un grupo muy peculiar de microorganismos, las cianobacterias, que modificó el destino de la vida en la Tierra. Las cianobacterias poseen la notable capacidad de fotosintetizar (es decir, de generar energía a partir de la luz solar). En este proceso, las cianobacterias utilizan agua como fuente de combustible mediante su oxidación y, como subproducto, liberan oxígeno. Y lo generaban con tanta abundancia y a una velocidad tan alta que la cantidad de este gas que secuestraban los minerales ricos en hierro recién expuestos en la corteza terrestre era insignificante. Así, el oxígeno se fue acumulando en la atmósfera terrestre, evitando que el




Foto: natrot

agua evaporada escapara de nuestro planeta. A esta época de la historia de nuestro planeta, en la que la atmósfera terrestre primitiva experimentó un incremento considerable de la concentración de oxígeno libre, se le conoce como el *Gran Evento de Oxidación*.

Si lo vemos desde cierta perspectiva, la vida salvó a la Tierra de convertirse en una fría y estéril roca. Además, la “contaminación” de nuestra atmósfera con oxígeno, que “desechaban” las cianobacterias, impulsó el desarrollo y la evolución de formas de vida más complejas. Sin embargo, la evidencia sugiere que el oxígeno no se acumuló en nuestra atmósfera de forma rápida y constante; por el contrario, factores no biológicos, como la tectónica de placas y las glaciaciones, impulsaron la liberación de oxígeno en descargas repentinas. Cabe destacar que cada incremento significativo de los niveles de oxígeno atmosférico esté estrechamente relacionado con radiaciones biológicas significativas. De hecho, cada pulso de liberación de oxígeno actuó como un catalizador de innovaciones evolutivas que impulsaron la complejidad celular. Así, tras un pulso de oxígeno surgieron las primeras células eucariotas (poseen un núcleo). Después

de otro pulso de liberación de oxígeno, la vida en nuestro planeta experimentó una diversificación sin precedentes conocida como la *Explosión Cámbrica* (hace 541 millones de años). En este momento, los océanos se llenaron de organismos multicelulares complejos y se produjo una dramática transición de organismos de cuerpo blando a animales con estructuras endurecidas, como los artrópodos. Un pulso adicional de liberación de oxígeno, ocurrido hace unos 300 millones de años, durante el Carbonífero, propició que los niveles de este elemento en la atmósfera alcanzaran el 35 %, lo que generó las condiciones propicias para la aparición de insectos gigantes, como la libélula de 70 centímetros del género *Meganeura* o el famoso ciempiés gigante *Arthropleura*.

Considerando lo que se ha mencionado y como una metáfora, es necesario comentar que, de forma análoga a lo que expresó Han Kang en el libro Blanco, el oxígeno liberado por las cianobacterias podría ser el vaho exhalado en su relato “*nube de aliento*”: la milagrosa difusión de la vida de las cianobacterias hacia el vacío.

Todas las especies liberan ADN al ambiente a lo largo de su vida. En nuestro caso, a través de exhalaciones, al estornudar, al rascarnos y en nuestras excretas, liberamos una gran cantidad de material rico en ADN. Nuestra huella genética está dispersa en el aire que nos rodea. En 2013, el biólogo Matt Clark, del Museo de Historia Natural de Londres, y Richard Leggett, del Instituto Earlham de Norwich (Reino Unido), se sorprendieron al descubrir una enorme diversidad de ADN “flotando” en el aire que rodeaba un invernadero. Recientemente, Elizabeth Clare de la Universidad York de Toronto, Canadá, y Joanne Littlefair del University College de Londres, filtraron 72 muestras de aire en un área cercana a un zoológico de Cambridge que alberga cerca de 100 especies de animales. Posteriormente, extrajeron el ADN de las muestras y lo amplificaron por PCR. Los resultados de la secuenciación las sorprendieron. De las 72 muestras que se colectaron, 64 contenían ADN de vertebrados terrestres no humanos, incluidos lémures, tigres, suricatas y dingos. Aún más, en estas muestras se identificó ADN de vaca, pollos, caballos o cerdos, y los autores sugieren que pudo originarse del alimento que se les da a los carnívoros. Otro hallazgo relevante es que se detectó la presencia de ADN de algunos animales del zoológico a más de 200 metros del sitio donde estaban aislados (se encontró, por ejemplo, ADN de suricata a 245 metros del área donde habitan).

Es importante mencionar que parte del material genético obtenido a partir de muestras de aire puede provenir de seres humanos. Esto ha generado inquietud en diversos grupos, ya que la información genética que se obtenga puede utilizarse para determinar si alguien padece un trastorno genético, lo que podría ser aprovechado indebidamente por las aseguradoras para negar el acceso a seguros de gastos médicos o de vida. La privacidad de la información genética constituye un desafío ético fundamental. Por otro lado, la información obtenida del ADN humano

puede utilizarse para identificar a individuos concretos. Esto podría ser muy útil para resolver casos en investigaciones criminales, ya que permitiría identificar y localizar a criminales con alta precisión.

Las distintas formas de vida que han habitado nuestro planeta han dejado “huellas imborrables”, tanto físicas como químicas, a lo largo de 3,500 millones de años de historia. Desafortunadamente, los seres humanos, novatos en el planeta, hemos contaminado la atmósfera, los océanos, la Tierra. Estamos dejando una huella indeseable que puede tener graves consecuencias ambientales a muy corto plazo. Hemos habitado la Tierra desde hace unos 300,000 años, es decir, somos inquilinos del planeta desde el 0.007 % de los 4,500 millones de años de su historia. Si no comprendemos que debemos modificar nuestras actitudes hacia este maravilloso y único planeta en el que tuvimos la oportunidad de nacer, crecer, desarrollarnos y reproducirnos, quizá no merecemos habitarlo.

Referencias

- Chang, Y., Yu, Y., An, F., Luo, Z., Quan, D., Zhang, X., Hu, X., Li, Q., Yang, J., Chen, Z., Che, L., Zhang, W., Wu, G., Xie, D., Ashfold, M.N.R., Yuan, K., y Yang, X. (2021). Three body photodissociation of the water molecule and its implications for prebiotic oxygen production. *Nat. Commun.* 12(1), 2476. <https://doi.org/10.1038/s41467-021-22824-7>.
- Clare, E.L., Economou, C.K., Bennett, F.J., Dyer, C.E., Adams, K., McRobie, B., Drinkwater, R., y Littlefair, J.E. (2022). Measuring biodiversity from DNA in the air. *Curr. Biol.* 32(3), 693-700.e5. <https://doi.org/10.1016/j.cub.2021.11.064>.
- Dahl, T.W., Hammarlund, E.U., Anbar, A.D., Bond, D.P., Gill, B.C., Gordon, G.W., Knoll, A.H., Nielsen, A.T., Schovsbo, N.H., y Canfield, D.E. (2010) Devonian rise in atmospheric oxygen correlated to the radiations of terrestrial plants and large predatory fish. *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* 107(42), 17911-17915. <https://doi.org/10.1073/pnas.1011287107>.

Lu, Z., e Imlay, J.A. (2021). When anaerobes encounter oxygen: mechanisms of oxygen toxicity, tolerance and defence. *Nat. Rev. Microbiol.* 19(12), 774-785.
<https://doi.org/10.1038/s41579-021-00583-y>.

Sánchez-Baracaldo, P., y Cardona, T. (2020). On the origin of oxygenic photosynthesis and Cyanobacteria. *New Phytol.* 225, 1440-1446.
<https://doi.org/10.1111/nph.16249>.

Sobre el autor



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

Cita:

Sánchez-Paz, A. (2026). La milagrosa difusión de la vida hacia el vacío. *BiotecnoLogica Magazine*, 4(2), 57-61.
<https://doi.org/10.5281/zenodo.20147641>