

ciencia

Revista de la Academia Mexicana de Ciencias

Novedades científicas

De la copia al plagio

Umbrales e incertidumbre: claves para entender la actual crisis ambiental

Emergencia ambiental: el impacto de la minería en la salud humana y los ecosistemas

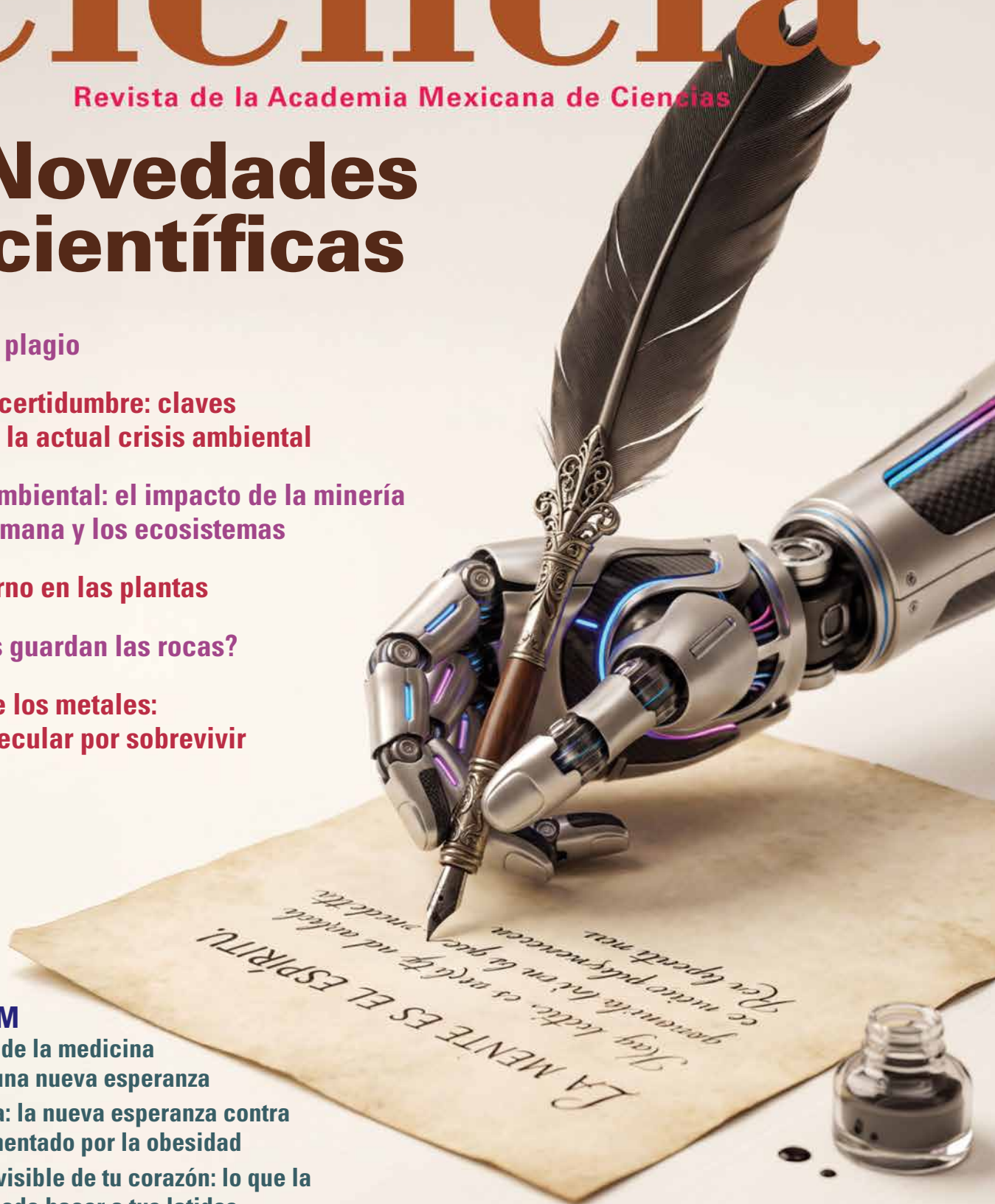
El papel materno en las plantas

¿Qué secretos guardan las rocas?

Guardianes de los metales: la batalla molecular por sobrevivir

DESDE LA UAM

- La revolución de la medicina traslacional, una nueva esperanza
- Inmunoterapia: la nueva esperanza contra el cáncer alimentado por la obesidad
- El enemigo invisible de tu corazón: lo que la diabetes le puede hacer a tus latidos
- ¿Qué más pone en riesgo el corazón de los mexicanos?
El descubrimiento de nuevos factores de riesgo cardiovascular





CONSEJO DIRECTIVO

agosto 2026 – agosto 2029

Presidenta

Telma Gloria Castro Romero

Vicepresidente

Rafael Bojalil Parra

Tesorero

Alejandro de Las Peñas Nava

Secretarios

María Regina Martínez Casas

Javier Miranda Martín del Campo

Presidentes de las Secciones Regionales de la AMC

Sección Noreste: Gloria María González González

Sección Noroeste: María Teresa Viana Castrillón

Sección Centro-Occidente: Alejandro De las Peñas Nava

Sección Centro-Sur: José Ramón Eguibar Cuenca

Sección Sur-Sureste: Dalila Aldana Aranda

ciencia

Revista de la Academia Mexicana de Ciencias

octubre-diciembre 2026 volumen 77 número 4

Desde el Comité Editorial	3
<i>Juan Pedro Laclette</i>	
Las personas detrás de la investigación	6
<i>Laura Vargas-Parada</i>	
Entre la ciencia y la sociedad	
Novedades científicas	
Gemelos digitales: el espejo virtual en la lucha contra el cáncer	14
<i>Jorge Enrique Arellano Villavicencio, Yael Alejandro Hernández Colín y Osbaldo Resendis Antonio</i>	
Neurotecnologías y neuroderechos: un mundo futurista haciéndose presente	22
<i>Alba Marcela Zárate Rochín, Jesús Maximiliano Guasso Rodríguez y Aníbal Medina Cabrera</i>	
El riesgo de las infecciones durante el embarazo: su relación con las enfermedades mentales	30
<i>Johaly del Carmen Anguiano Buenfil, Angélica Zepeda Rivera y Emilio J. Galván</i>	
El papel materno en las plantas	38
<i>Antonio Miranda-Jácome y Joel Flores</i>	
Silenciamiento de genes en plantas, una herramienta biotecnológica para la agricultura y la conservación	46
<i>Natalia-Getsemani Franco-Jiménez, Julio-Armando Massange-Sánchez y Rafael Urrea-López</i>	
El papel del calentamiento óhmico del maíz, una tecnología emergente para un proceso sustentable	54
<i>Uriel de Jesús Cruz Calderón, Marcela Gaytán Martínez y Anai Zavala Franco</i>	
Deshidratación atmosférica de alimentos: una forma de conservarlos mediante aire caliente	60
<i>Rodrigo E. Velasco Rebollo, Omar Jacobo Santos Sánchez y Liliam Rodríguez Guerrero</i>	
La armadura de azúcar que protege a las bacterias	68
<i>Nadia Rodríguez-Medina y Ulises Garza-Ramos</i>	
Guardianes de los metales: la batalla molecular por sobrevivir	74
<i>Fulvia Stefany Argueta Zepeda</i>	
¿Qué secretos guardan las rocas?	80
<i>Mario E. Boijseauneau-López, Antonio Pola y Hugo Sereno</i>	
Emergencia ambiental: el impacto de la minería en la salud humana y los ecosistemas	88
<i>Iris Guadalupe Vizcarra García y Magdalena Elizabeth Bergés Tiznado</i>	
Umbral e incertidumbre: claves para entender la actual crisis ambiental	96
<i>Salvador Sánchez-Carrillo, David G. Angelery y Miguel Álvarez-Cobelas</i>	
Explorando las estaciones hidrométricas	104
<i>Tomás Ramón Florville-Alejandro y René Ricardo Cuéllar Rodríguez</i>	
El sargazo: un problema que puede convertirse en oportunidad para el Caribe mexicano	112
<i>Marco A. Domínguez-Aguilar, Luis Felipe Ramírez-Verduzco y Norma Icoquih Zapata-Peñasco</i>	
El mar profundo ante el cambio climático: impactos en el ecosistema más grande del planeta	120
<i>Pedro H. López-Garrido y Elva Escobar Briones</i>	
De la copia al plagio	126
<i>María Dolores Flores Aguilar</i>	
Presentación	132
<i>Dr. Mario De Leo Winkler</i>	
El enemigo invisible de tu corazón: lo que la diabetes le puede hacer a tus latidos	134
<i>Julieta Anabell Díaz Juárez, Leoncio Morel Díaz y Arizbell Morel Díaz</i>	
La revolución de la medicina traslacional, una nueva esperanza	138
<i>Jaqueline Quevedo Ocampo, Maciel Juárez Ángeles y Luis E. Gómez Quiroz</i>	
¿Qué más pone en riesgo el corazón de los mexicanos? El descubrimiento de nuevos factores de riesgo cardiovascular	143
<i>Luis Manuel Amezcua Guerra</i>	
Inmunoterapia: la nueva esperanza contra el cáncer alimentado por la obesidad	147
<i>Arturo Simoni-Nieves</i>	
¿Leeuwenhoek llegó a México?	151
¿Por qué El Niño se está volviendo más intenso?	152
El telescopio Roman ya busca los secretos del universo	153
<i>José Eduardo González Reyes</i>	
Noticias de la AMC	154



Portada: Generada con Firefly.



Contraportada: Pixabay.

ciencia, revista de la Academia Mexicana de Ciencias, volumen 77, número 4, correspondiente a octubre-diciembre de 2026, es una publicación electrónica trimestral, editada y distribuida por la Academia Mexicana de Ciencias, A. C., con domicilio en Casa Tlalpan, km 23.5 de la Carretera Federal México-Cuernavaca, Av. Cipreses S/N, Col. San Andrés Totoltepec, Alcaldía Tlalpan, C. P. 14400, Ciudad de México, tel. 55 5849 4905, www.revistaciencia.amc.edu.mx, rciencia@unam.mx.

Editor responsable legal: Francisco Salvador Mora Gallagos. Número de Certificado de Reserva de Derechos al Uso Exclusivo del Título: 04-2001-072510183000-102, expedido el 25 de julio de 2001; ISSN 2954-5285, ambos otorgados por el Instituto Nacional del Derecho de Autor. Fecha de última modificación: 24 de marzo de 2023. Certificado de Licitud de Título y Contenido 17371, expedido por la Comisión Calificadora de Publicaciones y Revistas Ilustradas de la Secretaría de Gobernación.

El contenido de los artículos es responsabilidad exclusiva de sus autores y no refleja de manera alguna el punto de vista de la Academia Mexicana de Ciencias. Queda prohibida la reproducción total o parcial del contenido por cualquier medio sin la autorización expresa de la Academia Mexicana de Ciencias.

ciencia

Revista de la Academia Mexicana de Ciencias
octubre-diciembre 2026 volumen 77 número 4

Director fundador

Ignacio Bolívar Urrutia (1850-1944)

Director

Juan Pedro Laclette

Asesora

Laura Vargas-Parada

Comité editorial

Raúl Antonio Aguilar Roblero
Dalila Aldana Aranda
Raymundo Cea Olivares
Gabriela Dutrénil Bielous
Alonso Fernández Guasti
Gerardo Gamba Ayala
Adolfo Guzmán Arenas
Hugo A. Morales Técotl
Miguel Ángel Pérez de la Mora
Carlos Prieto de Castro
Sergio Sánchez Esquivel
Gina Zabłudovsky Kuper

Editora

Rosanela Álvarez Ruiz

Corrección y enlace con autores

Leticia García Urriza

Redes sociales

José Eduardo González Reyes

Diseño y formación

Quinta del Agua Ediciones, S.A. de C.V.

Ilustraciones

Ana Viniegra: pp. 31, 39, 55, 61, 75, 81, 89, 103, 113, 127

Pixabay: pp. 3, 4, 55, 84, 90, 136

Firefly (IA generativa de Adobe): pp. 15, 17, 20, 24, 27, 28, 36, 37, 44, 47, 50, 51, 53, 69, 105, 109, 119, 121, 129, 131, 137, 140, 141, 144, 149

Portal de la revista *Ciencia*, AMC

Walter Galván Tejada

Academia Mexicana de Ciencias, A. C.

Casa Tlalpan, km 23.5 de la Carretera Federal México-Cuernavaca, Av. Cipreses S/N, Col. San Andrés Totoltepec, Del. Tlalpan, C.P. 14400, Ciudad de México
tel.: 55 5849 4905

www.revistaciencia.amc.edu.mx



Este número de la revista *Ciencia* ha sido posible gracias al patrocinio del
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA METROPOLITANA



Casa abierta al tiempo
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA METROPOLITANA

Desde el Comité Editorial



Con este número de Novedades científicas, *Ciencia* ofrece un recorrido particularmente amplio a través de una variedad de disciplinas, descubrimientos y desarrollos tecnológicos que caracterizan a la ciencia contemporánea. La diversidad de los temas abordados (desde la crisis ambiental hasta la inmunoterapia contra el cáncer, pasando por la biotecnología vegetal, las neurotecnologías y la salud cardiovascular) refleja una de las mayores fortalezas de la divulgación científica: su capacidad para establecer puentes entre conocimientos altamente especializados y los asuntos que afectan directamente a la sociedad.

El medio ambiente vuelve a ocupar un lugar destacado. Por un lado, I. Vizcarra García y M. Bergés Tiznado examinan las consecuencias de una actividad indispensable para las sociedades modernas, la minería, capaz de producir graves daños ambientales y sanitarios, enfatizando la urgencia de implementar medidas



de conservación. Por el otro lado, e igualmente premonitorio, S. Sánchez-Carrillo y colaboradores nos invitan a comprender la complejidad y los límites que enfrentan los ecosistemas sometidos a una presión creciente por las actividades humanas. Cuando se rebasan ciertos límites, el deterioro de los ecosistemas puede producirse abruptamente. Asimismo, M. Domínguez-Aguilar y colaboradores analizan una consecuencia, desafortunadamente familiar, del calentamiento de los océanos: la invasión de las playas del Caribe mexicano por el sargazo, y los esfuerzos actuales para desarrollar soluciones prácticas y rentables. En otro artículo, P. López-Garrido y E. Escobar nos conducen hacia un territorio mucho menos visible: el mar profundo, recordándonos que las consecuencias de la alteración climática alcanzan incluso las regiones más remotas de los océanos.

Se examina también la relación entre el conocimiento científico, la agricultura y la producción de alimentos. Inicialmente, nos adentramos al estudio de los mecanismos de defensa de las plantas en contra de los virus y su potencial aplicación para la protección de nuestros cultivos, a través del silenciamiento de genes, herramienta que nos explican N. Franco-Jiménez y colaboradores. También exploraremos el papel materno en la reproducción vegetal en el artículo de A. Miranda-Jácome y J. Flores, quienes nos explican cómo la planta madre lleva a cabo funciones que pueden considerarse “cuidados maternos”, equivalentes a lo que ocurre en el caso

de la reproducción en los animales. A continuación, vienen dos desarrollos prácticos con potencial impacto en la alimentación, particularmente interesantes para los mexicanos: U. Cruz Calderón y colaboradores describen el calentamiento óhmico del maíz como una tecnología emergente más amable con el medio ambiente que la nixtamalización, ya que disminuye la contaminación ambiental. Igualmente atractiva es la propuesta de R. Velasco Rebollo para, a través de actualizaciones tecnológicas, recuperar la práctica milenaria de la deshidratación de alimentos mediante aire caliente, que constituye una alternativa para la conservación de alimentos más respetuosa del medio ambiente.

Otros artículos nos llevan hacia mecanismos biológicos que ocurren a escalas microscópicas y moleculares. F. Argueta Zepeda explica los mecanismos mediante los cuales los organismos regulan elementos indispensables que también pueden resultar tóxicos en lo que ella denomina: la batalla molecular por sobrevivir. Mientras que N. Rodríguez-Medina y U. Garza-Ramos nos describen la “armadura de azúcar” que contribuye a la supervivencia y resistencia bacteriana.

La medicina y la salud ocupan asimismo un espacio importante. J. Arellano Villavicencio y coautores presentan una tecnología que permite imaginar modelos computacionales individualizados para estudiar la enfermedad y orientar tratamientos. A su vez, J. Anguiano Buenfil y coautores exploran las complejas relaciones entre la salud materna durante el embarazo y la salud mental.

La sección dedicada a las investigaciones de la Universidad Autónoma Metropolitana, generoso patrocinador de esta número de la revista *Ciencia*, nos presenta cuatro artículos que abordan problemas de enorme pertinencia para México: J. Díaz Juárez y colaboradores muestran cómo la diabetes puede afectar profundamente al sistema cardiovascular; L. Amezcua Guerra amplía esta perspectiva describiendo los nuevos factores de riesgo que ocasionan problemas cardiovasculares; a estos trabajos se suman J. Quevedo Ocampo y colaboradores enfatizando la importancia de la medicina traslacional y, por último, el artículo de A. Simoni-Nieves, dedicado a



la inmunoterapia contra el cáncer alimentado por la obesidad. Este racimo de artículos ilustra cómo los avances de la investigación biomédica comienzan a trasladarse del laboratorio hacia nuevas posibilidades de prevención, diagnóstico y tratamiento.

En este número también abrimos las puertas hacia otras disciplinas: M. Flores Aguilar aborda el tema de la integridad académica y la producción responsable del conocimiento; “¿Qué secretos guardan las rocas?”, de M. Boijseauneau-López y colaboradores, muestra cómo las rocas constituyen archivos de la historia de nuestro planeta, mientras T. Florville-Alejandro y R. Cuéllar Rodríguez nos introducen a las herramientas utilizadas para conocer y vigilar nuestros recursos hídricos.

Finalmente, pero no por ello menos pertinentes, A. Zárate Rochín y colaboradores nos colocan ante una de las fronteras más fascinantes y, al mismo tiempo, inquietantes de la ciencia actual. La creciente posibilidad de registrar, interpretar o modificar la actividad cerebral obliga a preguntarnos no solamente qué podemos hacer tecnológicamente, sino qué debemos hacer y qué derechos deben proteger la privacidad, la identidad y la autonomía de las personas.

En la sección Desde las redes se complementa este panorama complejo y multidisciplinario con tres historias que enlazan pasado, presente y futuro: la interesante influencia del legado de Leeuwenhoek en México, las razones por las que el fenómeno meteorológico de El Niño se está volviendo más intenso, y el inicio de la exploración científica del telescopio espacial Roman, que promete abrir una nueva ventana para investigar algunos de los grandes enigmas del universo. Concluimos con las noticias de la Academia Mexicana de Ciencias, que nos informan de la toma de posesión del nuevo Consejo Directivo, así como de la integración de la revista al padrón del Sistema Nacional de Publicaciones Científicas y Humanísticas.

Llamo la atención a la sección de Entre la ciencia y la sociedad, de reciente introducción en nuestra revista, en la que L. Vargas-Parada traspasa los textos científicos y nos muestra ejemplos de las cavilaciones y motivaciones de los individuos que llevan a cabo esas investigaciones.

Hago también un recordatorio de la próxima puesta en marcha de la plataforma de ojs (Open Journal System) para operar el envío y procesamiento de los manuscritos. Como advertí en el anterior número, esta plataforma llevará a cabo la operatividad total de la revista a partir del primer número de 2027. En cuanto entre en operación, todos los envíos a la revista *Ciencia* deberán ser sometidos a través de esa plataforma.

Para concluir esta presentación, considero que, en conjunto, los trabajos reunidos en este número muestran que la ciencia no constituye un territorio apartado de la vida cotidiana. Está presente en los alimentos que consumimos, en el agua que utilizamos, en la salud de nuestros corazones, en los ecosistemas que nos sostienen y en las tecnologías que comienzan a transformar nuestra relación con el cuerpo y con la mente.

Precisamente por ello, la divulgación científica posee hoy una profunda pertinencia social. Una sociedad enfrentada al cambio climático, la pérdida de biodiversidad, las enfermedades emergentes, la contaminación, las nuevas tecnologías y las desigualdades en salud, necesita ciudadanos capaces de comprender la evidencia científica y de distinguirla de la desinformación. Divulgar ciencia no implica solamente simplificar conocimientos especializados: significa proporcionar elementos para comprender el mundo y participar responsablemente en las decisiones que determinan nuestro futuro.

JUAN PEDRO LACLETTE



Laura Vargas-Parada



Las personas detrás de la investigación

Los artículos que se presentan en este número revisan con cierta profundidad temas que los autores consideran de relevancia en su campo de conocimiento. Muchos de estos artículos están directamente relacionados con el trabajo de investigación que los autores realizan. Sin embargo, al ser textos divulgativos, el enfoque va más dirigido a una revisión general que a hablarnos de su propio trabajo.

En esta sección, nos acercamos un poco más a algunas de las personas detrás de los artículos y a sus proyectos de investigación. ¿Qué estudiaron y qué los llevó a trabajar en el campo de investigación al que se dedican? ¿Qué han aprendido con sus proyectos de investigación? ¿Cuáles son los retos que enfrentan y cómo puede ayudarnos lo que han aprendido a entender mejor el mundo en que vivimos? ¿Cómo se ve su mundo cuando están trabajando y qué es lo que más disfrutan de su trabajo?

Buscamos mirar a través de sus ojos y conocer más a la persona detrás del científico. Nuestro objetivo es despertar el interés de nuestros lectores por los diversos temas que se presentan en esta edición, al mismo tiempo que permitir a nuestros lectores universitarios conocer más de cerca diversos campos del conocimiento.

Conociendo el mar profundo



Véase “[El mar profundo ante el cambio climático](#)”.

“El cuidado de los ecosistemas en aguas profundas presenta desafíos únicos debido a la dificultad para acceder a esos hábitats y la escasa información científica. En México, el mar profundo representa cerca de dos terceras partes del territorio marino y su estudio ha permitido descubrir ecosistemas extremos únicos, como volcanes de asfalto en el Golfo de México y una biodiversidad adaptada a condiciones de total oscuridad.

Estudié Hidrobiología en la Universidad Autónoma Metropolitana y me especialicé en Oceanografía Biológica y Pesquera, y Oceanografía Biológica. Una



Figura 1. Elva Escobar Briones. Fotografía: Adrián Gaytán, FC-UNAM.

de las primeras localidades de mar profundo en la que realicé investigación fue la polinia del noreste de Groenlandia. Me interesé por el mar profundo cuando tuve que presentar un trabajo para mi clase de Ciencias Naturales en el bachillerato. Visité entonces el Instituto de Ciencias del Mar y Limnología de la Universidad Nacional Autónoma de México y los pocos académicos que encontré me dijeron que ‘no había nada en el mar profundo’. Pero en la biblioteca del Instituto de Investigaciones Biomédicas encontré que en el Woods Hole Oceanographic Institution y el Scripps Institution of Oceanography en EUA sí se estaba realizando investigación; lo mismo decía un ejemplar de la revista *Scientific American* dedicado a la exploración del océano. En mi trabajo para la clase cité a los expertos que decían que no había nada, pero destacué que exploraciones recientes mostraban lo contrario.

Conocer el mar profundo requiere de investigación básica impulsada por el simple deseo de entender cómo funciona nuestro planeta, y de ahí han surgido grandes descubrimientos como la producción de oxígeno oscuro, fauna longeva con edades de 11 000 años (esponjas) o 4 000 años (corales), o la identificación de genes que podrían beneficiar a la humanidad en los próximos años.

Actualmente estudio la diversidad del mar profundo y su conservación; mis resultados buscan fundamentar la toma de decisiones para evitar el uso destructivo del fondo marino.

En esta foto (**Figura 1**) me encuentro en la cubierta del buque oceanográfico Justo Sierra. Estoy preparando un equipo llamado *multinucleador* que permitirá tomar 12 muestras del fondo marino, a casi 4 km de profundidad, en el Golfo de México, con el fin de estudiar los diminutos organismos que viven entre las hendiduras de los granos de arena o la arcilla.

He aprendido que el estudio del océano, y en especial del mar profundo, no puede ser de corto plazo; requiere un ecosistema científico y técnico integrado, estable y de largo plazo para hacer frente a las crisis globales, ya que el océano define la estabilidad del planeta y que con ello que la vida prospere.”

ELVA ESCOBAR BRIONES

“E estudié Biología en la Escuela Nacional de Ciencias Biológicas del Instituto Politécnico Nacional y posgrados en Biología Marina y Ciencias y Tecnología Marinas. Desde niño me fascinaban los documentales de Jacques Cousteau, lo que despertó mi vocación por la biología marina. Al concluir la



Figura 2. Pedro H. López-Garrido. Fotografía: Pedro López, INAH/SAS.

licenciatura, me formé en buceo recreativo y científico (Figura 2), experiencia que me permitió trabajar en el Parque Nacional Sistema Arrecifal Veracruzano de la Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas y como investigador en la Subdirección de Arqueología Subacuática del Instituto Nacional de Antropología e Historia. Allí estudié la interacción de la fauna marina con vestigios de naufragios históricos en aguas tropicales de México, acumulando numerosas horas de buceo y aplicando técnicas de video y fotogrametría al estudio de comunidades bénticas. Durante mis inmersiones observaba la vida submarina y me preguntaba cómo sería en las grandes profundidades, donde el ser humano sólo puede acceder mediante vehículos tripulados de alta tecnología.

En 2012 se llevó a cabo la expedición Gulf of California, coordinada por el Monterey Bay Aquarium Research Institute, en la cual participaron investigadores y estudiantes de la UNAM con inmersiones al mar profundo en distintas localidades del Golfo de California, entre ellas la Cuenca de Guaymas. La exploración a más de 200 m de profundidad presenta grandes desafíos, pero gracias al desarrollo de tecnologías robóticas avanzadas, como los sumergibles y los vehículos de operación remota —equipados con sensores para medir variables ambientales, herramientas para coleccionar rocas y fauna, y cámaras de video de alta definición—, ahora es posible documentar *in situ* los hábitats y la fauna asociada. Desafortunadamente, estos equipos no están disponibles en México, por lo que gran parte de las investigaciones requieren la colaboración con instituciones extranjeras.

En la Cuenca de Guaymas encontramos comunidades dominadas por corales y esponjas con una notable diversidad que forman arrecifes de aguas de entre 849 y 990 m de profundidad. Muchas de estas especies son vulnerables al impacto de actividades humanas como la minería de aguas profundas, explotación de hidrocarburos y pesca en aguas profundas. Además, el calentamiento global está incrementando la temperatura de los océanos y provocando, entre otros efectos, la desoxigenación de las aguas, lo que podría ampliar la extensión de las zonas de oxígeno mínimo y afectar la biodiversidad. Esto tendría consecuencias significativas en los hábitats de mar profundo de la zona y en otras regiones del Golfo de California que apenas comienzan a explorarse y descubrirse.”

PEDRO H. LÓPEZ-GARRIDO

El estudio de las rocas



Véase “¿Qué secretos guardan las rocas?”.

“Para estudiar las rocas primero se estudia alguna carrera de geociencias, como geología o geofísica, física o química. Luego uno se especializa, por ejemplo, en vulcanología.

A Antonio siempre le gustaron las rocas, pero en Morelia no había la carrera de geología, ni geociencias, así que eligió Ingeniería Civil, ya que se relacionaba un poco con la caracterización de los suelos y

las rocas. Se empezó a apasionar con la caracterización de las propiedades de las rocas y en particular de las rocas volcánicas.

A los que estudian las rocas se les llama petrólogos. Nos gusta mucho el contacto con la naturaleza, pero también el trabajo en el laboratorio. Queremos saber por qué tenemos las rocas que tenemos.

En la fotografía (Figura 3) estamos realizando un levantamiento geológico-volcanológico en la caldera de La Reforma en Mulegé, Baja California. Como vulcanólogos, estudiamos los procesos eruptivos, su dinámica, los parámetros físicos que los controlan y las características de los depósitos y las rocas volcánicas. Buscamos vincular lo que vemos en la superficie con lo que ocurre en el interior del sistema volcánico antes de una erupción. ¿Cómo funciona un volcán? ¿Qué es lo que pasa en ellos antes de una erupción? Vamos descubriendo ciertas huellas mediante el estudio de las rocas y los minerales. Aún tenemos muchas preguntas que no hemos podido resolver. ¿Dónde se almacena el magma y cuánto tiempo permanece ahí antes de una erupción? También nos interesa saber por qué los volcanes aparecen en una región y cuál es el papel que desempeña el tipo de magma o la estructura de la corteza.

Trabajamos por todo el país. En Michoacán nos interesa el campo volcánico Michoacán-Guanajuato, región volcánica activa –que abarca unos 40 000 kilómetros cuadrados en el centro del país– conocida por la erupción de los volcanes el Jorullo y Parícutín. Su importancia radica en que es una de las regiones donde existe la probabilidad más alta de que aparezca el siguiente volcán mexicano.

En la región de Baja California, trabajamos en la línea de Baja California Sur y Norte. Ahí lo que estamos estudiando es la distribución de los fluidos geotérmicos y cómo es la actividad y la evolución de estos sistemas. En Puebla y Jalisco también hay potencial geotérmico.

Las rocas también están en las ciudades. Una línea de investigación es el reemplazo de rocas para monumentos históricos; hacemos experimentos para

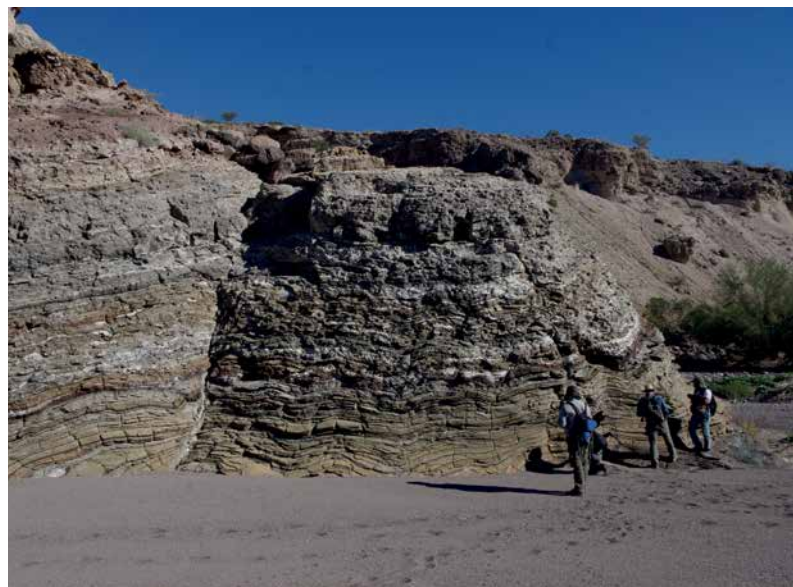


Figura 3. En un levantamiento geológico-volcanológico en la caldera de La Reforma en Mulegé, Baja California. Fotografía: Antonio Pola.

buscar la roca más adecuada para hacer el reemplazo de una piedra de un monumento o de edificios históricos.

En el laboratorio nos interesa la recreación de los fenómenos geológicos a gran escala: llevar todos esos parámetros que podemos medir en campo a una escala muy pequeña que nos permita conocer la resistencia de una roca, o recrear fenómenos naturales para poder estudiar distintas variables.

Uno de los aspectos más emocionantes de nuestro trabajo es que podemos viajar por todo el mundo, subir a la cima de un volcán en medio de la nada, y luego regresar a la ciudad, al laboratorio, para analizar los minerales y las rocas a nivel microscópico tratando de comprender cómo se vincula el vulcanismo con todo lo que ocurre en su entorno. Poder combinar el trabajo de campo con el trabajo analítico de laboratorio es lo máximo.

Pero quizás lo más importante de nuestro trabajo es el contexto social. Queremos generar información que permita construir escenarios que después puedan servirles a las autoridades para gestionar mejor el riesgo en una región.”

MARIO E. BOIJSEAU-NEAU-LÓPEZ Y ANTONIO POLA

Mejorando los productos de maíz

Véase “El papel del calentamiento óhmico del maíz, una tecnología emergente para un proceso sustentable”.

“En México, el maíz es uno de los principales productos de consumo diario. En el Laboratorio de Química y Funcionalidad de Carbohidratos de la Universidad Autónoma de Querétaro buscamos mejorar los procesos de producción mediante acciones como reducir el consumo de agua y energía, eliminar el agua residual que contiene contaminantes y aprovechar por completo la materia prima para hacer más sustentable la producción de alimentos derivados del maíz. Se trata de rediseñar un proceso cotidiano con criterios ambientales.

Llegamos a la investigación en alimentos desde distintos caminos, pero la química fue una materia que detonó nuestro interés. Uriel Cruz es ingeniero químico en alimentos y nosotras estudiamos Químico Farmacobiología. En mi caso (Anai Zavala), no tuve una inspiración como tal en una persona o evento específico, pero desde niña me gustó observar fenómenos y buscar su explicación. Estudié una carrera técnica, que fue la que me llevó a los alimentos; luego nos hemos ido especializando con posgrados

en Ciencias y Tecnología de Alimentos, Tecnología Avanzada o Ciencias con especialidad en Materiales.

En la foto (Figura 4) estamos trabajando en el laboratorio. Usamos granos de maíz para preparar las muestras de estudio que se colocan en una celda de tratamiento que Uriel sostiene en su mano. La celda está conectada al equipo de control que registra temperatura y voltaje, y es donde se aplica la corriente eléctrica a las muestras.

Trabajamos con maíz porque es parte de la identidad cultural del país y es la base de nuestra alimentación. Como en México consumimos una enorme cantidad de productos de maíz nixtamalizado, queremos hacer más eficiente el proceso sin perder el sabor ni el valor nutricional. Proponemos el calentamiento óhmico (que utiliza corriente eléctrica) como alternativa a la nixtamalización tradicional: es más rápido, aprovecha mejor la energía, calienta de manera uniforme y no genera residuos líquidos.

Obtenemos masa, harina y tortilla con características muy similares a las tradicionales, sin el costo ambiental asociado.

Falta aún estandarizar el proceso y escalarlo a nivel semiindustrial e industrial para responder a la demanda real. Además, trabajar con electricidad exige cuidados constantes. Empezamos con la molienda del maíz, que es la materia prima del proceso óhmico; luego hacemos la nixtamalización usando únicamente el agua necesaria y obtenemos la masa, que puede convertirse en tortilla u otros derivados.

Después evaluamos la masa, las harinas y las tortillas: textura, sabor y contenido nutricional, para verificar que cumplan con los estándares.

Este tipo de proceso no sólo mejora la nixtamalización, también resultó muy eficiente para degradar toxinas que se encuentran naturalmente presentes en el maíz. Estas toxinas se llaman aflatoxinas y están asociadas al desarrollo del cáncer. El proceso tradicional las reduce, pero no siempre pierden su



Figura 4. Anai Zavala Franco, Uriel Cruz Calderón y Marcela Gaytán Martínez. Fotografía: Édgar Esquivel (modificada con ChatGPT).

capacidad de generar cáncer. Con el calentamiento óhmico logramos degradarlas hasta niveles no tóxicos, y como estas toxinas son muy importantes para la salud pública, ya iniciamos el registro ante el Ins-

tituto Mexicano de la Propiedad Industrial de una patente basada en este hallazgo.”

URIEL DE JESÚS CRUZ CALDERÓN,

MARCELA GAYTÁN MARTÍNEZ Y ANAI ZAVALA FRANCO

Nuevas opciones terapéuticas



Véase “[Inmunoterapia: la nueva esperanza contra el cáncer alimentado por la obesidad](#)”.

“Siempre me interesó entender cómo funciona la vida desde adentro y poner a prueba los mecanismos celulares. Ver células vivas al microscopio por primera vez en la preparatoria y entender que todo lo que somos ocurre a una escala microscópica que podemos observar y manipular me convenció de dedicarme a la ciencia.

En la foto ([Figura 5](#)) estoy en mi mesa de trabajo en el laboratorio de fisiología celular y medicina traslacional en la Universidad Autónoma Metropolitana Unidad Iztapalapa. A mi lado, un microscopio invertido Zeiss, el equipo que utilizo diariamente para la observación, monitoreo y análisis de los cultivos celulares y organoides de investigación.

Elegí estudiar biología experimental, en la UAM Iztapalapa, porque no se trata de memorizar libros, sino de ir al laboratorio, diseñar experimentos, hacer preguntas y buscar respuestas directas en el microscopio o en el tubo de ensayo. Antes de ingresar a la universidad, realicé prácticas en un laboratorio de hematología oncológica en el Hospital General de México. Luego de varias semanas con un experimento que no salía, buscamos analizar el “error”, lo que nos llevó a un dato inesperado y me permitió aprender algo importante: que la ciencia no consiste en tener la razón a la primera, sino en saber qué preguntar cuando las cosas no salen como esperas.

Mi interés en la inmunoterapia y los anticuerpos biespecíficos surgió principalmente durante una estancia en el Departamento de Inmunología y Biología Regenerativa del Instituto Weizmann de Ciencias en Israel. Ahí me enfoqué en estudiar los mecanismos de resistencia a fármacos en cáncer de pulmón con una mutación conocida como EGFR. Como parte

de esta investigación, desarrollé un nuevo anticuerpo biespecífico sintético, el cual, combinado con el medicamento Osimertinib, demostró tener potencial para desacelerar o prevenir la resistencia al tratamiento y la recaída.

Un día de experimentación suele ser muy dinámico. Trabajo con cultivos celulares en 2D y modelos 3D, y utilizo herramientas de edición y manipulación genética como CRISPR/Cas9 o siARN; realizo también análisis metabólicos celulares, secuenciación de ARN y citometría de flujo. Más tarde vienen



Figura 5. Arturo Simoni-Nieves. Fotografía proporcionada por A. S.-N.

varias horas dedicadas a la interpretación de datos cuantitativos y transcriptómicos, a la escritura de artículos científicos y a la revisión de manuscritos para revistas internacionales.

A partir de mi trabajo de investigación he descubierto que las dietas ricas en colesterol alteran la función mitocondrial de las células hepáticas y conducen al desarrollo de un subtipo de carcinoma hepatocelular mucho más agresivo y resistente a la apoptosis (un tipo de muerte celular). Aprendí que receptores como el AXL y procesos como la replicación del ADN propensa a errores tienen un papel clave para que las células del cáncer de pulmón evadan el efecto de las terapias dirigidas, y mostramos que

la coinhibición mediante anticuerpos biespecíficos es una herramienta viable y muy prometedora para revertir la resistencia a fármacos.

Aún hay mucho por entender. Mi meta principal es profundizar en la comprensión de los mecanismos moleculares de resistencia a fármacos y en la agresividad tumoral con el fin de desarrollar mejores opciones terapéuticas para pacientes con cáncer de hígado y de pulmón. Para ello, es importante descifrar cómo factores como la acumulación de colesterol y los trastornos metabólicos aceleran el progreso tumoral. El reto, al final, es lograr vencer la resistencia a fármacos.”

ARTURO SIMONI-NIEVES

Umbrales e incertidumbre



Véase “[Umbrales e incertidumbre: claves para entender la actual crisis ambiental](#)”.

“La fotografía ([Figura 6](#)) se tomó en el Parque Natural de las Lagunas de Ruidera, en España, donde estoy midiendo las emisiones de gases de efecto invernadero de un lago usando una batería de cámaras flotantes conectadas a un instrumento

que mide de manera simultánea la concentración de varios gases en una muestra mediante la combinación de luz y sonido.

La muestra se obtiene a partir de las cubetas blancas montadas sobre el flotador amarillo, que encierran una pequeña columna de aire sobre la superficie del agua; con el tubo azul se extrae de manera automatizada a intervalos regulares para calcular el flujo de metano hacia la atmósfera. Con estas medidas buscamos entender un proceso muy concreto de los que describimos en el artículo: cómo la oxidación anaerobia del metano acoplada a la desnitrificación –un proceso microbiano que “quema” metano usando nitrato en lugar de oxígeno– puede actuar como una retroalimentación negativa que amortigua parte de las emisiones de un lago.

Ruidera es un caso revelador. Es una cadena de lagos que en las últimas décadas ha recibido cada vez más nitrato de origen agrícola. Ese exceso de nitrato, que solemos ver sólo como un detonante que fomenta el crecimiento excesivo de fitoplancton (eutrofización), podría estar modulando al mismo tiempo las emisiones de metano a la atmósfera. Un buen



Figura 6. Salvador Sánchez-Carrillo. Fotografía proporcionada por S. S.-C.

ejemplo de cómo se acoplan los ciclos biogeoquímicos (carbono y nitrógeno, en este caso) en la biosfera y cómo cambian las interacciones según el estado del sistema, exactamente el tipo de interacciones no lineales de las que hablamos en el artículo.

Partimos de una idea sencilla pero incómoda para la gestión ambiental clásica: los ecosistemas no cambian de forma gradual ni proporcional a las presiones que reciben, y esa no linealidad hace que la incertidumbre sea una propiedad del propio sistema, no sólo un vacío de conocimiento. Pueden mantenerse aparentemente estables durante décadas y luego cruzar un umbral, y reorganizarse en un estado distinto —a veces irreversible— ante una perturbación pequeña. Por eso no se puede gestionar esperando un control total basado en predicciones exactas, sino actuando de acuerdo con esa incertidumbre inherente.

David, Miguel y yo trabajamos en el Departamento de Biogeoquímica y Ecología Microbiana del Museo Nacional de Ciencias Naturales en Madrid. Quizás sorprenda que un museo de historia natural tenga investigadores que generan datos de campo y publican en revistas internacionales, pero en nuestro caso el museo no es sólo la instalación expositiva que visita el público: primero somos un centro de investigación en toda regla, con departamentos,

laboratorios y líneas de financiación competitiva. Algo que distingue al museo es la multidiscipliplina y un buen ejemplo es cómo llegamos aquí.

Yo soy geólogo de formación, pero luego, para el posgrado, me especialicé en ecología; mientras que David y Miguel son biólogos taxónomos que trabajaban originalmente en taxonomía de algas de agua dulce. Su trabajo derivó hacia la ecología acuática y ahí fue donde nos encontramos. Los tres nos dedicamos a la ecología de sistemas aplicada principalmente al ambiente acuático, pero en ramas diferentes. David es especialista en resiliencia y estados alternativos, mientras que Miguel y yo nos hemos centrado más en entender la interacción entre procesos ecológicos.

Lo que más nos estimula de nuestro trabajo es poder llegar a entender cómo funciona la complejidad de un ecosistema, algo que sólo podemos hacer si tenemos información a largo plazo: treinta años siguiendo el mismo humedal, o volver año tras año a los mismos lagos mexicanos, permite ver patrones que serían invisibles en un muestreo puntual. Ahí es donde aparecen los umbrales, las señales de alerta temprana, los cambios que a corto plazo parecen ruido y a largo plazo son una trayectoria clara.”

SALVADOR SÁNCHEZ-CARRILLO

Jorge Enrique Arellano Villavicencio, Yael Alejandro Hernández Colín y Osbaldo Resendis Antonio

Gemelos digitales: el espejo virtual en la lucha contra el cáncer

Resumen

La construcción de gemelos digitales en la medicina plantea nuevos horizontes para sugerir una mejor opción de tratamiento contra enfermedades complejas como el cáncer. A pesar de que esta idea se encuentra en desarrollo, estrategias como la reconstrucción del metabolismo y métodos como la inteligencia artificial marcan el camino hacia un futuro donde la medicina pueda ser personalizada.

Abstract

The construction of digital twins in medicine raises new horizons to suggest a better treatment option against complex diseases such as cancer. Although this idea is under development, strategies such as the reconstruction of metabolism and methods such as artificial intelligence mark the path towards a future where medicine can be personalized.

La ciencia encarna el deseo humano de entender la naturaleza; la tecnología conjuga ese deseo con la ambición de poder controlarla.

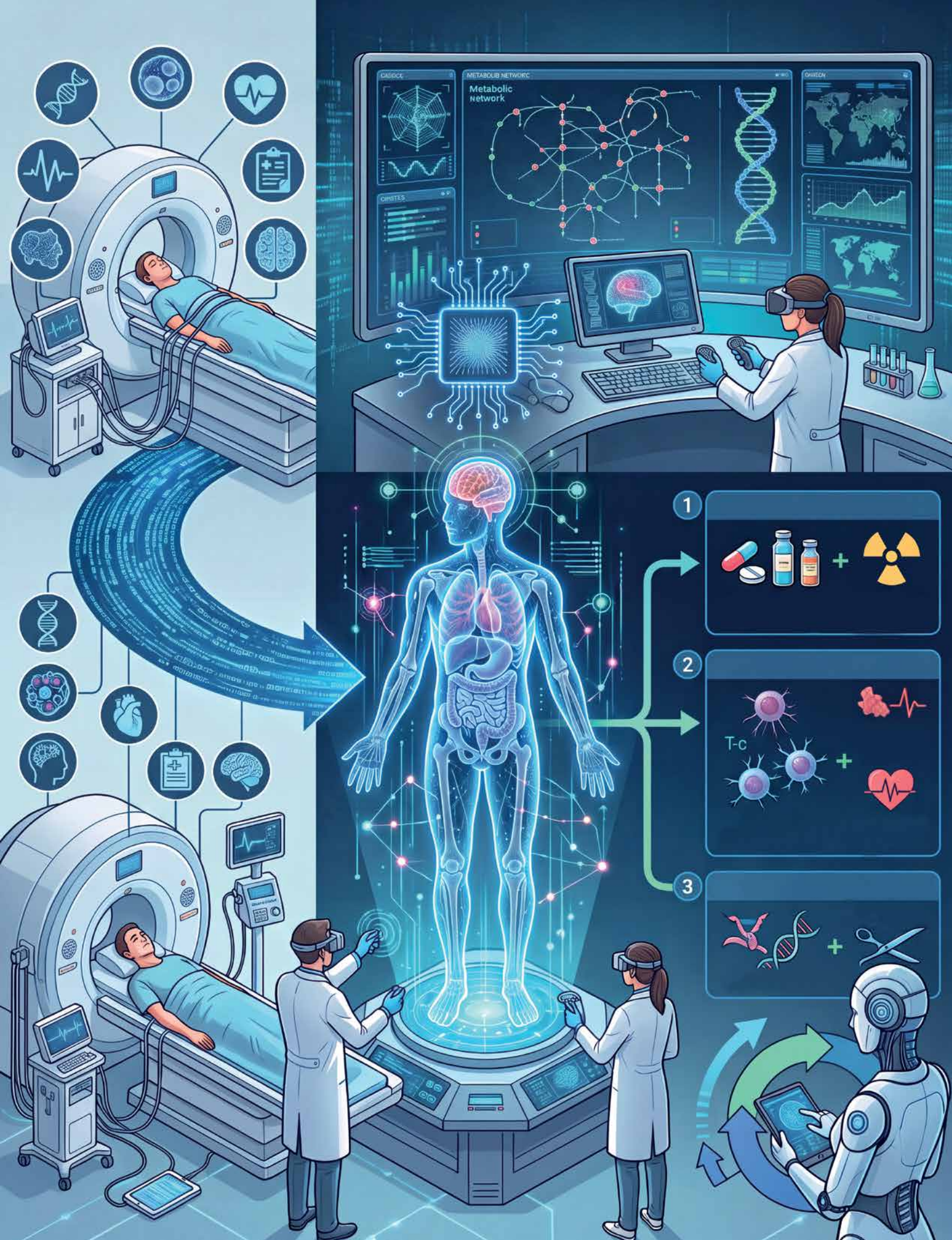
SIDDHARTHA MUKHERJEE

La amenaza silenciosa

En las últimas décadas, el cáncer se ha convertido en un gran desafío para la salud pública a nivel mundial. El informe del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) del 2024 reportó que 68.95 defunciones por cada 100 000 habitantes son causadas por tumores malignos en México. Los más comunes son el de mama, pulmón, colorrectal y próstata.

¿Qué hace tan peligroso al cáncer?

La enfermedad se caracteriza por una proliferación descontrolada de células en cualquier parte del cuerpo que dan origen a tumores malignos. Cuando éstos son



lo suficientemente grandes, las células se desprenden y se propagan por la circulación sanguínea para colonizar otras regiones, proceso que se conoce como metástasis. En etapas tempranas, los tumores son poco perceptibles y asintomáticos, hasta que la enfermedad se encuentra avanzada. Por esta razón, para ir un paso adelante en la carrera contra el cáncer, se promueven campañas de detección temprana. El desarrollo de la enfermedad puede depender de factores individuales, como el historial familiar o el estilo de vida, lo que plantea un reto para la detección y tratamiento. Este desafío ha puesto en jaque a los oncólogos, quienes se preguntan ¿cuál es la terapia ideal para cada paciente?, lo que ha vuelto fundamental abordar el cáncer desde una perspectiva integral y multidisciplinaria.

El cáncer: un sistema complejo y complicado

Desafíos en el desarrollo de tratamientos personalizados en cáncer

El cáncer es una enfermedad producto de múltiples factores, como la herencia, la alimentación, el estilo de vida, las infecciones virales o la exposición a químicos carcinogénicos. Dependiendo del origen, el cáncer posee características genéticas particulares, de forma que su tratamiento no siempre es el mismo. Un tratamiento para cáncer de mama no respondería de la misma manera para tratar un cáncer de próstata o colon. Por si fuera poco, uno de los hallazgos más peculiares sobre el cáncer es que los tumores son heterogéneos y pueden estar compuestos de distintas subpoblaciones celulares con funciones diferentes y complementarias (Muciño y cols., 2020). Esto hace pensar que un tratamiento puede combatir una subpoblación, pero debido a la heterogeneidad, otros tipos de células podrían ser inmunes a éste y reducir su efectividad. Por otro lado, aunque los tumores pueden ser muy distintos a nivel de tejido, comparten algunas estrategias metabólicas para sobrevivir, como alterar su metabolismo para obtener energía, activar o desactivar genes para evitar la muerte celular y fomentar la migración cuando el entorno no les favorece. Así, encontrar similitudes metabólicas

entre distintos tipos de tumores es clave para descubrir sus puntos débiles.

El futuro es virtual

La publicación del genoma humano completo en 2003 y la llegada de las tecnologías de alto rendimiento han marcado un antes y un después en la investigación biomédica. Este desarrollo científico abrió paso a disciplinas requeridas para la integración de datos masivos y la interpretación de los procesos biológicos, entre ellas, la biología computacional. Para el cáncer, la biología computacional ha alentado una carrera ascendente en la identificación de posibles biomarcadores hacia el diagnóstico temprano del cáncer (Baysoy y cols., 2023). Como resultado, se tienen estrategias menos invasivas y más efectivas. Un ejemplo de diagnóstico temprano es el análisis de biopsias líquidas en pacientes con cáncer de mama, el cual, gracias a la bioinformática, ha permitido identificar ADN libre asociado al cáncer (Gong y cols., 2012), o la identificación de genes clave como BRCA1 y BRCA2 (Trujillano y cols., 2015), asociados a la susceptibilidad de desarrollar la enfermedad. Así, el uso de estrategias computacionales para el manejo de datos masivos establece las bases de la medicina personalizada gracias a la capacidad predictiva de identificar los mejores blancos terapéuticos posibles para cada paciente.

Asimismo, la biología computacional ha tratado de modelar escenarios que pudieran ser difíciles de observar o recrear en un laboratorio. Uno de los instrumentos tecnológicos mejor logrados ha sido la representación en computadora de una característica biológica (representaciones *in silico*). En la actualidad, esta idea constituye una línea de investigación activa en el mundo que busca que los modelos computacionales sean un espejo cercano a la realidad.

Sin duda, debido a la gran cantidad de variables que se tienen que tomar en cuenta para modelar un organismo vivo en la computadora, es una tarea retadora y ardua. Este objetivo es similar a la construcción de un rompecabezas que, pieza a pieza, permite una representación de mecanismos biológicos



a mayor escala. Esta utopía resulta atractiva en el área médica debido a los alcances que tendría la herramienta a nivel clínico, particularmente en el diseño de nuevos y optimizados tratamientos (Niarakis y cols., 2024).

Revelando secretos: la biología computacional en el estudio del metabolismo

Tanto en el mundo como en México existen grupos de investigación dedicados al estudio del cáncer como un sistema biológico complejo. Así, para desentrañar el dilema del cáncer y su capacidad de adaptarse, la biología computacional ha logrado integrar la información de las ciencias ómicas y crear modelos metabólicos capaces de responder a estímulos como los cambios en el ambiente (Resendis-Antonio y cols., 2010) o la presencia de un fármaco,

con el fin de responder a la pregunta sobre la manera en que las células del cáncer adaptan su metabolismo para sobrevivir.

La atención en los procesos bioquímicos para obtener energía data del año 1956, con Otto Warburg, quien propuso la hipótesis relacionada con cómo las células de cáncer obtienen energía mediante la oxidación de azúcares por vías anaeróbicas, aun en presencia de oxígeno. A partir de ese estudio, surge el interés en averiguar cómo todos los tipos de cáncer aseguran la demanda energética para crecer y replicarse de forma descontrolada.

Al notar el impacto del metabolismo para tratar al cáncer, se han realizado esfuerzos para crear una versión digital de su actividad bioquímica. Es aquí donde hacen su aparición las reconstrucciones metabólicas a escala genómica (GEMS, por sus siglas en inglés) como una estrategia integral y persona-

Ciencias ómicas

Disciplinas biológicas, entre las que se encuentran la genómica, la proteómica y la metabolómica, que estudian conjuntos completos de biomoléculas. Analizan de forma global genes, proteínas y procesos celulares para comprender mejor la vida y las enfermedades.

lizada para evaluar el metabolismo tumoral. Metodológicamente, las GEMS son creadas a partir de la información genómica obtenida por secuenciación del ADN del tumor y pueden ser calibradas con datos adicionales provenientes de estudios proteómicos o metabolómicos. Entre ellas, se incluyen las reacciones metabólicas identificadas del genoma de un organismo y de los perfiles de expresión en la muestra secuenciada para obtener un perfil metabólico específico del tejido o línea celular. Imaginemos que la computadora creó un mapa del metro de la ciudad que señala la mejor opción para llegar a nuestro destino: un perfil único. Pero si tomamos un tumor distinto, aunque el mapa de la ciudad sería el mismo ese día, puede ser que haya un cierre en una estación, de modo que la mejor ruta cambiará, pero al final llegaremos a nuestro destino. Esto ejemplifica lo que caracteriza a los perfiles metabólicos: se puede decir que son similares y tienen casi la misma capacidad, pero con algunas diferencias relacionadas con el origen de la muestra (**Figura 1**). Las GEMS se han convertido en una herramienta computacional relevante para evaluar las capacidades metabólicas del cáncer, generar predicciones de su crecimiento e identificar puntos metabólicos cla-

ve relacionados con la capacidad de disminuir el avance de la enfermedad.

De esta forma, hoy en día tenemos representaciones computacionales de células tumorales con capacidades para simular su tiempo de duplicación, los mecanismos de migración, o la respuesta evasiva al sistema inmunológico. Asimismo, se han desarrollado modelos que simulan el crecimiento de tumores sólidos usando GEMS, en modelos tridimensionales de cáncer de mama. Como resultado de estas y otras representaciones virtuales se evidenció la comunicación metabólica entre las subpoblaciones de un tumor y el cómo las alteraciones en el microambiente promueven comportamientos cooperativos que aseguran la supervivencia de toda la comunidad (Arellano-Villavicencio y cols., 2024). Sin embargo, a pesar de la capacidad predictiva de los modelos, el cáncer aún mantiene las brasas encendidas. Al día de hoy, únicamente se han representado escenarios controlados a partir de cultivos *in vitro* y algunas biopsias. El siguiente paso es poder calibrar estos modelos con resultados experimentales tanto *in vitro* como provenientes de tejidos humanos para poder evaluar las predicciones y acercar estos métodos a la clínica.

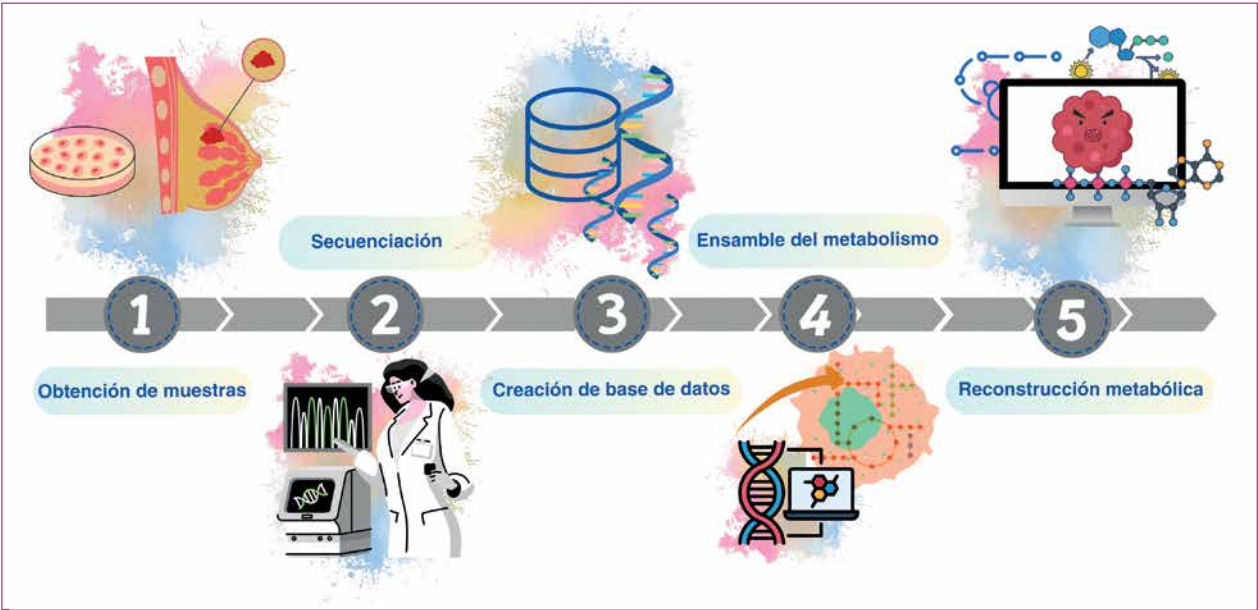


Figura 1. El diseño de una GEMS sigue cinco pasos: obtención, procesamiento y secuenciación de muestras biológicas (1-2); creación de una base de datos para almacenar la información genómica (3); reconstrucción del metabolismo a partir de la información almacenada (4), y generación de un modelo *in silico* para estudiar el fenómeno biológico de interés.

La utopía: en busca de la piedra angular del diagnóstico médico

El hecho de pensar en un gemelo nuestro en la computadora suena ambicioso, pero podría ayudarnos a tener diagnósticos más certeros y tratamientos realmente efectivos a largo plazo. Imaginar una plataforma digital capaz de simular el estado de salud de un paciente –incluir notas de evolución e historia clínica, estudios de laboratorios clínicos, genéticos y de imagenología– nos pone a pensar que las computadoras podrían ayudar a la selección de diagnósticos y tratamientos ideales y personalizados (Figura 2).

A pesar de que aún estamos lejos de alcanzar un mundo ideal donde podamos tener una versión digital de nosotros en tiempo real, este panorama se hace cada vez más cercano gracias a tecnologías de la información como la inteligencia artificial y el modelado computacional. Una de las barreras para abordar este objetivo se encuentra en la integración de diversos niveles de organización. Integrar el metabolismo de una célula hasta un organismo como el ser humano implica la conjunción de una gran cantidad de información y variables para asegurar que las predicciones del gemelo virtual sean cercanas a

la realidad. Entre los intentos más ambiciosos que se han concretado, se encuentra el modelado de la dinámica del corazón mediante un sistema multicelular que incluye la digitalización de características estructurales, biofísicas y biomecánicas de los tejidos (Martínez-Velázquez y cols., 2019). Regresando al cáncer, la construcción de gemelos digitales presenta otra ventaja: explorar la interacción intrincada entre las células cancerosas y los fibroblastos, adipocitos y células del sistema inmunológico aledañas al microambiente. Los modelos *in silico* podrían elucidar el papel de estas interacciones y nos dejarían más y más cerca del objetivo final: el gemelo digital como una estrategia en la lucha contra el cáncer.

¿En dónde estamos parados en la ruta hacia la virtualización en cáncer?

Las herramientas computacionales y la información obtenida experimentalmente han permitido caracterizar genética y transcripcionalmente diferentes tipos de cáncer. El detalle ofrecido por las tecnologías ómicas a nivel de una sola célula evidencia características propias de cada grupo celular como una gran maquinaria que funciona coordinadamente

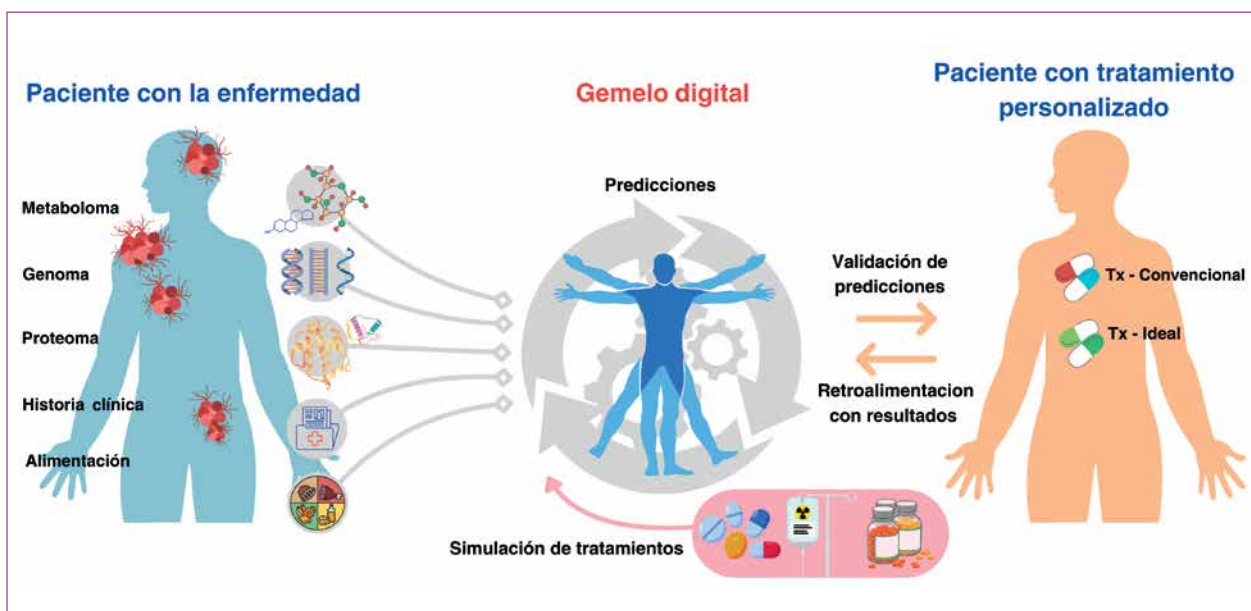
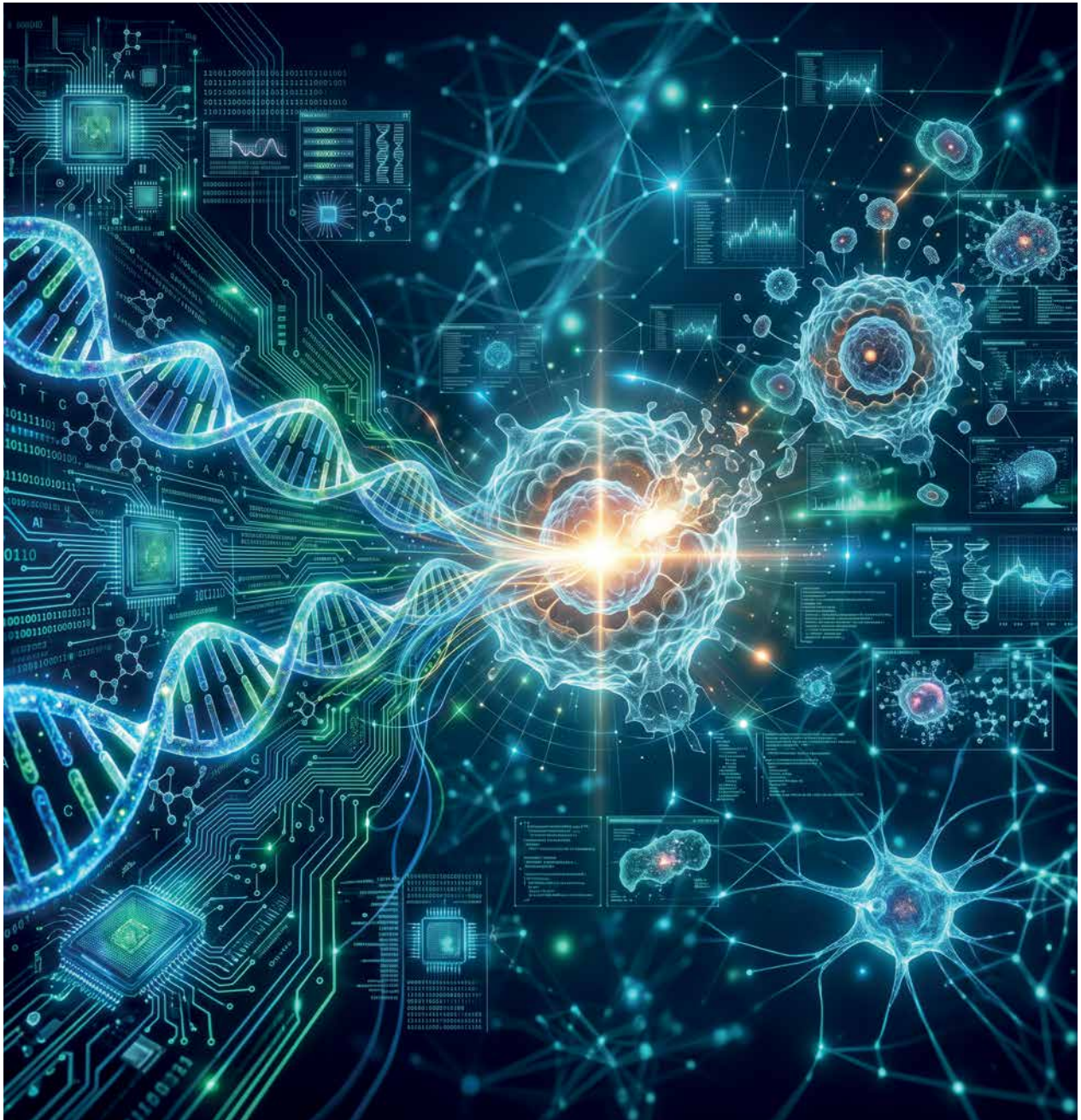


Figura 2. El gemelo digital será una herramienta diseñada para integrar información clave y describir de forma sistemática y con precisión el fenotipo de un paciente. La representación digital del individuo permite proponer los mejores tratamientos para su enfermedad, de modo que el especialista en salud pueda elegir una terapia personalizada.



y que cada tipo de tumor sigue sus propias reglas de organización. Así, varios estudios han revelado que cada persona puede tener su propio tipo de cáncer a causa de factores como el estilo de vida o su herencia biológica. Este contexto muestra el escenario de lo que se requiere para la construcción de los gemelos digitales y su promesa de ofrecer tiempos de diagnóstico y tratamientos cada vez más eficaces contra el cáncer.

Conclusiones

 ¿Hacia dónde vamos? La unión entre la biología, la computación y la oncología constituye una estrategia ideal para la revelación de los secretos mejor guardados del cáncer. Esta fusión, en conjunto con inteligencia artificial y los algoritmos de aprendizaje de máquina, hace viable la posibilidad de “gemelos digitales” que permitan entender los mecanismos de esta enfermedad y plantear tratamientos personaliza-

dos. Los gemelos digitales son, pues, una nueva forma de hacer ciencia interdisciplinaria en la medicina y nos dirigen a un futuro donde la personalización es la clave para vencer esta enfermedad.

Jorge Enrique Arellano Villavicencio

Laboratorio de Biología de Sistemas, Instituto Nacional de Medicina Genómica.
Programa de Doctorado en Ciencias Bioquímicas, Facultad de Química, UNAM.
systemsbiology.arellano@gmail.com

Yael Alejandro Hernández Colín

Laboratorio de Biología de Sistemas, Instituto Nacional de Medicina Genómica.
Programa de Maestría en Ciencias Bioquímicas, Facultad de Química, UNAM.
yael.a.1406@gmail.com

Osbaldo Resendis Antonio

Laboratorio de Biología de Sistemas, Instituto Nacional de Medicina Genómica.
Coordinación de la Investigación Científica-Centro de Ciencias de la Complejidad-Red de Apoyo a la Investigación, UNAM.
oresendis@inmegen.gob.mx

Referencias específicas

- Arellano-Villavicencio, J. E., A. Vázquez-Jiménez, J. J. Oropeza-Valdez, C. Padrón-Manrique *et al.* (2024), "Intratumoral Heterogeneity and Metabolic Cross-Feeding in a Three-Dimensional Breast Cancer Culture: An In Silico Perspective", *International Journal of Molecular Sciences*, 25(20):10894. Disponible en: <https://doi.org/10.3390/ijms252010894>.
- Baysoy, A., Z. Bai, R. Satija y R. Fan (2023), "The technological landscape and applications of single-cell multi-omics", *Nature Reviews Molecular Cell Biology*, 24:695-713. Disponible en: <https://doi.org/10.1038/s41580-023-00615-w>.
- Gong, B., J. Xue, J. Yu, H. Li, H. Hu *et al.* (2012), "Cell-free DNA in blood is a potential diagnostic biomarker of breast cancer", *Oncology Letters*, 3(4): 897-900. Disponible en: <https://doi.org/10.3892/ol.2012.576>.
- Martínez-Velázquez, R., R. Gámez y A. E. Saddik (2019), "Cardio Twin: A Digital Twin of the human heart running on the edge", en *2019 IEEE International Symposium on Medical Measurements and Applications (MeMeA)*, Estambul, IEEE, pp. 1-6. Disponible en: <https://doi.org/10.1109/MeMeA.2019.8802162>.
- Muciño-Olmos, E. A., A. Vázquez-Jiménez, U. Ávila-Ponce, M. Matadamas-Guzmán, V. Maldonado *et al.* (2020), "Unveiling functional heterogeneity in breast cancer multicellular tumor spheroids through single-cell RNA-seq", *Scientific Reports*, 10:12728. Disponible en: <https://doi.org/10.1038/s41598-020-69026-7>.
- Niarakis, A., R. Laubenbacher, G. An, Y. Ilan, J. Fisher *et al.* (2024), "Immune digital twins for complex human pathologies: applications, limitations, and challenges", *NPJ Systems Biology and Applications*, 10(1):141. Disponible en: <https://doi.org/10.1038/s41540-024-00450-5>.
- Resendis-Antonio, O., A. Checa y S. Encarnación (2010), "Modeling Core Metabolism in Cancer Cells: Surveying the Topology Underlying the Warburg Effect", *PLOS One*, 5(8):e12383. Disponible en: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0012383>.
- Trujillano, D., M. Weiss, J. Schneider, J. Köster, E. Papachristos *et al.* (2015), "Next-Generation Sequencing of the BRCA1 and BRCA2 Genes for the Genetic Diagnostics of Hereditary Breast and/or Ovarian Cancer", *The Journal of Molecular Diagnostics*, 17(2):162-170.

Alba Marcela Zárate Rochín, Jesús Maximiliano Guasso Rodríguez y Aníbal Medina Cabrera



Neurotecnologías y neuroderechos: un mundo futurista haciéndose presente

Resumen

Las neurotecnologías permiten registrar, analizar y modificar la actividad del sistema nervioso y tienen aplicaciones en diversos ámbitos, uno de ellos, el de la salud. Su creciente desarrollo plantea desafíos relacionados con la privacidad mental, la autonomía y el acceso equitativo. En este contexto, los neuroderechos buscan proteger a las personas frente al uso y avance de estas tecnologías.

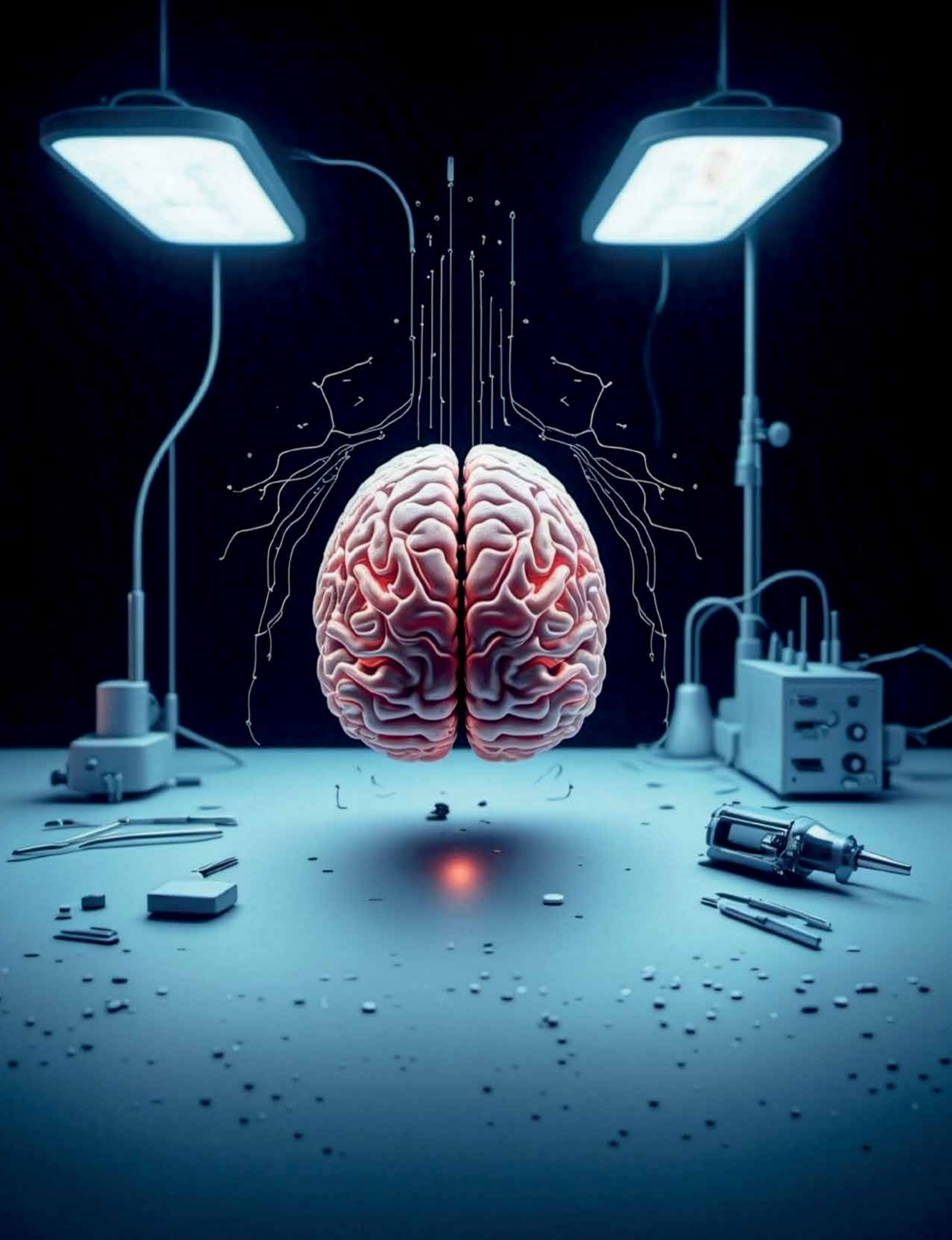
Abstract

Neurotechnologies make it possible to record, analyze, and modify nervous system activity and have applications in various fields, such as healthcare. Their growing development raises challenges related to mental privacy, autonomy, and equitable access. In this context, neurorights seek to protect people against the use and advancement of these technologies.

Introducción

Imagina un futuro en el que la ciencia ficción se convierte en realidad y un dispositivo conectado a tu cerebro te permite controlar tu entorno con sólo pensarlo. Te despiertas, piensas en una taza de café y la cafetera comienza a prepararlo. Si bien este escenario –cada vez menos lejano– presenta posibilidades sorprendentes, también plantea cuestiones importantes: ¿qué información sobre nuestra actividad cerebral podría obtenerse mediante estas tecnologías?, ¿quién podría acceder a ella?, ¿cómo podría utilizarse?

Estas interrogantes adquieren especial relevancia ante el rápido desarrollo de las neurotecnologías y su creciente aplicación, particularmente, en el ámbito de la salud. El acceso equitativo, la privacidad mental y la autonomía se presentan como posibles desafíos que deben asumirse y debatirse con el fin de establecer mecanismos que protejan a las personas del uso de estas tecnologías. Dado este



contexto, en este artículo exploramos las principales aplicaciones de las neurotecnologías, sus beneficios y riesgos, así como el debate ético y jurídico surgido en torno a ellas bajo el término de los neuroderechos.

■ Las neurotecnologías en el ámbito de la salud

■ A grandes rasgos, las neurotecnologías pueden entenderse como un conjunto de herramientas y técnicas que permiten registrar, analizar y modificar la actividad del sistema nervioso, especialmente del cerebro. Aunque el término “neurotecnología” es relativamente reciente, algunas de las técnicas que actualmente se incluyen en este campo se utilizan desde hace décadas.

Un ejemplo ilustrativo es la terapia electroconvulsiva, desarrollada durante el siglo xx como tratamiento psiquiátrico y conocida popularmente como *electroshock*. Esta técnica utiliza corrientes eléctricas controladas para producir una convulsión terapéutica bajo condiciones médicas supervisadas. En la actualidad existen diferentes técnicas de neuromodulación o estimulación cerebral basadas en este procedimiento, que se utilizan o investigan para el tratamiento de diferentes trastornos neurológicos y psiquiátricos, entre ellos la depresión, la enfermedad de Parkinson y la epilepsia.

Otra técnica relacionada con la regulación de la actividad cerebral es el *neurofeedback*, que le propor-

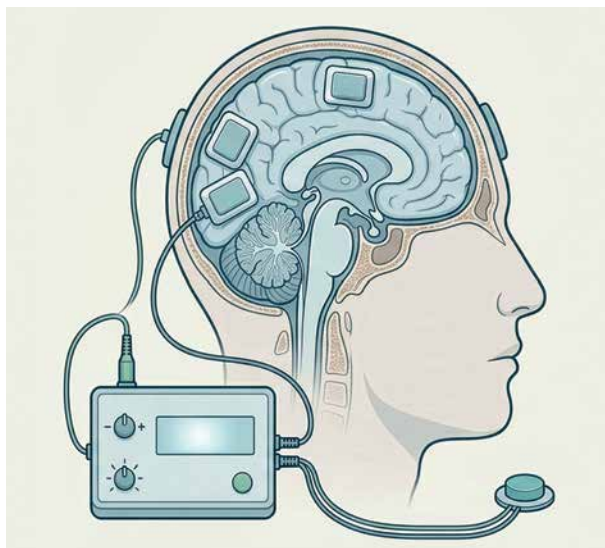
ciona a una persona información en tiempo real sobre determinadas señales de su actividad cerebral con el objetivo de que aprenda a modificarlas. Para ello pueden utilizarse registros electroencefalográficos y señales visuales o auditivas como retroalimentación. El *neurofeedback* ha sido estudiado en diferentes condiciones, entre ellas el trastorno por déficit de atención e hiperactividad, el insomnio y la ansiedad, aunque su eficacia y nivel de evidencia varían dependiendo de la condición y del protocolo utilizado.

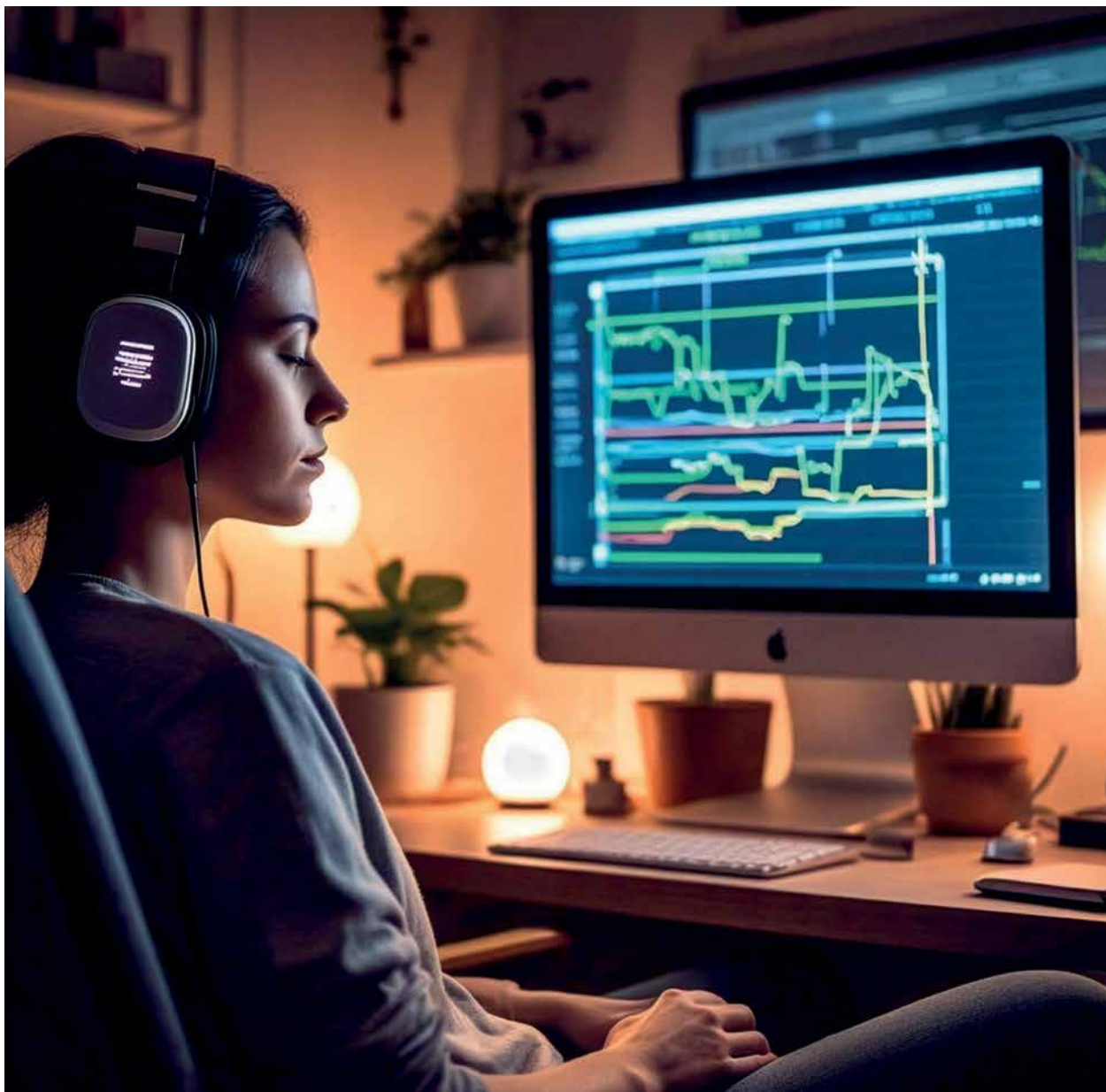
Por otro lado, las interfaces cerebro-computadora o BCI (por sus siglas en inglés) permiten establecer una vía de comunicación entre la actividad cerebral y dispositivos externos sin depender de comandos motores convencionales. Estas interfaces tienen aplicaciones particularmente relevantes en la rehabilitación de personas con alteraciones motoras graves, ya que pueden permitir el control de dispositivos externos, como prótesis o sistemas de asistencia. También se investigan sus posibles aplicaciones en el entrenamiento y la rehabilitación de distintas funciones cognitivas y motoras mediante entornos virtuales y otras herramientas digitales.

Otro conjunto de herramientas ampliamente utilizado corresponde a las técnicas de neuroimagen, como la *resonancia magnética funcional* (fMRI) y la *tomografía por emisión de positrones* (PET), que permiten estudiar distintos aspectos de la estructura y la función cerebral. Estas técnicas tienen aplicaciones en la investigación neurocientífica y biomédica que contribuyen al diagnóstico, seguimiento y estudio de distintos padecimientos.

El desarrollo de estas neurotecnologías ha adquirido gran relevancia precisamente por la elevada prevalencia de las enfermedades neurológicas que hoy en día representan una importante carga para la salud mundial. Muchas de estas enfermedades carecen todavía de tratamientos curativos, por lo que el desarrollo de nuevas herramientas para su diagnóstico, rehabilitación y tratamiento resulta especialmente valioso.

Asimismo, la integración de la inteligencia artificial (IA) está ampliando las posibilidades de análisis de grandes cantidades de información médica y neurocientífica. Los algoritmos pueden contribuir a





identificar patrones en imágenes y otros datos clínicos, así como al desarrollo de herramientas para el diagnóstico y la personalización de tratamientos. En este sentido, una línea de investigación bastante peculiar es el desarrollo de los llamados *gemelos digitales*, modelos virtuales que buscan representar características de un individuo y que podrían utilizarse para simular y evaluar posibles respuestas a determinadas intervenciones clínicas.

En conjunto, estos avances muestran el gran potencial de las neurotecnologías y la IA para trans-

formar diferentes áreas de la investigación y la atención médica. Sin embargo, su desarrollo e implementación también plantean desafíos tecnológicos, sociales y éticos que deben analizarse cuidadosamente para promover un uso seguro, responsable y equitativo.

Riesgos de las neurotecnologías

 Algunas neurotecnologías permiten registrar y procesar datos neuronales y otra información relaciona-

da con la actividad del sistema nervioso. Por ello, el creciente desarrollo de dispositivos invasivos y no invasivos, tanto para aplicaciones clínicas como de investigación y consumo, plantea interrogantes sobre la recopilación, almacenamiento, procesamiento y posible uso de dicha información fuera de los contextos de origen. Al considerarse información sensible sobre la fisiología o la salud de una persona, su protección constituye uno de los principales desafíos asociados con el desarrollo de estas tecnologías (OECD, 2019).

Al igual que ocurre con otros sistemas digitales, las neurotecnologías pueden presentar vulnerabilidades de seguridad que podrían permitir el acceso no autorizado a información personal. Por lo que, conforme aumente su uso, será necesario desarrollar mecanismos de protección que reduzcan los riesgos asociados con el procesamiento y transmisión de los datos; especialmente ante la posibilidad de que determinada información obtenida de la actividad cerebral permita realizar inferencias sobre aspectos relacionados con los estados o procesos mentales de las personas.

Esto es muy relevante ya que, actualmente, la propaganda política, la publicidad comercial, las campañas de salud y otras formas de comunicación persuasiva buscan orientar actitudes, preferencias o conductas mediante distintas estrategias. Desde las neurociencias se ha observado que la efectividad de este tipo de comunicación se relaciona con procesos cognitivos y afectivos asociados con la valoración, la recompensa y la relevancia social, los cuales intervienen en la toma de decisiones (Vezich y cols., 2017). Esto no implica que la comunicación persuasiva sea lo único que determina nuestras acciones, pero sí puede influir de forma importante en la manera en que evaluamos la información y elegimos entre distintas alternativas.

En los entornos digitales, esta capacidad de persuasión adquiere nuevas características debido al uso de algoritmos que seleccionan y recomiendan contenidos a partir del comportamiento y las preferencias de los usuarios. Esta personalización puede modificar aquello a lo que una persona se encuentra expuesta y aumentar la presencia de determinados

contenidos. Sin embargo, los efectos de estos sistemas sobre fenómenos complejos, como la polarización política o las decisiones de consumo, dependen de múltiples factores y continúan siendo objeto de investigación.

En este contexto, el desarrollo de las neurotecnologías plantea una preocupación adicional respecto a que la información obtenida a partir de datos neuronales pueda utilizarse en el futuro para desarrollar formas de personalización o persuasión más específicas. Esta posibilidad refuerza la necesidad de establecer límites claros para la recopilación y el uso de esta información, particularmente cuando pueda emplearse para influir en la toma de decisiones o comprometer la autonomía de las personas.

Otro desafío importante se refiere al acceso a las neurotecnologías. Su desarrollo e implementación pueden implicar costos elevados debido a la complejidad científica y tecnológica, así como al uso de componentes especializados, como sensores, microchips y materiales biológicos. Estas condiciones pueden limitar su disponibilidad y profundizar las desigualdades existentes en la atención sanitaria. Por lo tanto, garantizar un acceso equitativo resulta relevante no sólo desde la perspectiva del derecho a la salud, sino en términos de justicia social y ética. Este desafío podría adquirir aún más relevancia con el uso de neurotecnologías destinadas a mejorar determinadas capacidades cognitivas, por lo que un acceso inequitativo podría profundizar o generar nuevas formas de desigualdad.

El debate sobre los neuroderechos

Los riesgos y desafíos asociados con las neurotecnologías han dado lugar a importantes debates en el campo de la *neuroética*, área que aborda las implicaciones éticas, sociales y filosóficas de los avances en las neurociencias. Entre sus principales interrogantes se encuentran: ¿se debe permitir la mejora cognitiva no terapéutica?, ¿hasta qué punto es éticamente aceptable intervenir el cerebro?, ¿cómo puede la modificación de los procesos cognitivos afectar la identidad personal?, ¿qué implicaciones tendría para la equidad y la justicia social?



Asimismo, los avances recientes en neurotecnologías están haciendo posible inferir, bajo condiciones experimentales específicas, información relacionada con determinados estados y contenidos mentales a partir de la actividad cerebral (Tang y cols., 2023). Aunque las tecnologías actuales no permiten un acceso directo y generalizado a los pensamientos, estos avances plantean dudas significativas sobre la privacidad mental y el uso de los datos neuronales.

Cabe destacar que la discusión sobre los neuroderechos ha dado lugar a distintas propuestas y clasi-

ficaciones. En ese marco, Marcello Ienca y Roberto Andorno (2017) analizaron la necesidad de adaptar el marco de los derechos humanos ante los avances de las neurotecnologías y propusieron cuatro derechos relacionados con la protección de la dimensión mental: libertad cognitiva, privacidad mental, integridad mental y continuidad psicológica. Otra propuesta influyente surgió del Morningside Group, donde Rafeal Yuste y colaboradores (2017) identificaron cuatro áreas prioritarias: privacidad y consentimiento, agencia e identidad, mejora cognitiva y



sesgos. A partir de estos marcos, se han desarrollado cinco ámbitos clave de protección:

1. *Privacidad mental*: protege los datos neuronales y la información sobre los estados o procesos mentales que puedan obtenerse a partir de ellos.
2. *Identidad personal*: busca preservar la identidad y el sentido de sí mismo frente a posibles alteraciones derivadas del uso de las neurotecnologías.
3. *Libre albedrío o agencia*: protege la capacidad de tomar decisiones de manera autónoma, sin interferencias neurotecnológicas no consentidas.
4. *Acceso equitativo a la mejora mental*: plantea una distribución justa de los avances dirigidos a mejorar determinadas capacidades cognitivas, evitando profundizar desigualdades sociales.
5. *Protección frente al sesgo algorítmico*: busca evitar que los algoritmos utilizados junto con las neurotecnologías generen discriminación o reproduzcan sesgos.

Si bien estas propuestas han representado un avance importante en la discusión sobre la protec-

ción de la dimensión mental o cognitiva, existe un debate sobre si los desafíos derivados del uso actual y futuro de las neurotecnologías requieren el reconocimiento de nuevos derechos fundamentales. Mientras algunos consideran necesarias protecciones específicas, otros sostienen que los derechos ya reconocidos, como la privacidad, la libertad de pensamiento, la integridad personal y la no discriminación, pueden ofrecer una protección adecuada si se interpretan y aplican en los nuevos escenarios tecnológicos (p. ej., Bublitz, 2022). De acuerdo con esta última postura, la proliferación de nuevos derechos podría fragmentar el marco jurídico y disminuir la efectividad de los derechos existentes. La controversia, por tanto, no se limita a qué aspectos de la dimensión mental deben protegerse, sino también a cuál es la estrategia jurídica más adecuada para hacerlo.

En América Latina, Chile ha desempeñado un papel relevante en esta discusión. En 2021 promulgó la Ley núm. 21.383, que modificó el artículo 19 de su Constitución y estableció que la legislación debe resguardar de manera especial la actividad cerebral y la información proveniente de ella. Con ello, Chile se convirtió en uno de los primeros países en incorporar explícitamente esta protección en su marco constitucional.

En México, la discusión también ha llegado al ámbito legislativo. En 2024, se presentó una iniciativa para expedir una Ley General de Neuroderechos y Neurotecnologías orientada a regular el desarrollo y aplicación de estas tecnologías y proteger la dignidad y los derechos humanos. Este debate legislativo continúa en curso y uno de sus principales retos consiste en integrar una propuesta dentro de un marco normativo más amplio para una Ley General de Inteligencia Artificial donde se consideren medidas cautelares para los sistemas algorítmicos que vulneren la privacidad mental o promuevan sesgos o manipulación hacia los usuarios.

Conclusiones

El rápido desarrollo de las neurotecnologías tiene un enorme potencial para mejorar diversos aspectos

de la salud y la vida humanas; pero también plantea desafíos importantes. En este escenario, los neuroderechos constituyen una propuesta para fortalecer la protección de la dimensión mental frente al desarrollo de las neurotecnologías. Más allá de la estrategia jurídica adoptada, resulta fundamental garantizar la protección de la privacidad, la autonomía, la identidad y la integridad de las personas, así como promover un acceso equitativo a estas tecnologías. Por ello, se requiere abrir y fomentar un diálogo científico, ético, social y jurídico continuo, que permita discutir cómo aprovechar los beneficios de las neurotecnologías sin comprometer los derechos y la dignidad humanos.

Alba Marcela Zárate Rochín

Laboratorio de Neurocognición, Facultad de Psicología, Universidad Nacional Autónoma de México.

mzarateroc@gmail.com

Jesús Maximiliano Guasso Rodríguez

Licenciatura en Inteligencia Artificial, Universidad Autónoma del Estado de Morelos.

maxito.78923@gmail.com

Anibal Medina Cabrera

Licenciatura en Inteligencia Artificial, Universidad Autónoma del Estado de Morelos.

anibalmecca8@gmail.com

Referencias específicas

- Bublitz, J. C. (2022), "Novel neurorights: from nonsense to substance", *Neuroethics*, 15:7. Disponible en: <https://doi.org/10.1007/s12152-022-09481-3>.
- Ienca, M. y R. Andorno (2017), "Towards new human rights in the age of neuroscience and neurotechnology", *Life Sciences, Society and Policy*, 13:5. Disponible en: <https://doi.org/10.1186/s40504-017-0050-1>.
- OECD (2019), "Recommendation of the Council on Responsible Innovation in Neurotechnology" (OECD/LEGAL/0457), Organisation for Economic Co-operation and Development [en línea]. Disponible en: <https://legalinstruments.oecd.org/en/instruments/OECD-LEGAL-0457>, consultado el 30 de agosto de 2026.
- Tang, J., A. LeBel, S. Jain y A. G. Huth (2023), "Semantic reconstruction of continuous language from non-invasive brain recordings", *Nature Neuroscience*, 26(5):858-866. Disponible en: <https://doi.org/10.1038/s41593-023-01304-9>.
- Vezich, I. S., P. L. Katzman, D. L. Ames, E. B. Falk y M. D. Lieberman (2017), "Modulating the neural bases of persuasion: why/how, gain/loss, and users/non-users", *Social Cognitive and Affective Neuroscience*, 12(2):283-297. Disponible en: <https://doi.org/10.1093/scan/nsw113>.
- Yuste, R., S. Goering, B. Agüera y Arcas *et al.* (2017), "Four ethical priorities for neurotechnologies and AI", *Nature*, 551:159-163. Disponible en: <https://doi.org/10.1038/551159a>.

Johaly del Carmen Anguiano Buenfil, Angélica Zepeda Rivera y Emilio J. Galván



El riesgo de las infecciones durante el embarazo: su relación con las enfermedades mentales

Resumen

Asociamos frecuentemente las infecciones durante el embarazo con riesgos para la salud de los hijos, pero ¿tiene fundamento científico esta percepción? Este artículo sustenta esa idea y explora cómo las infecciones maternas pueden aumentar el riesgo de que los hijos desarrollen trastornos psiquiátricos.

Abstract

Infections during pregnancy are commonly associated with health risks for the offspring, but is this perception supported by scientific evidence? This article examines the evidence underlying this association and explores how maternal infections may increase the risk of psychiatric disorders in the offspring.

Es probable que los primeros años del siglo XXI no sean recordados en el futuro tanto por la dureza de la pandemia de COVID-19 como por sus avances tecnológicos. A pesar de la angustia por el confinamiento y el aislamiento social que marcó de manera tan profunda la vida cotidiana, es posible que las generaciones futuras apenas tengan memoria de lo que vivimos. Y tal vez también se pierda en el olvido un hecho curioso: durante el confinamiento aumentaron los nacimientos; esto dio lugar a lo que algunos llaman hoy la “generación COVID”. En ese contexto de incertidumbre, una pregunta inquietante cruzó por la mente de muchas personas al enterarse de contagios en mujeres gestantes: ¿qué le ocurre a una mujer embarazada con COVID-19? ¿Puede la infección afectar al bebé? La preocupación por esa posibilidad resonó en innumerables hogares alrededor del mundo.

Para analizar posibles respuestas a estas inquietudes, nos remontaremos a 1957, año en que se presentó una situación medianamente comparable a la vivida durante la pandemia de COVID-19. A finales de ese año, los habitantes de Helsinki, en Finlandia, sufrieron una grave epidemia de gripe tipo A2; y en 1984, las autoridades



sanitarias realizaron un estudio epidemiológico en sus hospitales psiquiátricos y descubrieron que una proporción considerable de pacientes con esquizofrenia provenían de madres que habían contraído la gripe tipo A2 durante su embarazo. Otro caso igualmente alarmante sucedió en Estados Unidos. En 1964 los norteamericanos experimentaron una epidemia ocasionada por el virus de rubéola que afectó a 12.5 millones de personas. Como consecuencia, 11 000 mujeres embarazadas sufrieron abortos espontáneos, se registró el deceso de 2 100 recién nacidos y más de 20 000 bebés presentaron síndrome de rubéola congénita, el cual consiste en un conjunto de malformaciones que pueden incluir anomalías cardíacas, sordera y daño neurológico permanente. En los años siguientes, los científicos que monitorearon las consecuencias de esa epidemia identificaron una correlación inusual: tras la pandemia de rubéola de 1964, la frecuencia de esquizofrenia y autismo entre las personas expuestas prenatalmente aumentó de menos de 1 % en la población no expuesta a aproximadamente 13 % y 20 %, respectivamente (Estes y McAllister, 2016). En **cohorte** específica de 53 personas expuestas a la rubéola durante la gestación, 11 fueron diagnosticadas posteriormente con algún trastorno psiquiátrico (Brown y Derkits, 2010).

A partir de estos hallazgos, los científicos de laboratorio comenzaron a preguntarse si existía una relación directa entre el embarazo, las infecciones maternas y la incidencia de enfermedades psiquiátricas. En otras palabras, se planteó la posibilidad de que las infecciones maternas durante la gestación podrían afectar el desarrollo del cerebro del bebé en formación. Posteriormente, un análisis exhaustivo de historiales clínicos de personas con padecimientos psiquiátricos confirmó la sospecha: la incidencia de estas enfermedades es mayor en hijos de mujeres que estuvieron expuestas a infecciones durante su embarazo. Con el tiempo, los científicos descubrieron que no sólo los virus, sino también las infecciones bacterianas, fúngicas y parasitarias que ocurren durante etapas muy específicas del embarazo pueden aumentar el riesgo de que los hijos desarrollen trastornos psiquiátricos. Estamos hablando de padecimientos psiquiátricos como la depresión, el autismo,

la esquizofrenia e incluso algunas formas de epilepsia (**Figura 1**).

Sin embargo, la realidad es más compleja de lo que parece, pues ni todas las madres que sufren infecciones durante el embarazo tendrán hijos con trastornos psiquiátricos, ni todas las personas que presentan estos trastornos estuvieron expuestas a una infección antes de nacer (Estes y McAllister, 2016). Por ejemplo, en una cohorte expuesta prenatalmente a la rubéola, 11 de 53 personas –cerca del 21 %– desarrollaron un trastorno psiquiátrico, mientras que el 79 % restante no lo presentó (Brown y Derkits, 2010), y aunque el riesgo fue unas 15 veces mayor que en la población general (Brown y Derkits, 2010), la infección no determinó quién desarrollaría la enfermedad. Aún falta mucho camino por recorrer en este lado de la investigación para determinar qué hace que un bebé esté o no afectado.

Debido a los diversos factores que influyen en el ambiente materno-embrionario, la relación entre las infecciones maternas durante el embarazo, las alteraciones en el desarrollo cerebral y la aparición posterior de trastornos psiquiátricos en la descendencia constituye un fenómeno complejo. El estudio de esta relación se ha abordado bajo el concepto de activación inmune materna, que describe la respuesta inmunológica de la madre ante una infección y sus posibles efectos sobre el desarrollo fetal. Debido a su relevancia clínica y a su potencial para esclarecer los mecanismos involucrados en estos trastornos, este campo de investigación ha experimentado un crecimiento sostenido durante las últimas dos décadas.

Los estudios pioneros en esta área se centraron en explicar cómo los patógenos, ya fueran virus, hongos o bacterias, dañan el cerebro en formación. En un principio, la creencia predominante fue que los patógenos dañaban directamente al tejido cerebral, y el desafío era descubrir su mecanismo de infección. Aunque no entraremos en detalle sobre los resultados de esos estudios, podemos resumirlos así: la suposición generalizada de que el patógeno (virus, hongos o bacterias) daña al cerebro resultó poco certera. Con el tiempo y la acumulación de trabajos científicos, surgió un panorama muy diferente y revelador. La mayoría de los estudios coincidieron

Cohorte

Población con características comunes a la que se observa durante un periodo para registrar la historia natural de una enfermedad o un padecimiento.

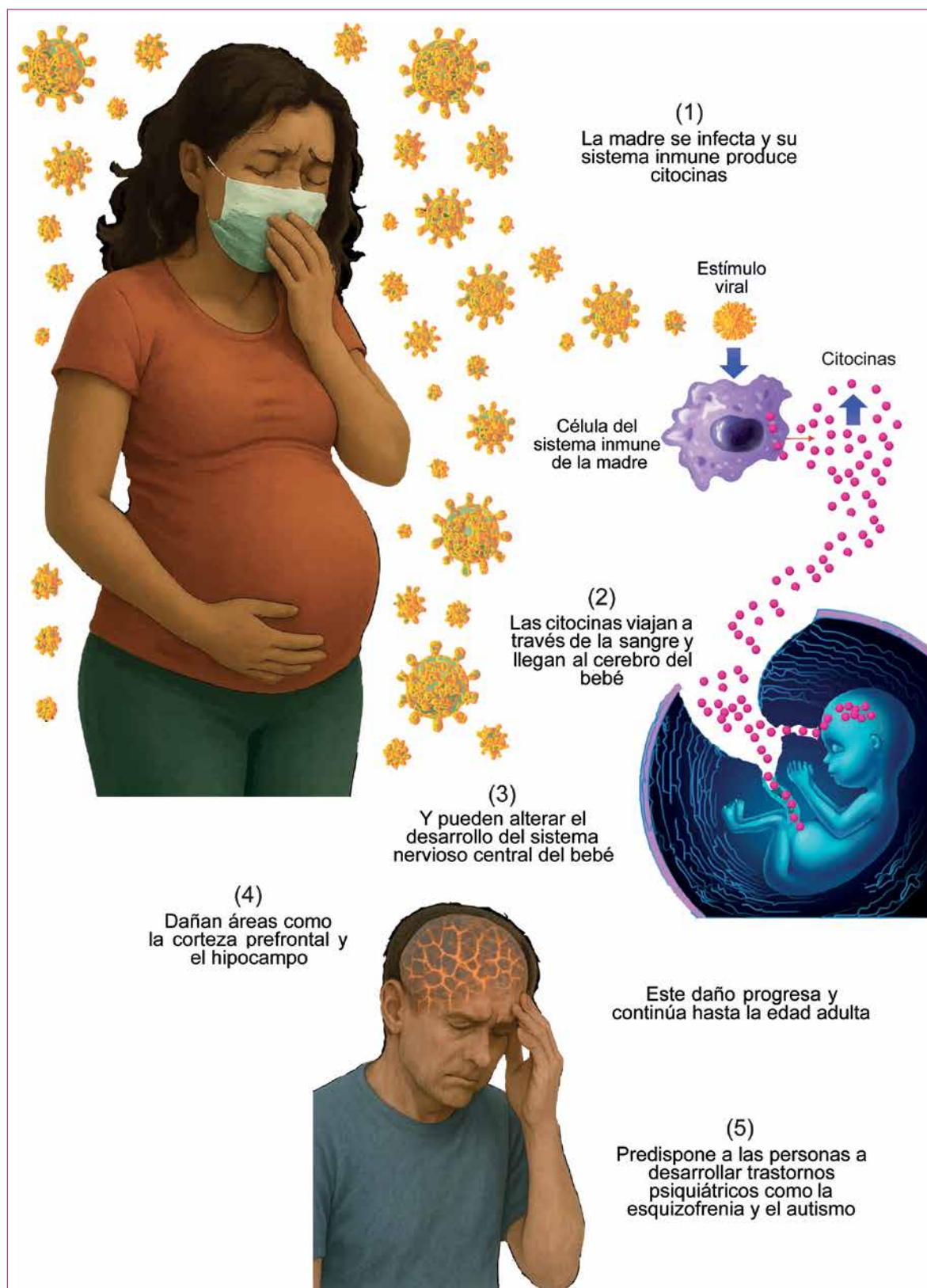


Figura 1. Esquema ilustrativo del estrés prenatal inducido por una respuesta inmune materna. Cuando una mujer embarazada enfrenta una infección (como un virus o una bacteria), su sistema inmune se activa para defenderse produciendo citocinas proinflamatorias. Las citocinas atraviesan distintas barreras hasta llegar al cerebro del bebé en desarrollo. Una vez allí, estas moléculas pueden interferir con la formación del sistema nervioso alterando su desarrollo desde etapas muy tempranas.

en que el primer responsable del daño en el tejido cerebral embrionario en formación no eran los patógenos, sino la respuesta inmunológica de la madre, es decir, esa reacción celular para combatir y eliminar a los patógenos invasores (**Figura 1**).

¿Cómo reproducimos el estrés prenatal en el laboratorio?

 Hoy en día, los científicos contamos con modelos animales –desarrollados usando ratas y ratones– que nos permiten estudiar en el laboratorio cómo el estrés inmunológico durante el embarazo afecta al cerebro en formación. Estos modelos han ayudado a identificar cambios que van desde el funcionamiento de los genes y la forma en que se activan o desactivan, hasta la manera en que las neuronas se comunican entre sí. Todos estos cambios pueden tener un impacto negativo en la conducta y el aprendizaje de los animales que estuvieron expuestos a estrés prenatal.

¿Y cómo funcionan los modelos animales de estrés prenatal en el laboratorio? De forma sencilla, administramos a una hembra gestante una molécula que activa su sistema inmunitario. Entre las utilizadas se encuentran el lipopolisacárido bacteriano (LPS), agonista del receptor TLR4; el ácido poliino-sínico-policitidílico (Poly I:C), agonista de TLR3; y el Resiquimod, un agonista sintético de los receptores TLR7 y TLR8. Cuando entran en el cuerpo estas moléculas “engañan” al sistema inmunológico haciéndole creer que hay una infección, ya sea bacteriana (en el caso del LPS) o viral (en el caso del Poly I:C o el Resiquimod). Esto provoca una respuesta inflamatoria en la madre, en la que se activan células de defensa y se liberan citocinas, quimiocinas y otros mensajeros inmunológicos. Aunque estas moléculas son esenciales para combatir infecciones, su aumento excesivo o prolongado durante etapas críticas del embarazo puede alterar el equilibrio del ambiente materno-fetal y afectar el desarrollo cerebral de la descendencia, debido a que el equilibrio de estas moléculas en el entorno embrionario es delicado y se altera rápidamente (**Figura 2**).

Uno de los descubrimientos más sorprendentes en el estudio del estrés prenatal y la activación in-

mune materna fue encontrar que algunas de estas citocinas pueden atravesar la placenta y llegar directamente al cerebro del embrión. Hoy sabemos que la capacidad de las citocinas maternas de atravesar la barrera placentaria es lo que les permite influir directamente en la actividad de las células inmunológicas del cerebro embrionario: la microglía.

Aquí vale la pena hacer un breve paréntesis para explicar qué es la microglía y por qué tiene un papel tan importante en esta condición. La microglía es una célula del cerebro que participa activamente en la formación, maduración y funcionamiento del sistema nervioso central, y cuando funciona de manera aberrante, la microglía es capaz de modificar, de manera permanente, la función de las neuronas y desencadenar diversos padecimientos cerebrales. Así, la microglía es una célula inmunológica residente del cerebro que, en condiciones normales, se encarga de tareas como la vigilancia inmunológica; es decir, supervisa continuamente su entorno para detectar señales de daño, infección o cualquier alteración, además de regular la respuesta inflamatoria. Además, la microglía responde de manera muy activa a las señales externas, como las citocinas, generando respuestas que pueden ir desde proteger el cerebro hasta, paradójicamente, provocar daños si su activación es excesiva.

¿Qué regiones cerebrales son más vulnerables al estrés prenatal?

 Supongamos ahora un cerebro embrionario en pleno desarrollo y una infección en la madre embarazada. ¿Significa esta condición que todo el cerebro embrionario será vulnerable a alteraciones provocadas por el estrés prenatal o que sólo algunas regiones cerebrales sufrirán alteraciones? La respuesta no es muy alentadora y revela lo limitado que todavía es nuestro conocimiento sobre esta condición, pues no sabemos con claridad qué ocurre en las distintas regiones del cerebro expuestas al estrés prenatal por activación inmune materna. A pesar de este panorama complicado, hoy sabemos mucho más sobre cómo esta condición afecta zonas específicas del cerebro. Las distintas regiones cerebrales y los diferentes

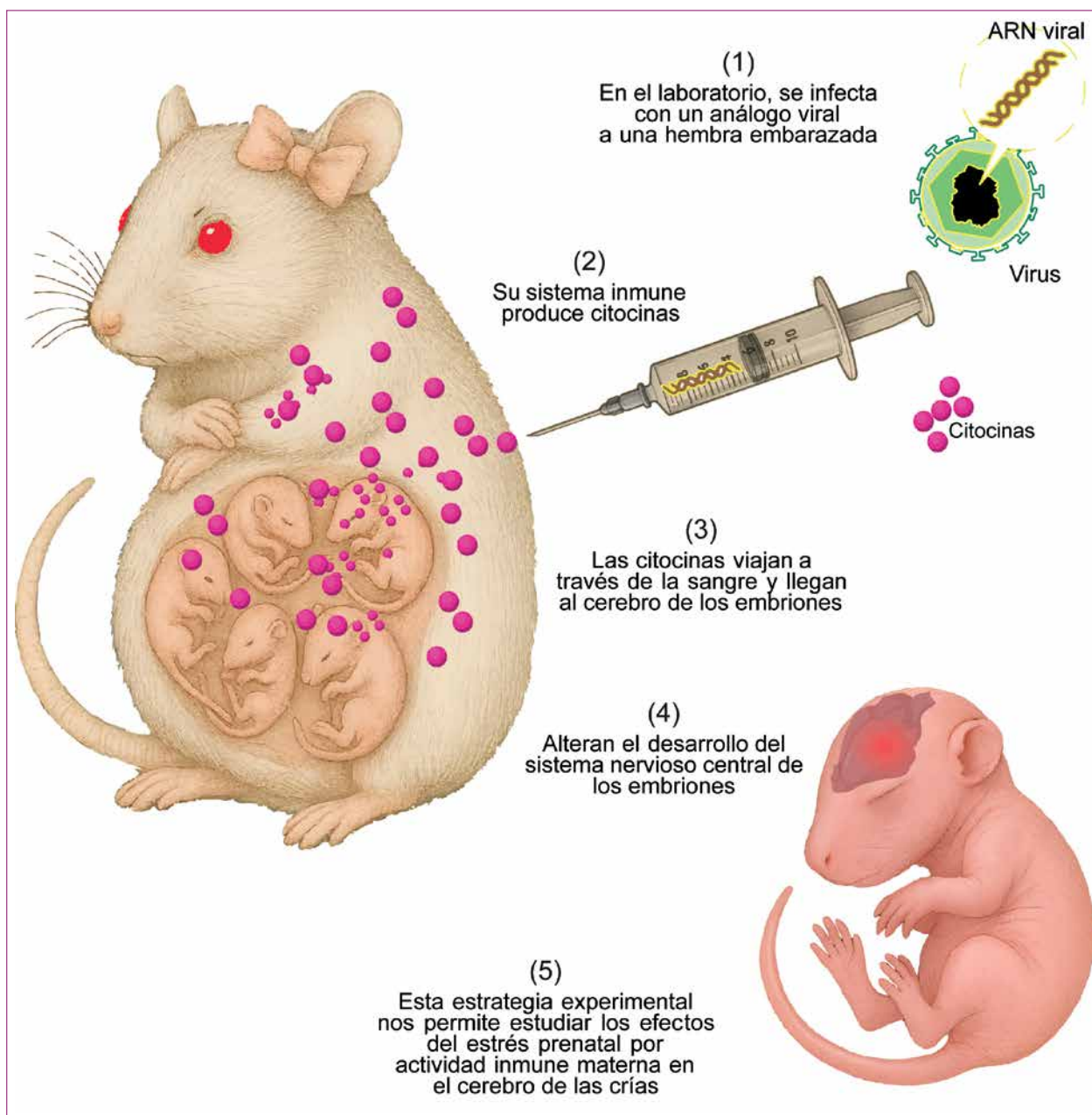
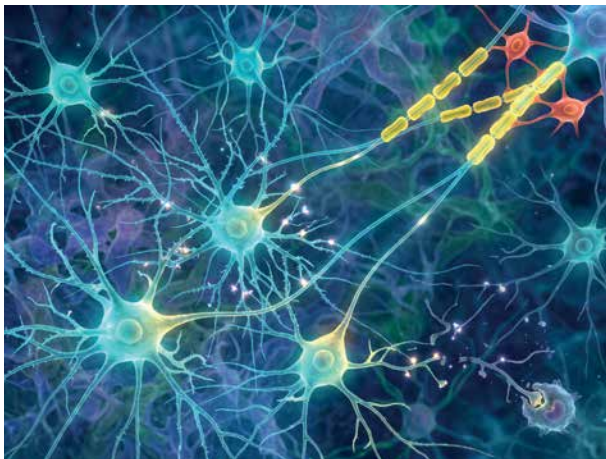


Figura 2. Modelo animal para estudiar el efecto de las infecciones prenatales. En este modelo, se aplica a una hembra gestante una sustancia llamada Poli I:C, que imita la presencia de un virus y activa su sistema inmunológico. En respuesta, la hembra embarazada produce citocinas, sustancias que pueden alcanzar al embrión en desarrollo y alterar los procesos normales de formación del sistema nervioso. Gracias a este modelo, es posible observar en distintas etapas de la vida del animal los efectos tempranos de una infección prenatal y estudiar los mecanismos celulares que podrían estar involucrados en trastornos del neurodesarrollo.

tipos de neuronas no se desarrollan al mismo tiempo, sino que maduran de manera secuencial. Por ello, algunas regiones pueden ser especialmente vulnerables, dependiendo del momento del embarazo en que ocurre la respuesta inmunológica materna. La neurogénesis embrionaria comienza con la formación del

tubo neural a partir del ectodermo durante la tercera semana de gestación. En la cuarta semana, el tubo neural se divide en tres vesículas primarias –prosencefalo, mesencefalo y rombencefalo–, que más tarde originan las distintas regiones del cerebro. Entre las semanas 6 y 18, las células progenitoras neurales



se multiplican intensamente en la zona ventricular y migran hacia el exterior para formar las capas corticales. Finalmente, las neuronas inmaduras extienden dendritas y axones, establecen conexiones sinápticas e inician procesos como la poda y mielinización, que continúan después del nacimiento. Estas etapas no ocurren al mismo tiempo en todo el cerebro. Cada región atraviesa periodos en los que su desarrollo es especialmente sensible a la inflamación; a estos periodos se les conoce como ventanas de vulnerabilidad. Entre las regiones más sensibles destacan la corteza cerebral y el hipocampo.

La corteza, junto con otras áreas, funciona como una gran central de mando de nuestro cerebro: procesa lo que sentimos y participa en funciones como la memoria, el razonamiento, el lenguaje, el pensamiento y la conciencia. El hipocampo representa el motor que impulsa el aprendizaje y nos permite orientarnos en el espacio. No es casualidad que estas áreas sean las más afectadas en trastornos como la depresión, el autismo o la esquizofrenia. Y ahora sabemos que el daño celular en estas zonas, cuando ocurre durante el desarrollo embrionario, representa un factor de riesgo mayor para que los hijos presenten problemas psiquiátricos en el futuro.

Epidemiología del estrés prenatal por actividad inmune materna

Un aspecto muy interesante de esta condición patológica es cómo sus efectos se manifiestan desde las

primeras etapas de la vida postnatal. Sabemos que los infantes expuestos a esta condición suelen tener una infancia relativamente normal, sin señales evidentes de alteración psiquiátrica y es hasta la adolescencia o adultez temprana cuando aparecen los síntomas de enfermedades psiquiátricas. Esto abre la puerta a preguntas muy importantes (aunque aquí nos limitaremos a dos): ¿los bebés expuestos a estrés prenatal nacen con daño neuronal, o ese daño se va desarrollando poco a poco hasta hacerse evidente más tarde?; y ¿por qué la esquizofrenia se presenta en unas personas, pero no en otras? Sobre la primera pregunta, sabemos que estos cerebros experimentan alteraciones en la comunicación neuronal desde el nacimiento. De hecho, los estudios en animales muestran que, desde etapas tempranas de la vida, pueden presentarse alteraciones en la comunicación entre las neuronas que limitan su capacidad de aprendizaje. Sin embargo, estas alteraciones no determinan por sí solas la aparición de un trastorno psiquiátrico. El riesgo depende de la interacción de múltiples factores, como los antecedentes clínicos y genéticos de la madre, la intensidad de la infección, y su estado nutricional, incluido el consumo de hierro y zinc. A lo largo del desarrollo también pueden influir la exposición a eventos traumáticos, la alimentación, el estrés crónico, el consumo de drogas durante la adolescencia, el nivel socioeconómico y el sexo. La combinación de estos factores puede favorecer la aparición de un padecimiento psiquiátrico.

Ahora bien, ¿por qué importa el sexo del recién nacido en el desarrollo de estos padecimientos? Muchos estudios epidemiológicos muestran diferencias entre niñas y niños en la frecuencia con que se diagnostican algunos trastornos; estas diferencias pueden depender de factores biológicos, sociales y diagnósticos. Por ejemplo, los niños tienen hasta cuatro veces más probabilidades de recibir un diagnóstico de autismo y presentan tasas más altas de esquizofrenia. Por otro lado, las mujeres tienen casi el doble de probabilidad de sufrir depresión o trastornos de ansiedad a partir de la pubertad, y más adelante, un mayor riesgo de padecer enfermedad de Alzheimer.

Nos queda claro que estamos comenzando a explorar la complejidad fisiológica detrás de cómo las

infecciones durante el embarazo son capaces de modificar el cerebro en formación y cuál es su papel en el desarrollo de los trastornos psiquiátricos.

Recientemente superamos una pandemia de origen viral (COVID-19) que afectó a muchas madres embarazadas, y no sabemos cómo esta infección repercutirá en el desarrollo cerebral y en la salud mental de los infantes expuestos. Tengamos presente que en países como el nuestro, donde las deficiencias en el sistema de salud afectan a los sectores más vulnerables y hacen que las infecciones durante el embarazo sean más comunes de lo que deberían, el riesgo latente de estos padecimientos está sembrado.

Sin embargo, no hay que ser pesimistas; contamos con una herramienta poderosa: la investigación científica básica. Desde nuestros laboratorios podemos identificar los mecanismos celulares y las señales tempranas asociadas con estos padecimientos. Además, el creciente desarrollo de las **tecnologías ómicas** permitirá complementar los avances de la farmacología y la neurofisiología, dirigidos a prevenir y tratar estos padecimientos.

Johaly del Carmen Anguiano Buenfil

Departamento de Farmacobiología, Cinvestav Sede Sur.

johaly.anguiano@cinvestav.mx

Angélica Zepeda Rivera

Departamento de Medicina Genómica y Toxicología Ambiental, Instituto de Investigaciones Biomédicas, UNAM.

azepeda@iibiomedicas.unam.mx

Emilio J. Galván

Departamento de Farmacobiología y Centro de Investigaciones sobre el Envejecimiento, Cinvestav Sede Sur.

ejgalvan@cinvestav.mx

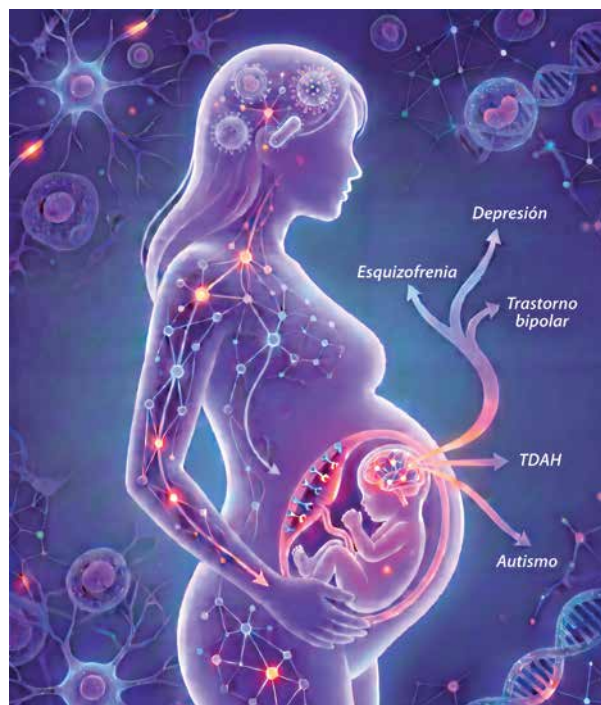
Referencias específicas

Brown A. S. y E. J. Derkits (2010), "Prenatal infection and schizophrenia: a review of epidemiologic and translational studies", *American Journal of Psychiatry*, 167(3):261-280. Disponible en: <https://doi.org/10.1176/appi.ajp.2009.09030361>.

Estes, M. L. y A. K. McAllister (2016), "Maternal immune activation: Implications for neuropsychiatric disorders", *Science*, 353(6301):772-777. Disponible en: <https://doi.org/10.1126/science.aag3194>.

Khandaker, G. M., J. Zimbron, G. Lewis y P. B. Jones (2013), "Prenatal maternal infection, neurodevelopment and adult schizophrenia: a systematic review of population-based studies", *Psychological Medicine*, 43:239-257. Disponible en: <https://doi.org/10.1017/s0033291712000736>.

NCIRD (31 de diciembre, 2020), *Impact of U.S. MMR Vaccination Program*, National Center for Immunization and Respiratory Diseases, Division of Viral Diseases [en línea]. Disponible en: <https://www.cdc.gov/rubella/vaccine-impact/index.html>, consultado el 27 de agosto de 2026.



Tecnologías ómicas

Herramientas científicas que permiten el estudio a gran escala de los componentes moleculares (ADN, ARN, proteínas, metabolismo) de los organismos.

Antonio Miranda-Jácome y Joel Flores

El papel materno en las plantas

Resumen

El papel materno influye enormemente en el desempeño, supervivencia y reproducción de toda planta en el planeta. Esto es evidente en la herencia genética, los cuidados maternos previos, durante y posteriores al nacimiento, así como en la reproducción culminante y las plantas nodriza, temas también expuestos en este artículo.

Abstract

The maternal role greatly influences the performance, survival, and reproduction of every plant on the planet. This is evident in genetic inheritance, in pre-, during, and post-birth maternal care, as well as in the culminating reproductive process and the nurse plants, topics also discussed in this article.

La herencia genética prenacimiento: la madre carga los dados

La reproducción es el fin último de todo ser vivo, pues sin ella cualquier especie estaría condenada a la extinción, lo que ocasionaría una pérdida significativa en la diversidad biológica del planeta. Las plantas, pese a ser, o por ser, organismos que permanecen fijos, presentan estrategias reproductivas que favorecen la *información genética materna*, ya sea *—grosso modo—* por la vía sexual, mediante la fecundación entre gametos de distinto componente genético, o asexual. Por la vía sexual, múltiples características pueden ser producto de genes heredados de manera directa por la planta madre en la descendencia, debido al efecto materno que provoca que, aun existiendo recombinación genética por la reproducción sexual entre células parentales (por ejemplo, polen y óvulos), el genoma de los hijos tiene mayor parecido con el materno por la transmisión directa de los genes almacenados en los **cloroplastos** de la madre (**Figura 1**). Asimismo, las plantas incrementan la herencia genética materna por medio de la *apomixis*, la cual es la producción asexual de semillas que poseen el genotipo (conjunto de genes de un individuo) idéntico a la madre al producirse sin la división celular, y la *automixis* o fecundación entre el óvulo con el polen de la misma planta madre.

Cloroplastos

Organelos de células vegetales responsables de convertir la luz solar en energía química y del color verde de las plantas.

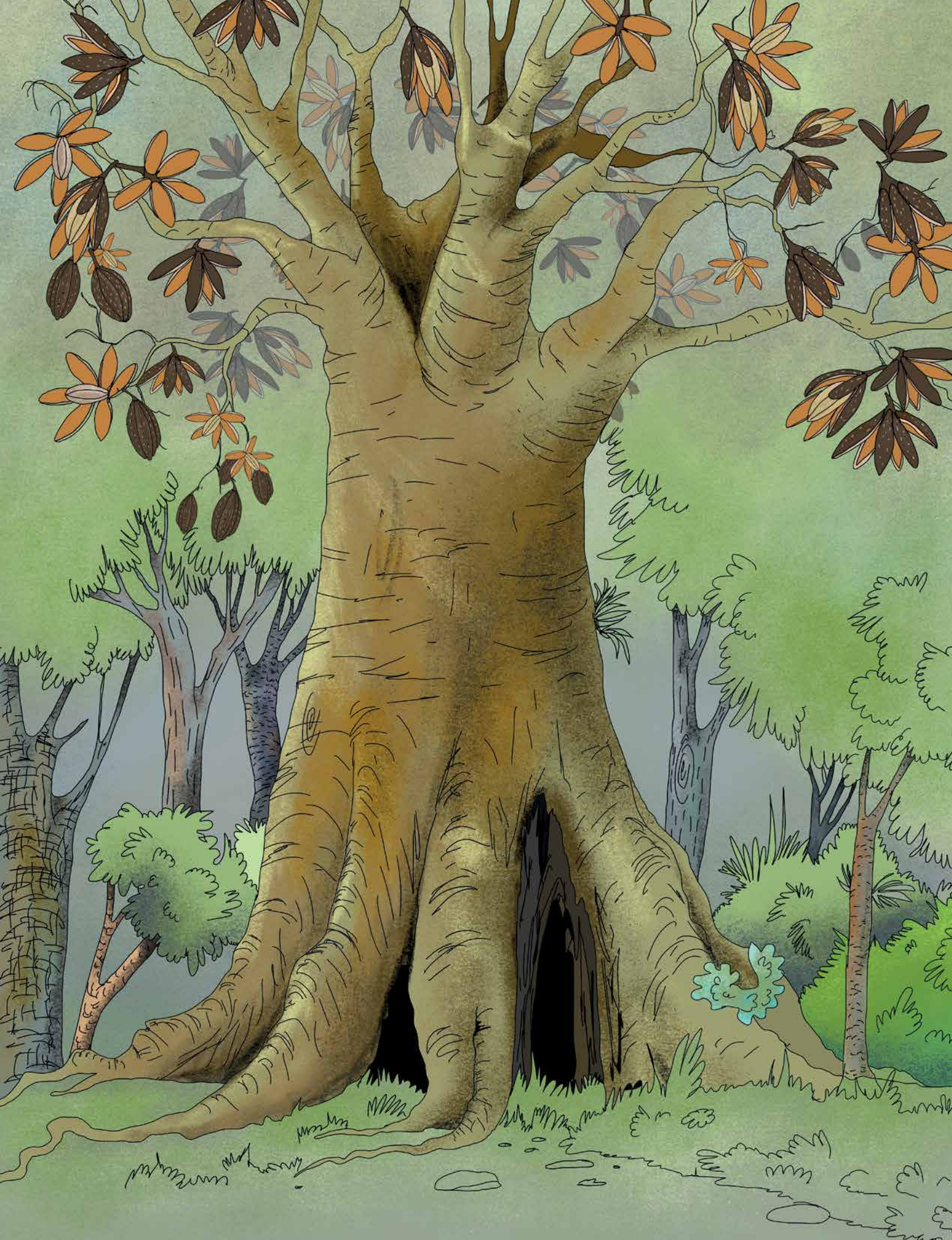




Figura 1. Asociación simbólica entre elementos del componente genético heredado por la vía materna en especies vegetales. Diseño: Paolo Miranda e IA.

Ambas estrategias son frecuentes en las familias Asteraceae, Poaceae y en especies frutales de consumo masivo (por ejemplo, la manzana), lo que sugiere que en estas angiospermas existe una mayor herencia genética materna (Eguiarte y cols., 1999).

Por la vía asexual la herencia genética materna en las plantas es total, pues se forma un nuevo individuo autónomo a partir de fragmentos de la planta madre (por ejemplo, estolones, yemas y esquejes), suprimiendo la información genética paterna, lo que genera una clonación natural y por tanto el genoma de ese nuevo individuo es idéntico al de la madre.

■ **Los obsequios maternos pre-, durante y postnacimiento**

■ Por nuestra condición humana, cuando se piensa en los *cuidados maternos* se restringe a los animales. Sin embargo, lo que el imaginario colectivo ignora

es que las plantas madre presentan cuidados de ese tipo, incluso complejamente elaborados a partir de las estructuras sexuales más diversas y complejas de la naturaleza que promueven el éxito *pre-, durante y postnacimiento* de su descendencia. La primera fase (*pre*), representada por múltiples formas, tamaños, olores y sabores encapsulados en estructuras efímeras o longevas denominadas flores (estróbilos o conos en gimnospermas, y antófilos o flores en angiospermas), las cuales utilizamos para adornar parques, jardines, o bien como obsequios en eventos que marcan el nacimiento, el festejo, el cortejo y hasta la muerte de un ser querido. Sin embargo, el rol materno de la estructura floral es incrementar la reproducción vegetal por la vía sexual, pese al gasto energético considerable para la planta madre. Esto porque la producción de las estructuras florales (por ejemplo, pétalos) y recompensas (néctar) consume una parte significativa de los recursos (agua y savia)



Figura 2. Estructuras reproductivas prenacimiento: a) flor de *Pilosocereus leucecephalus*; durante el nacimiento: b) fruto de *P. leucecephalus*, y postnacimiento: c) semilla de *Juglans pyriformis*. Fotos: Antonio Miranda-Jácome (a y b), Calendaria Garcías Morales (c).

que la planta madre podría emplear en la formación de otras estructuras (tallos, hojas y raíces) que le permitirían incrementar su tiempo de vida; pero los perderá tan pronto fenezca la estructura floral en esa ventana temporal, con tal de garantizar la polinización que finalizará con la formación de su descendencia (Figura 2a).

En la segunda fase (*durante*), uno de los regalos maternos exclusivos para la descendencia en las angiospermas está representado por la formación de una estructura llamada fruto, el cual no es producido por las plantas androicas o individuos con sólo función masculina (Figura 2b). Este fruto, formado a partir de la fecundación de los óvulos transformados en semillas, envueltos generalmente en pulpa y cáscara, promoverán la dispersión y protegerán a la semilla del ambiente, respectivamente (Miranda-Jácome y Ruelas, 2021).

Los regalos maternos de la tercera fase (*post*) los constituyen las estructuras que protegen al embrión (hijo) y la cantidad de reservas alimenticias contenidas en la semilla para su incipiente desarrollo (Figura 2c). En el primer caso la testa o envoltura de la semilla brinda la protección necesaria al embrión durante el paso por las estructuras bucales (picos o dientes) y los ácidos gástricos del frugívoro (organismo que consume frutos), y a la vez determina el éxito y tipo de dispersión al poseer una diversidad de formas, tamaños y grosores, como las alas de las semillas dispersadas por aire, o los ganchos en aquellas

que dispersan los animales. El segundo aspecto del regalo materno, el endospermo de la semilla, contiene reservas alimenticias internas ricas en carbohidratos, lípidos y proteínas, cuya cantidad y calidad depende de la calidad ambiental de la planta madre (por ejemplo, suficiente agua, luz y nutrientes en el suelo), la cual afectará la calidad y cantidad de nutrientes en el endospermo, lo que constituye otro aspecto del componente materno.

■ Plantas monocárpicas: el epitome de la madre

■ El término “monocárpico” proviene de las palabras griegas “monos” (uno) y “karpos” (fruto) y hace referencia al *único ciclo reproductivo previo a la muerte* de un individuo. Este grupo incluye una diversidad enorme de especies que varían desde pequeñas hierbas anuales hasta imponentes árboles. Este desenlace “trágico” ocurre por el esfuerzo enorme de las plantas madre para almacenar y asignar gran cantidad de recursos a la mayor reproducción antes de morir, asegurando la polinización y el mayor número de semillas para formar múltiples individuos nuevos.

Ecológicamente, el ciclo de vida monocárpico representa ventajas por la posibilidad de concentrar todos los recursos de la planta madre en un solo evento de reproducción que incrementa la producción de semillas y el potencial de colonización, lo cual es útil en ecosistemas donde las oportunidades de



Figura 3. Inflorescencias amarillas producidas sincrónicamente por individuos de *Agave marmorata*. Foto: Antonio Miranda-Jácome.

reproducción son esporádicas o impredecibles —como en el caso de las zonas áridas, donde las lluvias pueden ocurrir en escasos días al año—. Sin embargo, la desventaja más evidente es el riesgo a depender de un único intento de reproducción, en el cual, si las condiciones ambientales resultan desfavorables, las plantas pueden fracasar en su esfuerzo reproductivo, poniendo en peligro la supervivencia de la especie.

El bambú es un caso extraordinario de monocarpismo que puede ocurrir de forma sincronizada en vastas áreas geográficas, y algunas especies, en efecto, florecen sólo una vez cada 20 a 120 años. Durante esta floración, miles de individuos en grandes extensiones de tierra lo hacen al mismo tiempo, provocando que las madres liberen millones de semillas que aseguran la reproducción y repoblación tras la muerte de las plantas. Los magueyes o agaves (de los que se elabora el pulque, el mezcal y el tequila) constituyen un ejemplo equívoco de plantas monocárpicas, pues si bien poseen un largo periodo de crecimiento —10 y 30 años antes de la floración— que culmina con la producción de una imponente inflorescencia

conocida como quiote (**Figura 3**) y la muerte de la planta, el genoma de esa planta no muere, ya que después de producir semillas, deja numerosos individuos a su alrededor producto de la reproducción vegetativa (por ejemplo, brotes o esquejes). Esto hace que esos individuos contengan la misma información genética (clones) de la planta madre muerta.

Las plantas nodriza: madres que cuidan hijos ajenos

Una representación simbólica de la maternidad en el mundo vegetal la constituyen las plantas nodriza, las cuales son *especies vegetales que actúan como madres* al proteger y sustentar a otras plantas que no son sus propias “hijas” biológicas. Estas plantas crean un microambiente propicio para que otras especies vegetales puedan germinar, crecer y desarrollarse en condiciones que serían demasiado hostiles sin su protección (Flores-Rivas, 2002). Esta asociación de plántulas protegidas y plantas nodriza, denominada “síndrome de planta nodriza” o interacción

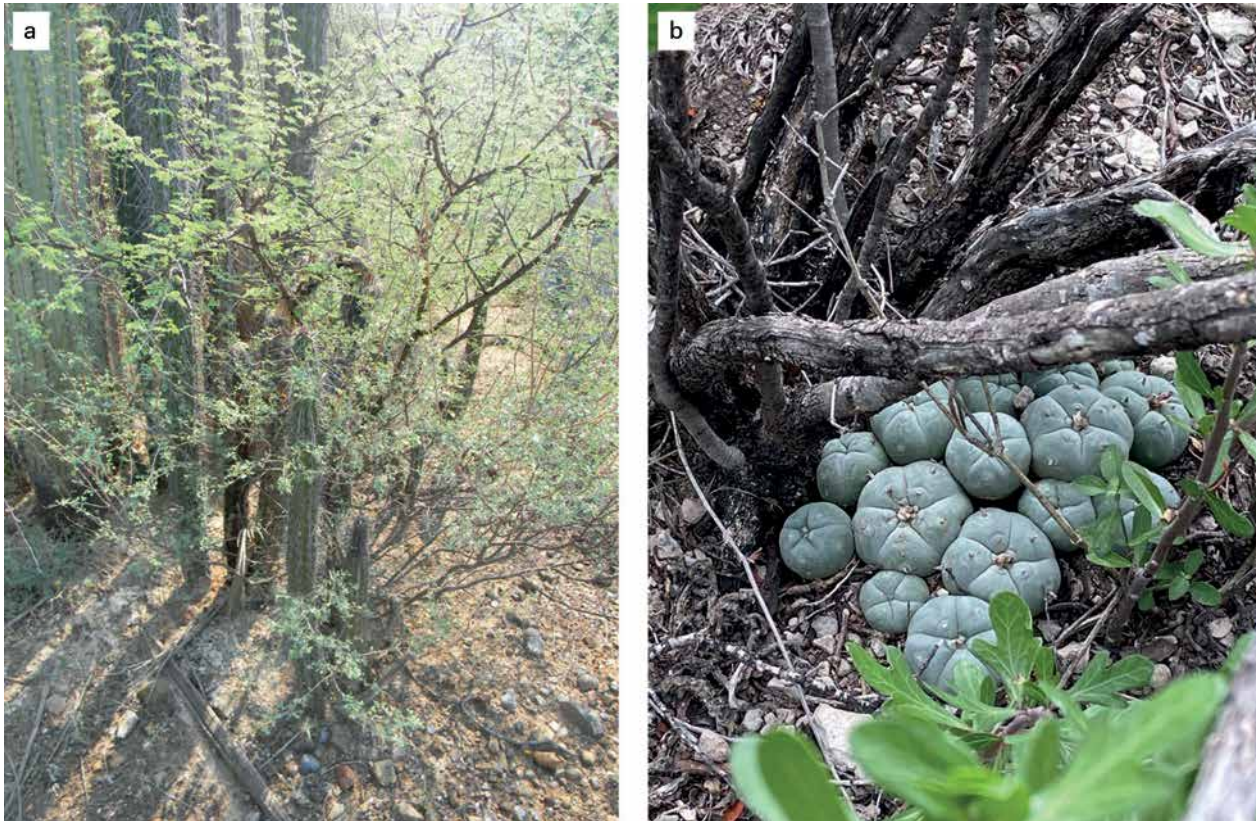


Figura 4. Nodricismo en el valle de Zapotitlán, Puebla, de a) *Mimosa luisana* en juveniles de *Neobuxbaumia tetezo*, y nodricismo en el altiplano potosino de b) *Larrea tridentata* en adultos de *Lophophora williamsii* (peyote). Fotos: Antonio Miranda-Jácome y Joel Flores, respectivamente.

“nodriza-protégida”, alude a la relación de un bebé con una mujer que le amamanta aun sin guardar parentesco, ya sea porque la madre murió durante el parto o porque no puede lactar y alimentarlo (Miranda-Jácome, 2024).

Esta relación simbólica de maternidad está representada principalmente en ciertas familias botánicas. Flores y Jurado (2003) documentaron 147 especies nodriza pertenecientes a 40 familias (entre ellas Fabaceae, Asteraceae, Mimosaceae) y 429 especies protegidas pertenecientes a 84 familias (entre ellas Cactaceae y Aizoaceae). El fenómeno del nodricismo también puede ser facultativo, ya que 46 especies pueden actuar primero como especies protegidas cuando son plántulas y posteriormente como especies nodriza en su fase adulta, enarbolando simbólicamente un compromiso con la comunidad vegetal que pudo ayudarlo a sobrevivir durante las etapas tempranas de su ciclo de vida. Incluso 28 de estas especies pueden ser cuidadas por su propia especie

(la guardería), siendo la familia Cactaceae la que posee mayor cantidad de especies protegidas por plantas nodriza (Figura 4a y b).

La relación nodriza-protégida es conspicua en ambientes estresantes como son los ecosistemas áridos y semiáridos, donde las condiciones de sequía y temperaturas extremas imponen fuertes restricciones al crecimiento vegetal. En estos entornos, los arbustos y ciertos árboles actúan como nodrizas de semillas, plántulas y juveniles, al ofrecer sombra y proteger contra la evaporación excesiva. Un ejemplo claro son los mezquites (*Neltuma* spp.) y la gobernadora (*Larrea tridentata*), los cuales brindan sombra y un microclima más húmedo que permite el establecimiento de otras especies menos resistentes a la deshidratación. El cuidado de las nodrizas también es común en otro tipo de ambiente estresante, como el de los ecosistemas de alta montaña, donde el frío y los fuertes vientos limitan el desarrollo de la vegetación. En estos lugares, ciertos arbustos y pastos altos



actúan como plantas nodriza y protegen a las plántulas de las condiciones climáticas adversas, además de que proporcionan cobertura y ayudan a reducir la pérdida de calor, creando un microambiente más templado que favorece la supervivencia de especies más delicadas.

Las plantas nodriza representan una estrategia ecológica de cuidado clave para la supervivencia y el desarrollo de la vegetación en condiciones ambientales difíciles, al crear microclimas favorables para las especies vegetales más susceptibles y promover la biodiversidad y la regeneración de los ecosistemas. Este cuidado materno simbólico tiene un papel vital en la estructuración y dinámica de las comunidades vegetales que experimentan un alto estrés ambiental, pues contribuye a modificar las condiciones microambientales (con, por ejemplo, reducción de la

radiación solar y temperatura en el suelo), lo que beneficia a las especies menos tolerantes a las condiciones extremas (como pueden ser las especies raras, amenazadas o en peligro) permitiendo su establecimiento en zonas que de otro modo serían inhóspitas. Por ello, las plantas nodriza contribuyen a la biodiversidad, promueven la sucesión ecológica y favorecen la transición desde etapas pioneras hasta comunidades más complejas y maduras.

Corolario

Como se demostró, desde los distintos niveles de organización orgánica: la célula, el individuo, la especie y el ecosistema, el papel materno promueve la transmisión de información genética, elabora las estructuras necesarias que incrementan el éxito de

los hijos a nivel individual y de especie, y proporciona cuidados que favorecen la supervivencia de especies en ambientes estresantes. Todo ello, en conjunto, brinda las condiciones necesarias para que en nuestro planeta habite una alta diversidad vegetal.

Antonio Miranda-Jácome

Instituto de Investigaciones Biológicas, Universidad Veracruzana.
anmiranda@uv.mx

Joel Flores

Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, A. C.
joel@ipicyt.edu.mx

Referencias específicas

- Eguiarte, L. E., J. Núñez-Farfán, C. Domínguez y C. Cordero (1999), “*Biología evolutiva de la reproducción en plantas*”, en J. Núñez-Farfán y L. E. Eguiarte (comps.), *La evolución biológica*, México, Facultad de Ciencias, UNAM, pp. 117-151.
- Flores Rivas, J. (2002), “Consideraciones sobre el uso de arbustos en la restauración de zonas áridas y semiáridas deterioradas del estado de San Luis Potosí”, en *Reportes del IPICYT, Memorias del I Foro Ambiental del IPICYT*, San Luis Potosí, México, pp. 62-68.
- Flores, J. y E. Jurado (2003), “Are nurse-protégé interactions more common among plants from arid environments?”, *Journal of Vegetation Science*, 14: 911-916. Disponible en: <https://doi.org/10.1111/j.1654-1103.2003.tb02225.x>.
- Miranda-Jácome, A. y E. Ruelas Inzunza (2021), “Dispersores de propágulos: Un reto reproductivo”, *La Ciencia y el Hombre*, 34(1):8-31. Disponible en: https://www.uv.mx/cienciauv/files/2021/01/revista_baja.pdf, consultado el 21 de julio de 2026.
- Miranda-Jácome, A. (2024), “La vida útil de un viejo”, *Ecofronteras*, 28(82):27-30. Disponible en: <https://revistas.ecosur.mx/ecofronteras/index.php/eco/article/view/2164/2316>, consultado el 21 de julio de 2026.

Silenciamiento de genes en plantas, una herramienta biotecnológica para la agricultura y la conservación

Resumen

El silenciamiento de genes inducido por virus (VIGS, por sus siglas en inglés) es una novedosa herramienta que aprovecha los propios mecanismos de defensa de las plantas para estudiar la función de los genes de la planta. El VIGS tiene el potencial de generar modernas aplicaciones biotecnológicas en la agricultura y la conservación.

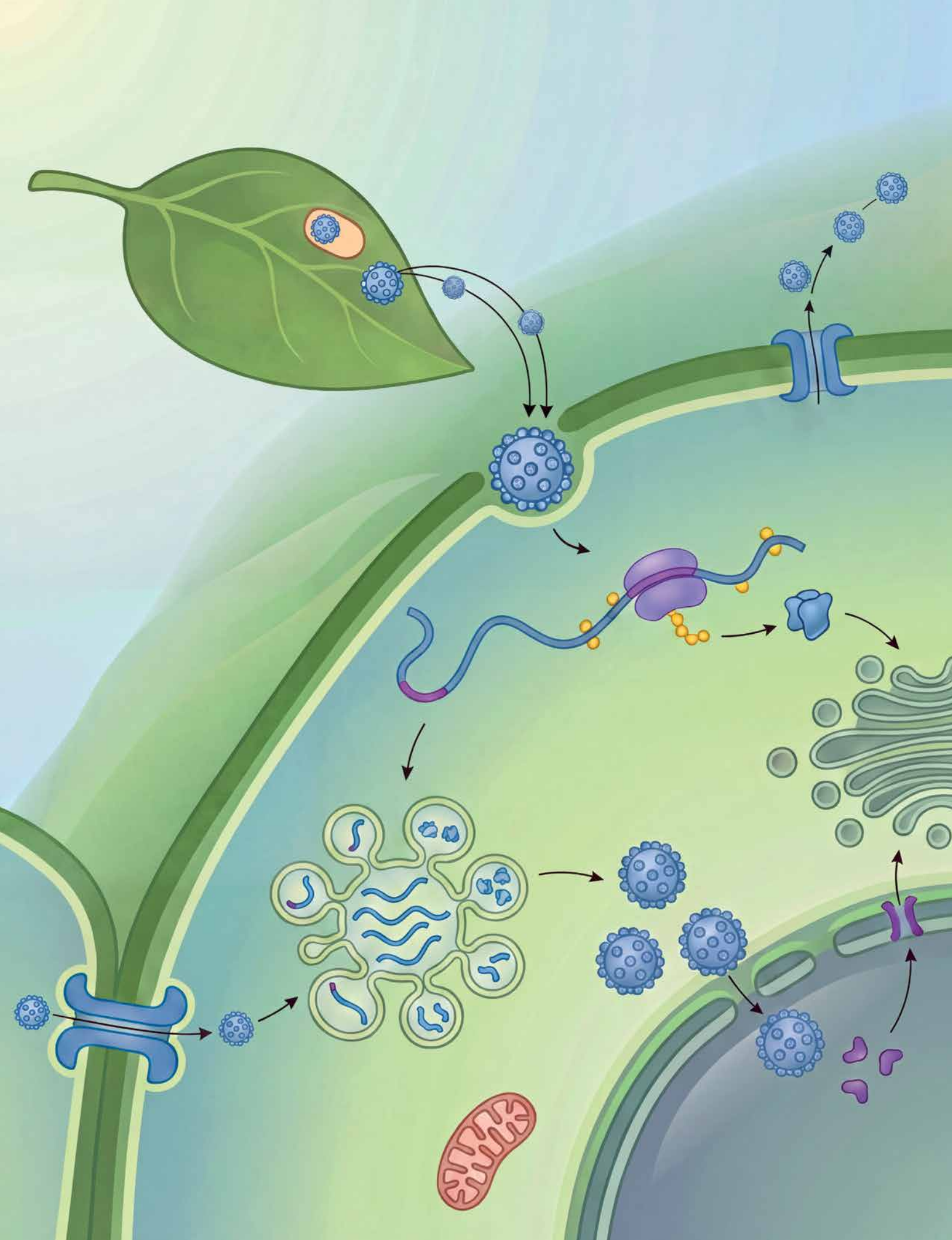
Abstract

Virus-induced gene silencing (VIGS) is an innovative tool that harnesses plants' own defense mechanisms to study the function of plant genes. VIGS has the potential to lead to cutting-edge biotechnological applications in agriculture and conservation.

Los virus y las plantas

Los virus son pequeñas partículas infecciosas que no pueden verse a simple vista, pero que llegan a tener un impacto enorme en el ambiente que los rodea. Los virus no pueden reproducirse por sí mismos, por lo que están diseñados para inyectar su material genético en una célula huésped y así tomar el control de la maquinaria celular, con el fin de producir miles de copias de sí mismos, lo cual tiene como consecuencia una carga metabólica excesiva que desgasta a la célula huésped, o incluso puede causar una lisis (ruptura) de la célula.

La infección de células por virus es como si un incendio comenzara en un pequeño rincón y, sin freno, se extendiera a lo largo de todo un bosque. Los virus usan diferentes medios de transporte para llegar hasta sus víctimas (células huésped). El SARS-CoV-2, virus causante del COVID-19, se propaga vía las secreciones de personas contagiadas –los aerosoles al estornudar, por ejemplo–. En las plantas, los virus se transmiten a través de insectos que, al alimentarse de una planta infectada, los pasan a otras sanas.



■ El silenciamiento de genes: “pausando genes” en las plantas

■ El estudio de los virus y de su interacción con las plantas ha contribuido a entender el proceso de **patogenicidad** y el sistema inmunológico celular, pero también a explorar el uso de los virus como herramientas en el estudio de la fisiología celular y molecular de las plantas. Las plantas, al igual que los seres humanos, poseen un sistema de defensa que les permite responder cuando sufren un ataque por parte de organismos patógenos, como es el caso de los virus. Al detectar estas amenazas, las plantas activan mecanismos de defensa para impedir que el virus las infecte y les cause daño. Entre estos mecanismos, destaca el “silenciamiento de genes”.

Este artículo se enfoca en el silenciamiento de genes postranscripcional y explora cómo este proceso contribuye a la defensa de las plantas contra los virus y su potencial uso en investigación. Para diferenciar entre el silenciamiento transcripcional y el postranscripcional es útil recordar el dogma central de la biología molecular, que dice que la información genética fluye en una sola dirección, el ADN se transcribe a ARN mensajero (ARNm) y éste se traduce a proteína (**Figura 1**). El silenciamiento –que es una forma de “pausar-genes”, o bien de interferir en los genes– puede bloquear la transcripción del ADN, en un proceso conocido como silenciamiento de genes transcripcional (TGS, por sus siglas en inglés); o bloquear la traducción del ARNm –la molécula que

Patogenicidad
Capacidad de un agente infeccioso para causar enfermedades.

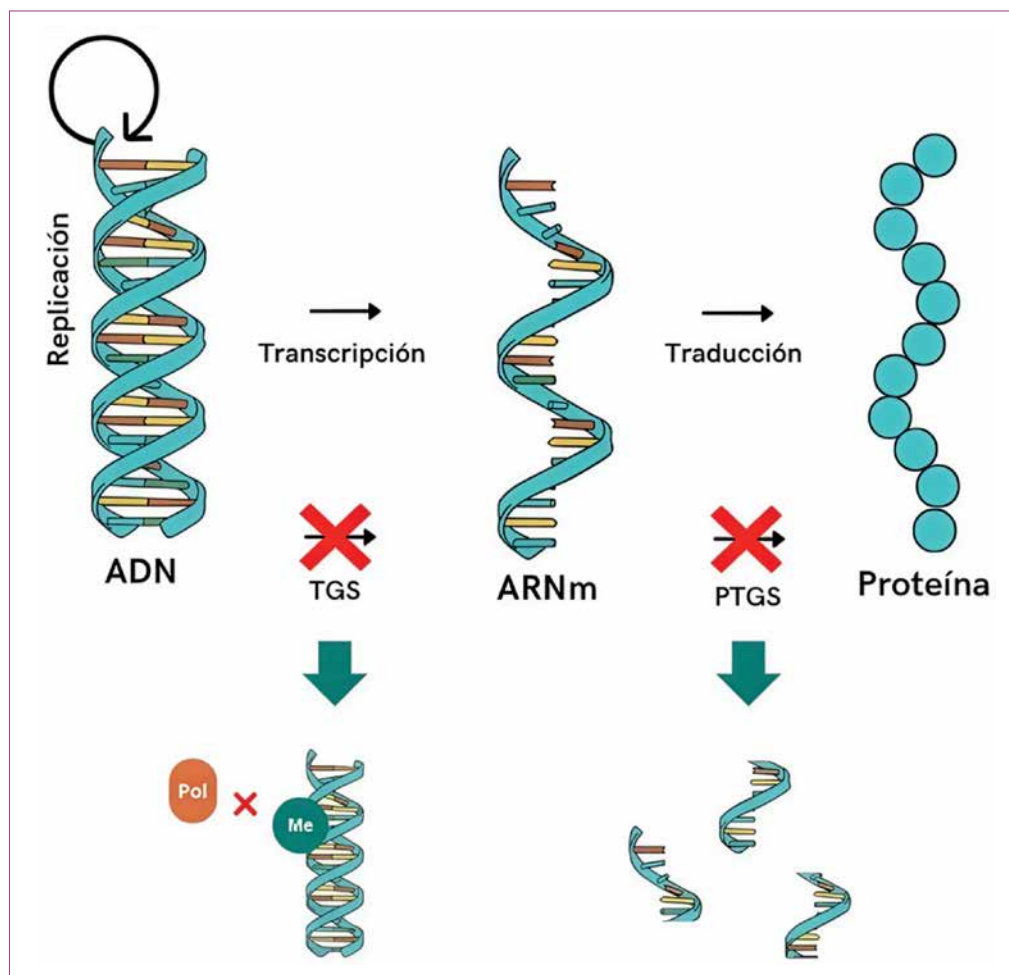


Figura 1. Representación del dogma central de la biología molecular, que muestra los procesos de transcripción y traducción. Además, se señalan los puntos de silenciamiento de genes transcripcional y postranscripcional. En el silenciamiento transcripcional, la metilación (Me) del ADN impide la unión de la ADN polimerasa (Pol) afectando su transcripción. En el silenciamiento postranscripcional, el ARN mensajero puede ser bloqueado o degradado, lo que impide su traducción a proteína.

transporta las instrucciones para fabricar proteínas—, lo que se denomina silenciamiento de genes postranscripcional (PTGS, por sus siglas en inglés).

¿Cómo se defiende una planta?

El silenciamiento de genes postranscripcional de las plantas se compone de diferentes elementos que actúan de forma coordinada para identificar y destruir secuencias de ARN de virus. El elemento clave para la identificación del virus proviene de la memoria inmunológica (Landeo-Ríos y cols., 2017). Cada vez que una célula sobrevive al ataque de un virus, guarda en su propio genoma un fragmento de la secuencia del virus, que luego se transcribe como un ARN pequeño de interferencia (siRNA, por sus siglas en inglés); entre 20 y 24 pares de bases son suficientes

para reconocer ARN de virus. Por otro lado, el elemento clave para destruir secuencias de ARN extrañas es un conjunto de múltiples proteínas conocido como complejo de silenciamiento inducido por ARN (RISC, por sus siglas en inglés), que tiene la función de evaluar múltiples moléculas de ARN presentes en la célula en busca de aquellas que coincidan con el siRNA y —una vez que encuentra una complementaria— de inhibir la traducción del ARN a proteínas (Figura 2), con lo cual rompe con el proceso de ensamblaje de nuevos virus, y por tanto impide el daño a la planta.

La biología del silenciamiento y nuestro mundo informático

El silenciamiento génico postranscripcional sucede a nivel molecular en la planta, pero se puede

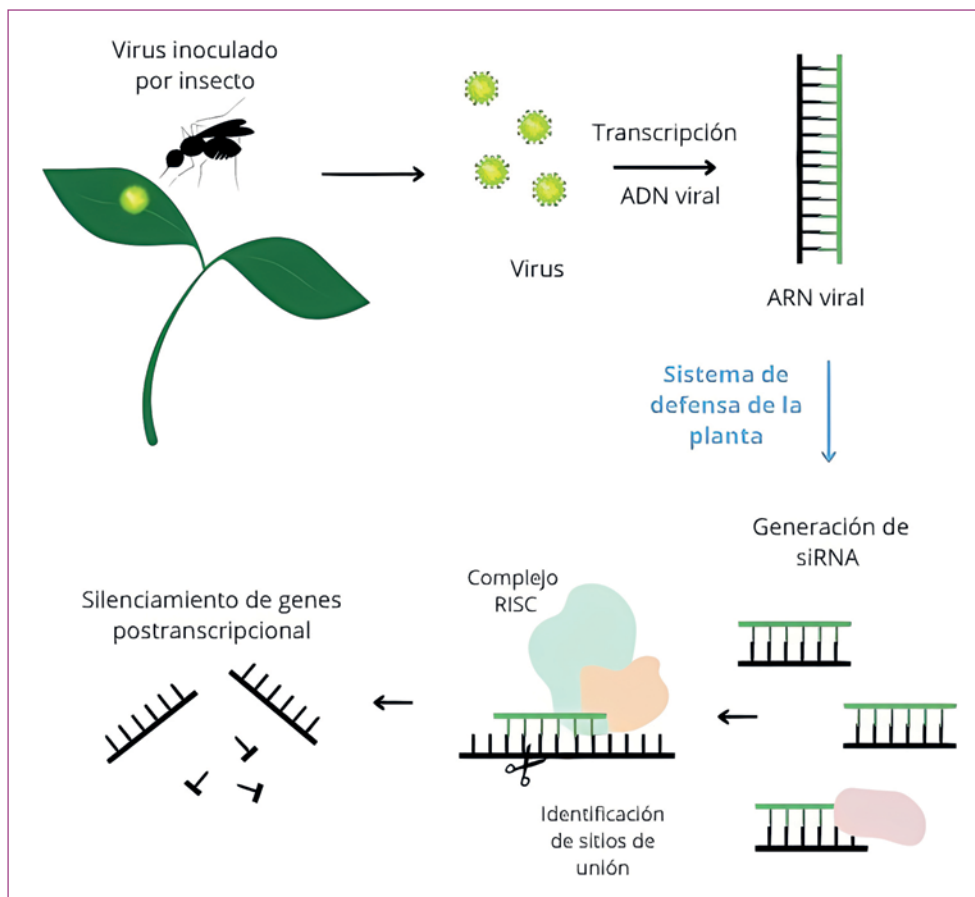


Figura 2. Los virus pueden infectar a las plantas a través de diversos mecanismos, aunque uno de los vectores más comunes son los insectos. En respuesta, el sistema de defensa de la planta detecta el material genético viral y activa el silenciamiento de genes postranscripcional, lo que trunca la producción de nuevas proteínas virales y por tanto la replicación del virus.

visualizar de una manera más clara con algo de uso cotidiano. Cuando se inserta en una computadora portátil una memoria USB, por ejemplo, se lleva a cabo un escaneo para determinar si la memoria tiene un virus. Si detecta uno, el sistema activa un anti-virus que intenta bloquear el daño y proteger los documentos. De manera similar, cuando un virus transfiere su material genético a las células de una planta, el sistema de defensa de la planta se activa. Primero, detecta el material genético del virus y, después, silencia sus genes para evitar que se traduzcan en proteínas, las cuales son esenciales para que el virus se multiplique y propague dentro de la planta.

En otras palabras, la planta “detecta” el ARNm viral y lo degrada antes de que pueda cumplir su función. Así, la planta bloquea la propagación del virus y se protege de la infección.

■ **¿Cómo funciona el silenciamiento de un gen?**

■ Ahora bien, ¿qué significa realmente “silenciar un gen”? Es un término que despierta curiosidad; pero ¿cómo se silencia un gen? ¿Acaso los genes pueden

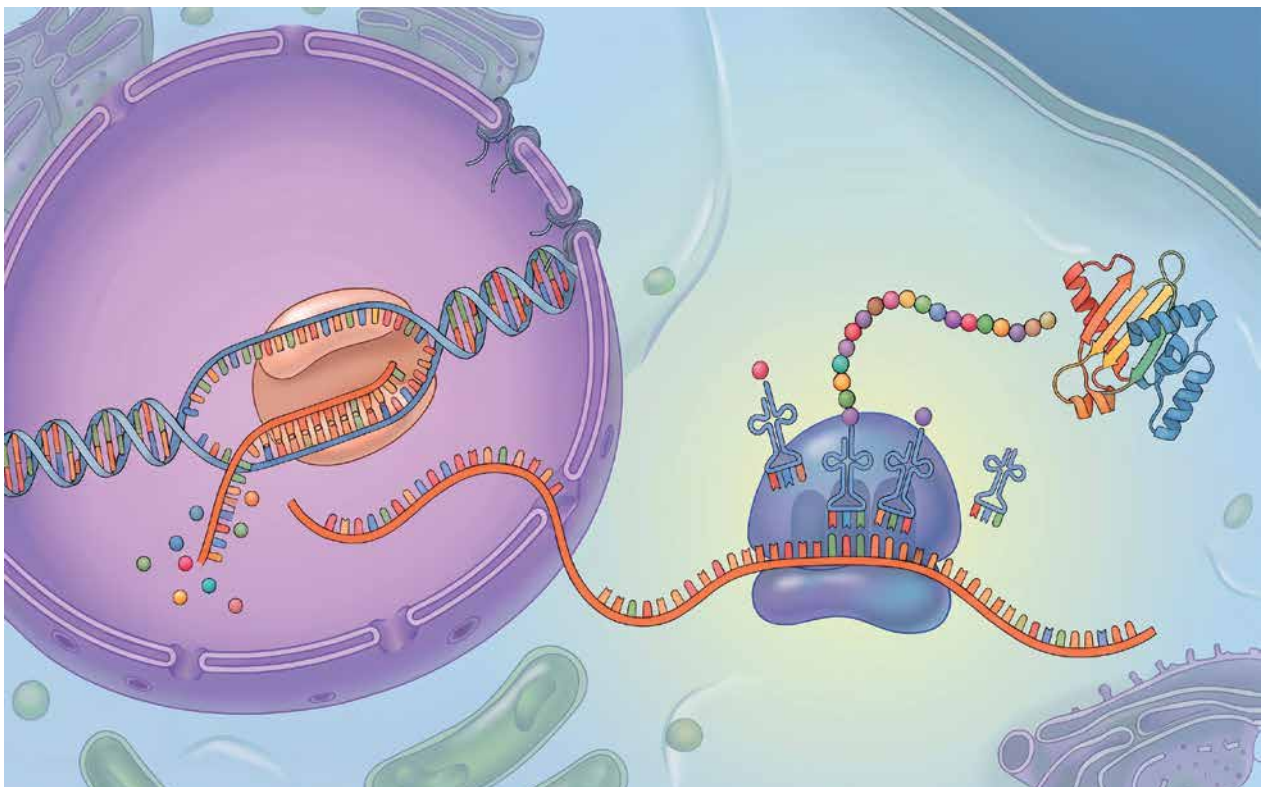
“hablar”? Por supuesto que no se trata de silenciar sonidos. En este contexto, “silenciar un gen” se refiere a interferir en su expresión, pues aunque el gen sigue presente en la célula, lo que se busca es impedir que se manifieste (exprese) y por tanto se evita su función.

En términos más específicos, silenciar un gen significa bloquear el proceso por el cual la información contenida en el ADN se convierte en una proteína funcional. Al interrumpir esta cadena de eventos, se logra que el gen “guarde silencio” y no produzca la proteína que normalmente generaría.

En el estudio de la biología de plantas, el mecanismo de silenciamiento puede utilizarse como herramienta para estudiar la función de genes de la misma planta. Al silenciar de forma transitoria un gen, se puede indagar su actividad en los diferentes procesos celulares.

■ **El silenciamiento de genes como herramienta de biología molecular**

■ Las plantas cuentan con miles de genes, y muchos de ellos aún guardan secretos sobre sus funciones.



Comprender para qué sirve cada uno es un paso esencial en la investigación científica, ya que ayuda a entender procesos biológicos fundamentales y desarrollar nuevas aplicaciones en agricultura o biotecnología. Una forma de estudiar la función de un gen ha sido provocando una pérdida de la función del gen por medio de la mutación de su secuencia, lo que se conoce como “noqueo” del gen (del inglés *knockout*). Esto requiere una modificación estable del genoma que puede ser costosa, compleja y requerir mucho tiempo. Otra desventaja es que puede ser letal en estadios jóvenes de desarrollo de la planta. Como alternativa a esas dificultades han surgido las técnicas de transformación transitorias, que no modifican el genoma, sino que reducen la **expresión génica** mediante el silenciamiento postranscripcional, sin modificar de forma estable su genoma; es decir, sin noquear al gen.

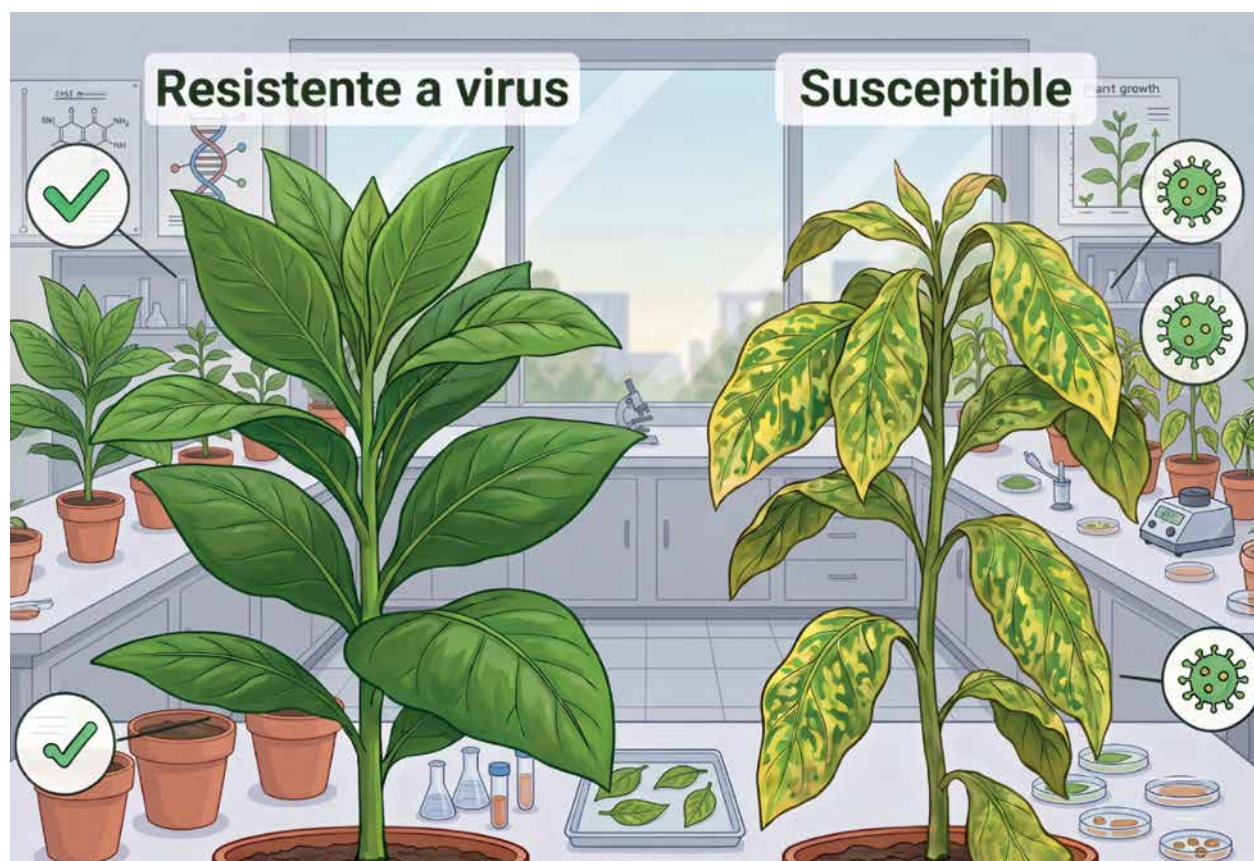
Una de las técnicas transitorias es, precisamente, el silenciamiento genético inducido por virus (VIGS). Este enfoque aprovecha el propio sistema de defensa

natural de las plantas para silenciar de forma temporal y específica genes seleccionados y usa como vectores a virus vegetales, para transportar y replicar dentro de las células vegetales el gen de interés, lo que permite estudiar sus funciones sin necesidad de generar modificaciones genéticas permanentes (Adhikary y cols., 2019).

El proceso es ingenioso: se inserta un fragmento de un gen (no el gen completo) de la misma planta en un vector viral. Al infectar la planta con el vector viral, se activa en la planta el sistema de defensa natural PTGS, que ataca al virus. Pero, adicionalmente, el sistema inmunológico de la planta reconoce el fragmento del gen como algo extraño que debe interrumpir a través del silenciamiento PTGS. Es decir, al integrar una secuencia de un gen de la propia planta, la maquinaria de defensa, al intentar combatir el fragmento que reconoce como extraño, se dirigirá a los ARNm correspondientes de la propia planta, reduciendo la producción de proteínas y, en consecuencia, silenciando su actividad. De esta

Expresión génica

Controla cuándo y cuánto ARN y proteínas se producen en las células.



forma, mediante el silenciamiento de un gen de la propia planta se puede indagar su función.

El método vigs ha demostrado ser eficiente para desactivar la expresión de un gen y se ha convertido en una herramienta clave para regular la expresión génica, y es aplicable a la **genética inversa** en estudios funcionales de genes en plantas. Para lograr esto, se utilizan vectores virales de ADN o ARN, y estos últimos son los más usados debido a su pequeño peso molecular, mayor capacidad de movimiento dentro de la planta y alta eficiencia de infección.

El uso de vectores virales en la investigación científica varía según la planta que se esté estudiando. Esto se debe a que la mayoría de los vectores virales son efectivos únicamente en un número limitado de especies huésped. Por esta razón, se han desarrollado diversos tipos de vectores diseñados específicamente para diferentes familias de plantas. La elección del vector adecuado para un experimento depende directamente de los resultados previos observados en plantas relacionadas (Senthil-Kumar y Mysore, 2011).

Para evaluar y monitorear con precisión la eficiencia del silenciamiento mediante vigs, se recomienda empezar utilizando **genes reporteros** que actúan significativamente en los rasgos fenotípicos visibles, debido a que éstos impactan en la pigmentación de la planta (Tian y cols., 2024) cambiando las hojas de color verde o morado a blanco.

La técnica de vigs ha transformado la manera en que los científicos estudian los genes en plantas. Con

el método vigs, es posible identificar rápidamente las funciones de genes específicos sin necesidad de recurrir a procedimientos largos y complicados, lo que abre nuevas posibilidades para la investigación y la innovación en biología vegetal.

■ ■ ■ El futuro del método vigs

■ La pérdida de cultivos a causa de enfermedades provocadas por patógenos es un problema creciente en la agricultura moderna, que afecta la rentabilidad económica y compromete la seguridad alimentaria global. Una de las estrategias más eficientes y rentables para enfrentar este desafío es el desarrollo de cultivos resistentes a virus. Sin embargo, la complejidad y agresividad de estos patógenos requiere el desarrollo de variedades con resistencias duraderas y efectivas (Zhao y cols., 2020).

En este contexto, la ingeniería genética ha revolucionado el panorama al introducir metodologías más rápidas y eficientes. A diferencia de los métodos convencionales, el vigs no requiere modificaciones permanentes en el ADN de la planta, lo que reduce significativamente los tiempos de transformación y experimentación. Esto convierte al vigs en una herramienta de gran utilidad para la validación funcional de genes en plantas no modelo y para el desarrollo de cultivos con características mejoradas en menor tiempo.

Técnicas innovadoras como el vigs permiten acelerar el desarrollo de cultivos más resistentes y

Genética inversa
Estudio de la función de un gen modificando su secuencia de ADN y observando los efectos que produce en el organismo.

Gen reportero
Al expresarse permite su visualización de forma rápida y sencilla.

Tabla 1. Ejemplos de la utilidad del vigs en el estudio y mejoramiento de cultivos.

Cultivo	Gen silenciado	Vector viral	Objetivo agronómico	Referencia
<i>Pisum sativum</i> (guisante)	PsPT4	PEBV	Estudio de genes clave en la simbiosis con hongos micorrícicos arbusculares (HMA).	Grønlund y cols., 2010
<i>Triticum aestivum</i> (trigo)	<i>Era1</i> y <i>Sal1</i>	BSMV	Tolerancia a la sequía.	Manmathan y cols., 2013
<i>Glycine max</i> (soya)	GmRPA3	BPMV	Mayor contenido de clorofila en condiciones de deficiencia de hierro.	Atwood y cols., 2014
<i>Prunus persica</i> (durazno)	eIF(iso)4E	PPV	Resistencia al virus (<i>Sharka</i>).	Cui y Wang, 2017
<i>P. avium</i> (cereza)	PaCYP78A6	TRV	Desarrollo y maduración del fruto.	Qi y cols., 2019

resilientes, ofreciendo soluciones precisas y eficientes a los desafíos de la agricultura. Estas tecnologías prometen transformar la producción agrícola haciéndola más sostenible y adaptada a las crecientes demandas globales y a los cambios ambientales. En la **Tabla 1** se presentan diferentes ejemplos.

Natalia-Getsemani Franco-Jiménez

Unidad de Biotecnología Vegetal, Centro de Investigación y Asistencia en Tecnología y Diseño del Estado de Jalisco (CIATEJ).

natalia.009904@gmail.com

Julio-Armando Massange-Sánchez

Unidad de Biotecnología Vegetal, Centro de Investigación y Asistencia en Tecnología y Diseño del Estado de Jalisco (CIATEJ).

jmassange@ciatej.mx

Rafael Urrea-López

Unidad de Biotecnología Vegetal, Centro de Investigación y Asistencia en Tecnología y Diseño del Estado de Jalisco (CIATEJ).

rurrea@ciatej.mx



Lecturas recomendadas

- Adhikary, D., U. Khatri-Chhetri, F. J. M. Tymms, S. J. Murch y M. K. Deyholos (2019), "A virus-induced gene-silencing system for functional genetics in a betalainic species, *Amaranthus tricolor* (Amaranthaceae)", *Applications in Plant Sciences*, 7(2):1-9. Disponible en: <https://doi.org/10.1002/aps.3.1221>.
- Atwood, S. E., J. A. O'Rourke, G. A. Peiffer, T. Yin, M. Majumder *et al.* (2014), "Replication protein A subunit 3 and the iron efficiency response in soybean", *Plant, Cell and Environment*, 37(1):213-234. Disponible en: <https://doi.org/10.1111/pce.12147>.
- Cui, H. y A. Wang (2017), "An efficient viral vector for functional genomic studies of Prunus fruit trees and its induced resistance to Plum pox virus via silencing of a host factor gene", *Plant Biotechnology Journal*, 15(3):344-356. Disponible en: <https://doi.org/10.1111/pbi.12629>.
- Grønlund, M., A. Olsen, E. I. Johansen e I. Jakobsen (2010), "Protocol: Using virus-induced gene silencing to study the arbuscular mycorrhizal symbiosis in *Pisum sativum*", *Plant Methods*, 6(28):1-8. Disponible en: <https://doi.org/10.1186/1746-4811-6-28>.
- Landeo-Ríos, Y., J. Navas-Castillo, E. Moriones y M. C. Cañizares (2017), "Supresión viral del silenciamiento por RNA en plantas", *Revista Fitotecnia Mexicana*, 40(2):181-197. Disponible en: <https://revistafitotecniamexicana.org/documentos/40-2/7a.pdf>, consultado el 13 de julio de 2026.
- Manmathan, H., D. Shaner, J. Snelling, N. Tisserat y N. Lapitan (2013), "Virus-induced gene silencing of *Arabidopsis thaliana* gene homologues in wheat identifies genes conferring improved drought tolerance", *Journal of Experimental Botany*, 64(5):1381-1392. Disponible en: <https://doi.org/10.1093/jxb/ert003>.
- Qi, X., C. Liu, L. Song y M. Li (2019), "*Arabidopsis* EOD3 homologue PaCYP78A6 affects fruit size and is involved in sweet cherry (*Prunus avium* L.) fruit ripening", *Scientia Horticulturae*, 246:57-67. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2018.10.041>.
- Senthil-Kumar, M. y K. S. Mysore (2011), "New dimensions for vigs in plant functional genomics", *Trends in Plant Science*, 16(12):656-665. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2011.08.006>.
- Tian, Y., Y. Fang, K. Zhang, Z. Zhai, Y. Yang *et al.* (2024), "Applications of Virus-Induced Gene Silencing in Cotton", *Plants*, 13(2):1-16. Disponible en: <https://doi.org/10.3390/plants13020272>.
- Zhao, Y., X. Yang, G. Zhou y T. Zhang (2020), "Engineering plant virus resistance: from RNA silencing to genome editing strategies", *Plant Biotechnology Journal*, 18(2):328-336. Disponible en: <https://doi.org/10.1111/pbi.13278>.

Uriel de Jesús Cruz Calderón, Marcela Gaytán Martínez y Anai Zavala Franco



El papel del calentamiento óhmico del maíz, una tecnología emergente para un proceso sustentable

Resumen

El maíz es clave en la alimentación y en la cultura mexicanas. La nixtamalización tradicional mejora el valor nutricional del maíz, aunque consume una gran cantidad de agua y de energía. El calentamiento óhmico, en cambio, es una tecnología emergente que ofrece una alternativa rápida y uniforme que genera calor dentro del grano de maíz mediante el uso de electricidad, lo que hace el proceso más sustentable.

Abstract

Maize plays a key role in Mexican food and culture practices. The traditional nixtamalization process improves maize's nutritional value, but it requires a lot of water and energy. Ohmic heating, on the other hand, is an emerging method that uses electricity to heat the interior of maize grains, making the process faster, more even, and more sustainable.

Introducción

Desde la antigüedad, el maíz es y ha sido mucho más que un simple alimento. Para las civilizaciones mesoamericanas, como los mayas y los aztecas, este grano no sólo representó la base de su dieta, sino que estaba profundamente ligado a su ideología, rituales y economía. Hoy en día su importancia sigue intacta: el maíz es uno de los cereales más cultivados en el mundo, con diversas aplicaciones, aunque en México se utiliza principalmente para consumo humano. A lo largo del tiempo, la manera en que se transforma el maíz desde el grano hasta convertirse en alimento ha cambiado mucho. Algunos métodos, como la **nixtamalización**, han sido la base para el desarrollo de procesos industriales que buscan mejorar la eficiencia, aumentando la calidad y el rendimiento del grano. De esta manera, ha surgido una tecnología muy innovadora para procesar el maíz:

Nixtamalización

Proceso en el que el maíz es cocido en agua con cal, lo que facilita la digestión del grano y mejora su contenido de nutrientes.



el calentamiento óhmico. Esta tecnología hace uso de la electricidad para generar calor en el interior del alimento, por lo que revoluciona por completo la forma de cocinar y procesar al maíz. Su capacidad para reducir los tiempos de cocción, mejorar la calidad del producto y optimizar el uso de energía la convierte en una alternativa prometedora frente a los métodos tradicionales.

¿Qué hace del calentamiento óhmico una opción viable para la industria del maíz? ¿Cómo puede transformar la producción de harinas, tortillas y otros derivados? En las siguientes secciones se explorará cómo la combinación de un alimento ancestral como el maíz y una tecnología emergente puede marcar un antes y un después en la industria alimentaria.

El maíz y su transformación: de la nixtamalización a la innovación

El maíz (*Zea mays* L.) es un cereal de la familia Poaceae (poaceas o gramíneas, una familia de plantas como los cereales), reconocido por su alto rendi-

miento y versatilidad en la industria alimentaria. Su grano, estructuralmente complejo, está compuesto por tres partes principales: el endospermo, que representa aproximadamente el 82 % del peso del grano y es rico en almidón y proteínas; el germen, que constituye cerca del 12 % y contiene la mayor parte de los lípidos, vitaminas y minerales esenciales, y el pericarpio, la capa externa que protege al grano y aporta estructura en productos procesados, principalmente compuesta de fibra y una pequeña parte de lípidos.

Este cereal ha sido un alimento básico en diversas culturas y su procesamiento ha evolucionado con el tiempo para mejorar su calidad nutricional y sensorial. Uno de los métodos más utilizados para el procesamiento de este grano es la nixtamalización, un proceso ancestral que ha permitido mejorar las propiedades nutricionales y funcionales del maíz desde hace miles de años. Consiste en la cocción de los granos en una solución alcalina, generalmente agua con hidróxido de calcio (cal), seguida de un reposo, enjuague y molienda para la obtención de masa que se utiliza en la elaboración de tortillas y otros productos derivados (Figura 1).

Este proceso facilita la eliminación del pericarpio del grano y al mismo tiempo aumenta la biodisponibilidad de nutrientes esenciales como la niacina (vitamina B3) y disminuye aquellos **antinutrientes** como el ácido fítico (compuesto que inhibe la absorción de minerales en el ser humano). Además, la nixtamalización mejora la textura, sabor y aroma de la masa, favoreciendo su elasticidad y su capacidad de retención de agua, lo que resulta en productos con mejor calidad sensorial, como las tortillas.

A pesar de ello, la nixtamalización tradicional presenta desafíos significativos en términos de consumo de agua, generación de residuos y eficiencia energética. El proceso requiere grandes volúmenes de agua para la cocción y el enjuague del maíz, lo que genera un subproducto conocido como nejayote, un residuo alcalino que puede representar un problema ambiental si no se trata adecuadamente. Además, los tiempos de cocción prolongados significan mayor gasto económico y energético para los productores.

Antinutrientes

Sustancias que se encuentran de forma natural en los alimentos y que "bloquean" o dificultan que nuestro cuerpo aproveche al máximo los nutrientes de esa u otras comidas.



Figura 1. Nixtamalización tradicional. Imagen creada por los autores mediante ChatGPT.

Para resolver esta problemática, ha adquirido relevancia la incorporación de nuevas tecnologías que buscan optimizar el proceso de nixtamalización, reducir el consumo de agua y energía, y minimizar los residuos generados. Entre estas innovaciones, el calentamiento óhmico constituye una alternativa eficiente para llevar a cabo la nixtamalización de manera más rápida y sustentable, preservando –e incluso mejorando– las características que han hecho de este proceso una pieza clave en la cultura e industria alimentaria.

¿Cómo funciona el calentamiento óhmico y por qué es una revolución?

El calentamiento óhmico es una tecnología que está transformando la industria alimentaria ya que ofrece una forma eficiente y sostenible de procesar alimentos. Su principio es sencillo, pero poderoso: en lugar de calentar un alimento desde una fuente externa –como ocurre con los métodos convencionales de cocción–, el calentamiento óhmico utiliza corriente eléctrica para generar calor directamente en el interior del material.

Imaginemos el sistema básico de todos los sistemas eléctricos: un circuito eléctrico. Éste se compone de una fuente de electricidad (como una batería), una resistencia (componente moderador de energía) y un receptor (supongamos, un foco), unidos a un sistema de cables de algún material conductor, generalmente cobre (Figura 2). Si cerramos este circuito por medio del sistema de cables, la batería es capaz de generar electricidad que viaja desde su polo positivo hacia el foco, convirtiendo esta energía eléctrica en luz. Hasta este punto la energía sigue fluyendo en el sistema hasta volver al polo negativo de la batería, donde recorrerá el mismo camino tanto como necesitemos que este foco siga produciendo luz.

Ahora bien, si sustituimos cuidadosamente el foco por un recipiente con un alimento y dos electrodos metálicos en sus extremos, y reemplazamos la batería con un generador de corriente alterna (la corriente eléctrica de nuestros hogares), seguimos en el mismo canal del circuito eléctrico. Esto funcionaría de la manera que se explica a continuación.

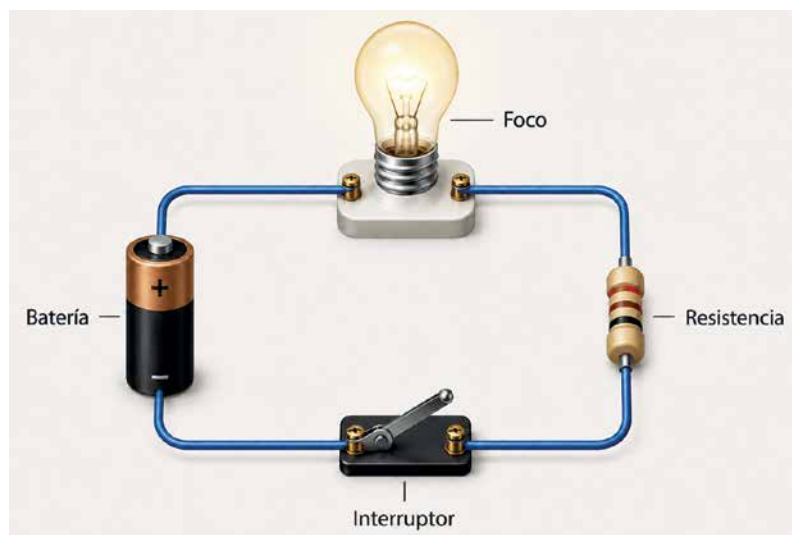


Figura 2. Circuito eléctrico convencional. Imagen creada por los autores mediante ChatGPT.

Los alimentos son una fuente rica de macronutrientes, minerales y agua. Cuando una corriente alterna pasa a través de un material de este tipo, el material ofrece conductividad eléctrica y resistencia al flujo de electricidad, lo que provoca que se genere calor internamente. En términos prácticos, significa que el alimento se calienta de adentro hacia afuera, con lo que se logra una cocción rápida y homogénea.

Un generador de corriente alterna permite el flujo de energía que se alterna de modo positivo y negativo, a diferencia de una batería. Los alimentos poseen componentes que, por su naturaleza química, son sensibles a esta corriente –como el agua, los carbohidratos, los minerales y las proteínas–, o bien contribuyen a que haya conductividad eléctrica, que es la capacidad de un material de permitir el paso de una corriente eléctrica. Otros componentes, como la fibra y los lípidos, no poseen esta cualidad, lo que crea una oposición al flujo de la energía, el cual se había denominado resistencia.

La corriente alterna viaja a través del alimento de un polo positivo al negativo, haciendo que los componentes conductores se orienten hacia ambos polos mientras se encuentran en constante cambio. Si una corriente alterna convencional atraviesa el alimento, estamos hablando de una frecuencia de 60 Hertz, que es el número de ciclos o cambios de polaridad que efectúa una corriente alterna. Esto

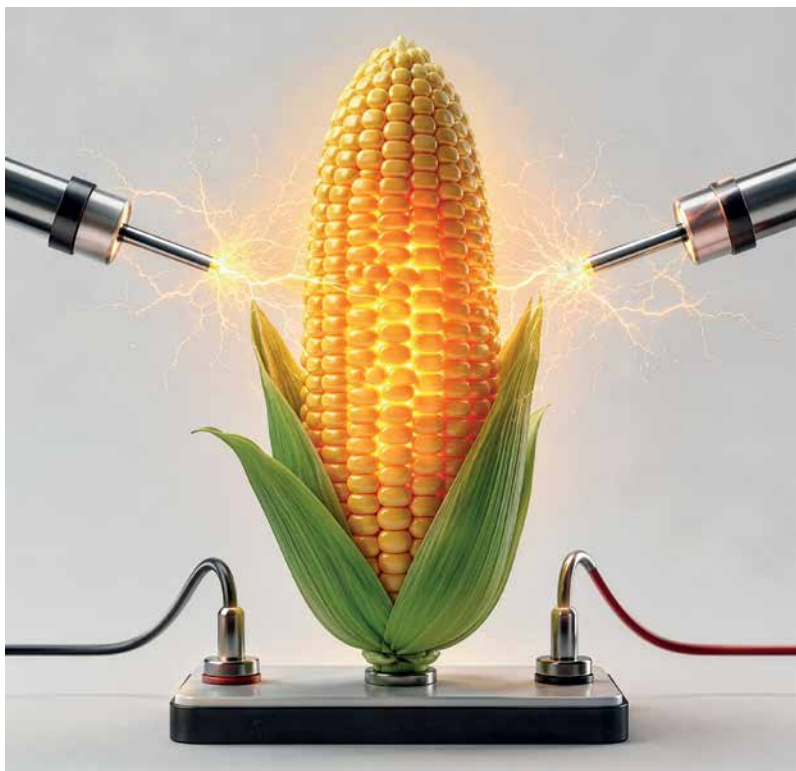


Figura 3. El efecto Joule en el maíz. Imagen creada por los autores mediante ChatGPT.

significa que si cada ciclo es un cambio en dos direcciones, los componentes se mueven 120 veces en un segundo. Esto provoca fricción y, por ende, generación de calor por las colisiones o choques entre la electricidad y estos componentes. Este efecto es conocido como efecto Joule y es el responsable de la cocción del alimento que estamos “electrificando” (**Figura 3**), lo que constituye la base del calentamiento óhmico.

El calentamiento óhmico ha sido adoptado en diversas aplicaciones dentro de la industria alimentaria, como la pasteurización de líquidos, la conservación de frutas y la cocción de productos cárnicos. Sin embargo, en el caso del maíz, su potencial es especialmente relevante debido a la posibilidad de mejorar la eficiencia y calidad de productos nixtamalizados y harinas precocidas.

El futuro del maíz procesado podría estar marcado por la integración de esta tecnología en plantas industriales, lo que permitiría producir harinas, masas y tortillas con mejor perfil nutricional, menor impacto ambiental y una calidad superior.

■ **Beneficios del calentamiento óhmico en la nixtamalización del maíz**

■ Comparando este método con la nixtamalización tradicional, las ventajas son significativas, ya que permite una distribución uniforme del calor, eliminando zonas frías o sobrecalentadas y reduciendo la posibilidad de una cocción desigual. Además, el proceso se lleva a cabo en menor tiempo, debido a la transferencia de calor instantánea, lo que agiliza la cocción y mejora la eficiencia. Otra ventaja clave es la preservación de nutrientes y compuestos bioactivos, ya que, al reducir los tiempos de exposición al calor, se minimiza la degradación de vitaminas y antioxidantes presentes en el maíz. A esto se suma una mayor eficiencia energética, pues, a diferencia del calentamiento convencional —que desperdicia gran parte de la energía en el entorno—, el calentamiento óhmico optimiza el uso de la energía aplicada directamente al alimento. Por último, este método contribuye a la reducción del consumo de agua, pues en la nixtamalización convencional se requieren grandes volúmenes del líquido para la cocción y enjuague de los granos. Con el calentamiento óhmico, este consumo se minimiza, promoviendo una producción más sustentable.

El calentamiento óhmico también puede emplearse en la fabricación de *snacks* a base de maíz, como totopos o nachos, al optimizar la cocción de la masa y mejorar la expansión del producto final. Esto provee mejoras en la textura y crocancia del producto, así como una mejor absorción de sabores y aceites durante procesos de fritura y horneado.

Por otro lado, el uso de corriente eléctrica en el calentamiento óhmico contribuye a la reducción de antinutrientes, toxinas, microorganismos y patógenos en el maíz y sus derivados. Esto hace que sea una opción viable para mejorar la seguridad alimentaria y prolongar la vida útil de productos elaborados con maíz.

■ **Conclusión**

■ Al generar calor directamente dentro del maíz mediante electricidad, el calentamiento óhmico ofrece beneficios en eficiencia energética, conservación de

nutrientes, reducción del consumo de agua y tiempo de procesamiento, mejora la seguridad alimentaria y prolonga la vida útil de los alimentos. Desde la producción de harinas nixtamalizadas hasta la optimización de *snacks* y productos a base de maíz, el calentamiento óhmico presenta un enfoque sustentable y de alto rendimiento para la industria alimentaria.

Sin embargo, su adopción a gran escala aún enfrenta retos relacionados con costos de implementación, regulación y optimización de parámetros de procesamiento, aunque la mayor parte de estos factores se deben a que es una tecnología que aún no se usa de manera masiva. A medida que más estudios confirmen su viabilidad industrial y se ajusten los modelos de producción, es probable que esta tecnología se convierta en una herramienta esencial para la manufactura de productos a base de maíz en el futuro.

El desafío ahora es impulsar su integración en la industria, de modo que los beneficios del calentamiento óhmico lleguen no sólo a los productores, sino también a los consumidores que buscan alimentos de mayor calidad y sostenibilidad. Así, el maíz, un alimento milenario, encuentra en la electricidad y el calentamiento óhmico aliados inesperados para seguir nutriendo al mundo con la misma fuerza con la que lo ha hecho desde hace siglos.

Uriel de Jesús Cruz Calderón

Universidad Autónoma de Querétaro.
ucruz28@alumnos.uaq.mx

Marcela Gaytán Martínez

Universidad Autónoma de Querétaro.
marcelagaytanm@yahoo.com.mx

Anai Zavala Franco

Universidad Autónoma de Querétaro.
anai.zavala.f@gmail.com

Lecturas recomendadas

- Anaya Esparza, L. M., V. M. Gómez-Rodríguez, H. Ramírez Vega, S. Hernández Estrada, L. A. Hernández-Villaseñor y B. Z. Villagrán de la Mora (2024), "Propiedades nutricionales, fisicoquímicas, funcionales, compuestos fenólicos y actividad antioxidante de harinas de tres accesiones de maíz azul nativo de México", *Ingeniería: Ciencia, Tecnología e Innovación*, 11(1): 23-39. Disponible en: <https://doi.org/10.26495/z1k1kc46>.
- Cruz-Calderón, U. (2024), "Evaluación del proceso de nixtamalización por calentamiento óhmico como un método de destoxificación de aflatoxinas en las tortillas de maíz", tesis para obtener el título de Ingeniero Químico en Alimentos, Facultad de Química, Universidad Autónoma de Querétaro. Disponible en: <https://ri-ng.uaq.mx/bitstream/123456789/11049/1/FQLIN-259002.pdf>, consultado el 20 de julio de 2026.
- Galindo-Olguín, C. N., N. S. Cruz-Cansino, E. Ramírez-Moreno, J. A. Ariza-Ortega, G. I. Camacho-Bernal y A. Cervantes-Elizarrarás (2021), "El maíz y la nixtamalización: modificación de sus componentes, técnicas de proceso y enriquecimiento de tortilla", *Educación y Salud, Boletín Científico del Instituto de Ciencias de la Salud, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo*, 10(19):205-213. Disponible en: <https://doi.org/10.29057/icsa.v10i19.7236>.
- Gavahian, M. y S. K. Sastry (2020), "Ohmic-assisted peeling of fruits: Understanding the mechanisms involved, effective parameters, and prospective applications in the food industry", *Trends in Food Science & Technology*, 106:345-354. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2020.10.027>.
- Gaytán-Martínez, M., F. Martínez-Bustos y E. Morales Sánchez (2000), "Aplicación de un proceso de cocimiento dieléctrico en la elaboración de harinas instantáneas de maíz amarillo para preparación de frituras de masa y tortillas", *Archivos Latinoamericanos de Nutrición*, 50(4):366-373.

Rodrigo E. Velasco Rebollo, Omar Jacobo Santos Sánchez y Liliam Rodríguez Guerrero

Deshidratación atmosférica de alimentos: una forma de conservarlos mediante aire caliente

Resumen

En este artículo exploramos la deshidratación de alimentos, técnica milenaria que usa aire caliente para reducir la humedad y conservarlos sin aditivos; se analiza también su funcionamiento, su eficacia y cómo los investigadores de la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo han perfeccionado este método a lo largo de años para lograr hacerlo mucho más eficiente energéticamente.

Abstract

In this article, we explore food dehydration, an ancient technique that uses hot air to reduce moisture and preserve food without additives; we also analyze how it works, its effectiveness, and how researchers from the Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo have perfected this method over the years to make it much more energy-efficient.

Introducción

A lo largo de la historia de la humanidad, las personas han buscado maneras de conservar sus alimentos para asegurar su disponibilidad en tiempos de escasez. Entre los métodos de conservación, la deshidratación se ha mantenido como una de las técnicas más usadas. A grandes rasgos, este proceso elimina la mayor parte del agua de un alimento, extendiendo así su vida útil. Pero no está libre de problemas, ya que el alimento deshidratado no siempre conserva su valor nutricional.

Para comprender la importancia de la deshidratación como método de conservación de alimentos hay que tomar en cuenta el papel del agua dentro de ellos. El agua no sólo es un medio de transporte de nutrientes, sino también un factor que promueve el crecimiento de microorganismos; por ello, al reducir la actividad del agua, se minimiza el riesgo de deterioro y se prolonga la vida útil. Además, al disminuir el peso y volumen del alimento, se facilita su transporte y almacenamiento.

Existen diversos métodos de deshidratación: uno de ellos es el solar, que utiliza la radiación del sol; la liofilización, que elimina el agua mediante un proceso de



congelación y posterior sublimación (paso directo de hielo a vapor); el método osmótico, que consiste en sumergir alimentos en una solución concentrada de azúcar o sal, y además está el método atmosférico, que consiste en el uso de aire caliente en condiciones controladas. Cada uno de estos métodos tiene ventajas y aplicaciones específicas según el tipo de alimento de que se trate y de los objetivos de conservación. Entre estas tecnologías, la deshidratación atmosférica destaca por su eficiencia y versatilidad, ya que es un proceso que no sólo puede aplicarse en la industria alimentaria, sino también en ámbitos tan variados como los de la biotecnología, la agroindustria, los textiles, los minerales, los polímeros y la madera, entre otros.

Si bien la tecnología de secado es fundamental en diversas industrias, también es una de las que tienen más consumo energético, el cual representa entre el 12 y el 25 % de la energía industrial en los países desarrollados (Đaković y cols., 2023). Históricamente, la operación de estos sistemas era manual, pero la progresiva integración de herramientas de control automático ha sido clave para optimizar procesos y garantizar la calidad de los productos.

■ ¿Qué es la deshidratación atmosférica y cómo funciona?

■ Es un proceso térmico que utiliza aire caliente en condiciones controladas para evaporar el agua. Es ampliamente utilizada en la industria alimentaria,

ya que es ideal para frutas, vegetales, carnes, hierbas, etcétera. Al mantener el alimento en un ambiente con una temperatura y flujo de aire constantes, se asegura la eliminación gradual de la humedad sin comprometer significativamente su estructura ni propiedades.

El proceso comienza con la colocación de los alimentos en bandejas dentro de una cámara de secado, donde un sistema de ventiladores hace circular aire caliente alrededor de los productos, los cuales absorben la humedad que se evapora, mientras que un sistema de escape elimina el aire saturado de agua, para permitir que el aire fresco continúe el ciclo.

Las variables en este proceso son:

- Temperatura: de entre 50 y 90 °C, dependiendo del alimento. Las temperaturas demasiado altas pueden degradar nutrientes sensibles como las vitaminas.
- Humedad relativa: el control de la humedad del aire ayuda a evitar el secado desigual.
- Velocidad del aire: un flujo de aire constante asegura una deshidratación uniforme.

En la **Figura 1** se muestra una deshidratadora industrial de alimentos por aire caliente.

■ La disciplina del control automático

■ Es una rama de la ingeniería que se encarga de diseñar y desarrollar sistemas que regulan automática-



Figura 1. Deshidratadora industrial de alimentos.

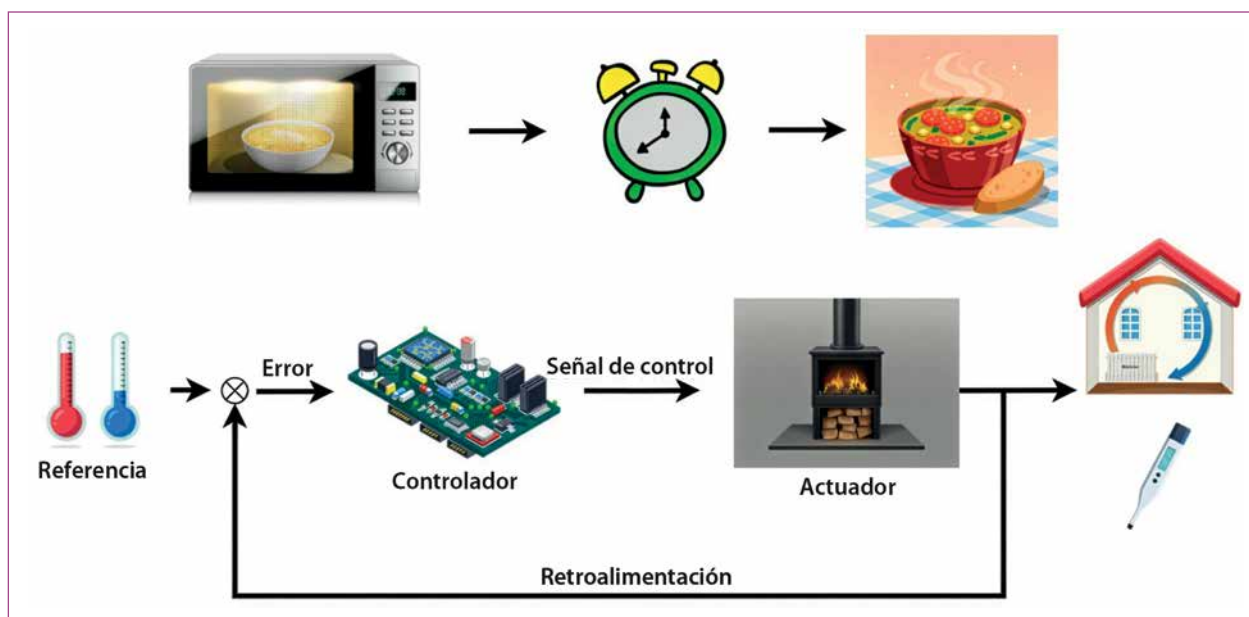


Figura 2. Sistema en lazo abierto y lazo cerrado.

mente el comportamiento de máquinas, procesos o dispositivos sin necesidad de intervención humana constante. Su objetivo es que éstos puedan ajustar su funcionamiento de manera autónoma para alcanzar y mantener un estado deseado, como una temperatura específica, una velocidad constante o una presión adecuada.

Los sistemas de control se basan en sensores (miden el estado actual del sistema), controladores (toman decisiones sobre qué hacer para corregir un error) y actuadores (realizan las acciones para cambiar el comportamiento del sistema). El control se usa en una gran variedad de aplicaciones, como en la industria, la robótica, los vehículos autónomos y en dispositivos electrónicos.

Dentro de la ingeniería de control, se utilizan los términos “sistema en lazo cerrado” y “sistema en lazo abierto” para referirse a un sistema donde existe, o no, la presencia de información de retroalimentación.

Un ejemplo de un sistema en lazo abierto es un microondas. Cuando se pone un plato de comida dentro y se selecciona el tiempo de cocción, el aparato calienta la comida y luego se apaga; no ajusta el tiempo de cocción ni la potencia en función de si la comida se ha calentado bien o no.

Un ejemplo de sistema en lazo cerrado es un sistema de calefacción. Si la temperatura medida por el termómetro (sensor) está por debajo de la temperatura deseada (referencia), el controlador ordena al calefactor (actuador) que se encienda. Cuando la temperatura alcanza el nivel deseado, el controlador apaga el calefactor. El sistema sigue ajustando la acción con base en las mediciones en tiempo real, lo que hace que el proceso sea automático y continuo. En la **Figura 2** se ilustran los sistemas mencionados.

Además, existen dos tipos de sistemas: los lineales y los no lineales. Los lineales son aquellos donde la salida es directamente proporcional a la entrada. En contraste, los no lineales son aquellos donde la salida no es proporcional a la entrada. Esto significa que, por ejemplo, si se duplica la entrada, no necesariamente se duplicará la salida, y que pequeñas variaciones en la entrada pueden causar grandes cambios en la salida.

De acuerdo con Aström y Hägglund (1995), el controlador más usado en la industria es el PID (proporcional integral derivativo), que funciona a través de tres componentes: el proporcional, que ajusta la respuesta en función de qué tan lejos está el valor medido del valor deseado; el integral, que corrige el error acumulado a lo largo del tiempo, y el derivativo,

que se anticipa a futuros errores basándose en la velocidad de cambio del error.

Los sistemas de control pueden ajustar en tiempo real los parámetros de deshidratación –como la velocidad del aire y la temperatura–, para optimizar el secado y mejorar la eficiencia energética. Gracias a esto, se logra una deshidratación uniforme minimizando pérdidas de nutrientes y asegurando la calidad del producto. Es en este sentido que investigadores y alumnos del programa de posgrado en Automatización y Control de la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo (UAEH) trabajan para la generación de conocimiento dirigido particularmente al control de sistemas con retardo para la regulación de temperatura y optimización de energía, con enfoque en procesos de deshidratación de alimentos.

Un sistema con retardo es aquel en el que hay un tiempo de espera entre la acción realizada y la respuesta obtenida. Existen distintos tipos, como lo son los sistemas con retardo puntual, los sistemas con retardo distribuido y los sistemas de tipo neutral.

Para entender de una manera más clara los sistemas con retardo, veamos la **Figura 3**, donde se ejemplifica un sistema con retardo puntual. Imagina que te metes a la ducha y abres la llave del agua caliente. En este ejemplo, el retardo es el tiempo que transcurre entre abrir la llave y sentir el agua caliente.

A continuación, se presenta de forma cronológica el desarrollo del proyecto enfocado a la industria de la deshidratación de alimentos desarrollado en la UAEH, que ha derivado en artículos científicos que presentan diversas estrategias de control.

Revisión del camino recorrido por investigadores de la UAEH

A partir del 2008 dio comienzo el trabajo en un proyecto de investigación aplicado a la deshidratación. Comenzó con el desarrollo de un prototipo de máquina de secado donde se consideró la presencia de un retardo en la entrada, debido a la distancia existente entre el elemento calefactor de la máquina y el elemento a deshidratar, lo cual es un problema común en sistemas de transferencia de calor.

Para ilustrar lo mencionado, en la **Figura 4** se muestra un diagrama del sistema de secado, donde se observa que el prototipo consta de dos cámaras. En la primera, se coloca el alimento y se mide la temperatura; mientras que en la segunda es donde se encuentra el actuador, el cual aumenta su temperatura. Además, se observa un ventilador que genera un flujo de aire constante, el cual se calienta al pasar por la cámara del elemento calefactor para después incidir en la cámara del producto y de esa manera eliminar la humedad del alimento.

Como resultado del primer avance del proyecto, se demostró que gracias a la aplicación de controladores óptimos –en comparación con controladores convencionalmente usados en la industria del secado–, se obtiene una mayor eficiencia energética.

Entre los años 2010 y 2012, se presentó la continuación del proyecto en el cual, además de la aplicación de un controlador óptimo con compensación de retardo, se agregó la monitorización de color, mediante un colorímetro y un algoritmo para visión artificial. Además de conseguir una disminución del

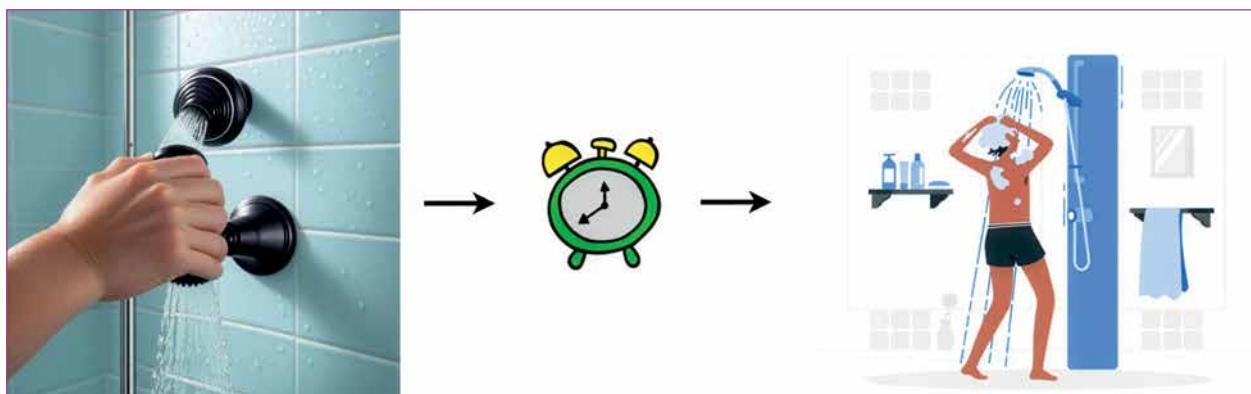


Figura 3. Ilustración de un sistema con retardo.

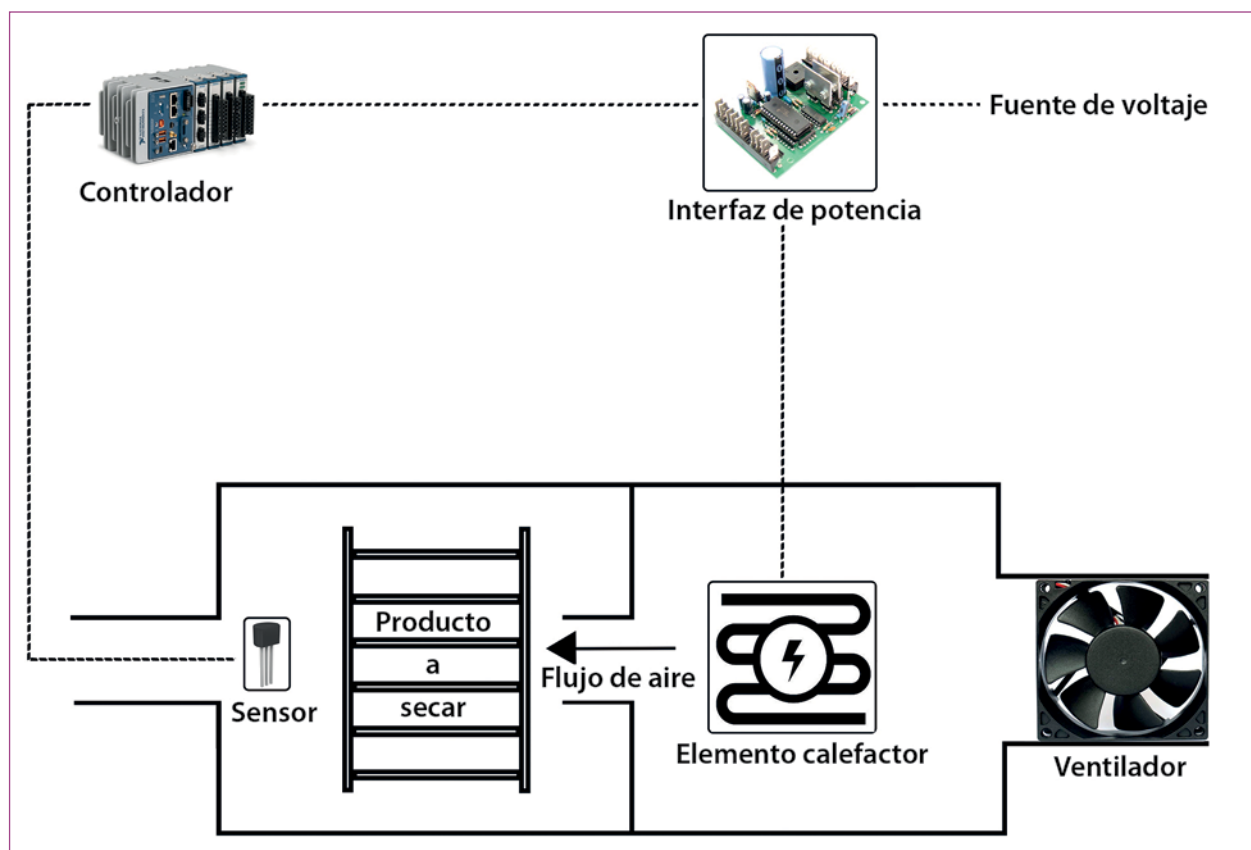


Figura 4. Diagrama esquemático de la máquina de deshidratación atmosférica.

consumo energético del proceso en un 30 %, se logró garantizar la calidad del producto deshidratado en cuanto a retención de nutrientes (Santos-Sánchez y cols., 2016). Asimismo, se trabajó en la implementación de distintas técnicas de control, tales como controladores difusos y robustos, y regulación de humedad.

Para el tercer avance, en 2016 se desarrolló un control adaptable no lineal, aplicado a deshidratación de plátano. Además del desarrollo de la estrategia de control para el secado, se realizó la implementación de un sistema fotovoltaico compuesto por paneles solares y baterías para la alimentación del proceso, que logró una reducción del consumo energético en 25 %. El sistema incorporó un método de identificación de los parámetros del proceso, lo que permitió realizar ajustes dinámicos en tiempo real optimizando la eficiencia térmica del proceso. Como parte de esta investigación, se utilizó un colorímetro para evaluar la pérdida de color del plátano deshi-

dratado, y así asegurar un producto final de mejor calidad.

Para el año 2017, la investigación avanzó hacia la optimización de controladores π (proporcional



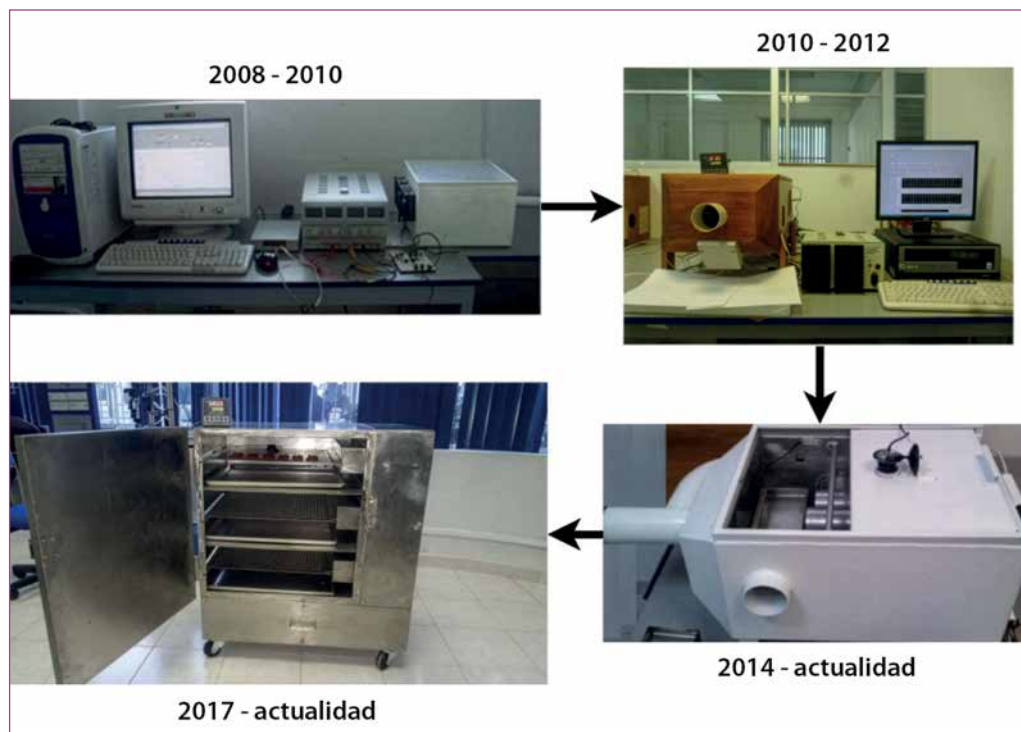


Figura 5. Evolución de las máquinas usadas por el grupo de investigación de la UAEH.

integral) y PID. En este estudio se utilizaron técnicas avanzadas de sintonización, como la regulación vía control integral y un algoritmo llamado Hill Climbing, con una reducción en el consumo de energía y una mayor estabilidad térmica. Asimismo, se implementó el sistema en un controlador que se puede aplicar en entornos industriales. En la **Figura 5** se muestra la evolución de las máquinas usadas por los estudiantes de la UAEH.

En 2018, se exploró la implementación de un control óptimo robusto para procesos con retardo en el estado, con base en la teoría de Lyapunov-Krasovskii –término que alude a dos matemáticos rusos conocidos por sus importantes contribuciones en el campo de la teoría de control y estabilidad de sistemas dinámicos–. Este avance permitió mejorar la estabilidad del proceso de deshidratación de jitomate reduciendo el impacto de perturbaciones externas y logrando una regulación térmica más precisa y eficiente (López-Labra y cols., 2019).

En 2019, el proyecto evolucionó hacia el desarrollo de estrategias de control predictivo. En esta fase, se diseñó un control basado en una técnica

llamada rediseño de Lyapunov. En este caso, se consideraron retardos tanto en el estado como en la entrada del control, y se logró una optimización en el desempeño del proceso térmico y mayor eficiencia en la regulación de temperatura (Santos-Sánchez y cols., 2020).

En el año 2022, se incorporó la teoría de control robusto no lineal, mediante el uso de la fórmula universal de Sontag –matemático estadounidense de origen argentino– y las **funcionales** de Lyapunov-Krasovskii. En esta etapa, se evaluó la resistencia del sistema ante perturbaciones y variaciones en la dinámica térmica, con el objetivo de garantizar un desempeño estable y eficiente en el proceso de deshidratación.

Conclusión

La disciplina del control automático ha permitido la transformación de la industria del secado al mejorar la eficiencia energética, la uniformidad del proceso y la calidad del producto. A través de la implementación de tecnologías como diseño y de-

Funcionales
Una funcional es como una máquina matemática que, en lugar de recibir un número y devolverte otro número, recibe una función completa y te devuelve un solo número como resultado.

sarrollo de controladores robustos, adaptativos y algoritmos predictivos, los investigadores y alumnos de la UAEH han logrado optimizar sistemas de secado al reducir costos. Como resultado de los trabajos antes mencionados, se han graduado 10 profesionistas del programa de posgrado. Actualmente el proyecto se encuentra enfocado en obtener harina de pescado de bajo coste y alto contenido nutricional para usarse como alimento animal, a partir de pez diablo, que es considerado una especie invasora.

Estos avances en control automático muestran cómo la tecnología y la ingeniería están revolucionando los procesos de conservación alimentaria.

Rodrigo E. Velasco Rebollo

Área Académica de Computación y Electrónica, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo.

ve387696@uaeh.edu.mx

Omar Jacobo Santos Sánchez

Área Académica de Computación y Electrónica, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo.

omarj@uaeh.edu.mx

Liliam Rodríguez Guerrero

Área Académica de Computación y Electrónica, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo.

liliam_rodriguez@uaeh.edu.mx

Referencias específicas

Aström, K. J. y T. Hägglund (1995), *PID Controllers: Theory, Design, and Tuning*, EUA, International Society of Automation.

Đaković, D., M. Kljajić, N. Milivojević, Đ. Doder y A. S. Anđelković (2023), "Review of energy-related machine learning applications in drying processes", *Energies*, 17(1):224. Disponible en: <https://doi.org/10.3390/en17010224>.

López-Labra, H. A., O. J. Santos-Sánchez, L. Rodríguez-Guerrero, J. P. Ordaz-Oliver y C. Cuvas-Castillo (2019), "Experimental results of optimal and robust control for uncertain linear time-delay systems", *Journal of Optimization Theory and Applications*, 181(3):1076-1089. Disponible en: <https://doi.org/10.1007/s10957-018-01457-9>.

Santos-Sánchez, N. F., R. Salas-Coronado, O. J. Santos-Sánchez, H. Romero y E. Garrido-Aranda (2016), "On the effects of the temperature control at the performance of a dehydration process: energy optimization and nutrients retention", *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 86:3157-3171. Disponible en: <https://doi.org/10.1007/s00170-016-8481-z>.

Santos-Sánchez, O. J., R. E. Velasco-Rebollo, L. Rodríguez-Guerrero, J. P. Ordaz-Oliver y C. Cuvas-Castillo (2020), "Lyapunov redesign for input and state delays systems by using optimal predictive control and ultimate bound approaches: theory and experiments", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 68(12):12575-12583. Disponible en: <https://doi.org/10.1109/TIE.2020.3040678>.

Nadía Rodríguez-Medina y Ulises Garza-Ramos

La armadura de azúcar que protege a las bacterias

Resumen

El mundo de las bacterias es extraordinariamente diverso e incluso la comprensión más superficial de cada especie por sí sola requiere años de investigación. La mayoría de las bacterias producen polisacáridos extracelulares, entre los cuales se encuentran los que forman parte de la cápsula, que es la estructura que rodea la superficie de muchas bacterias y desempeña un papel vital en la ecología bacteriana y en las interacciones con el medio ambiente.

Summary

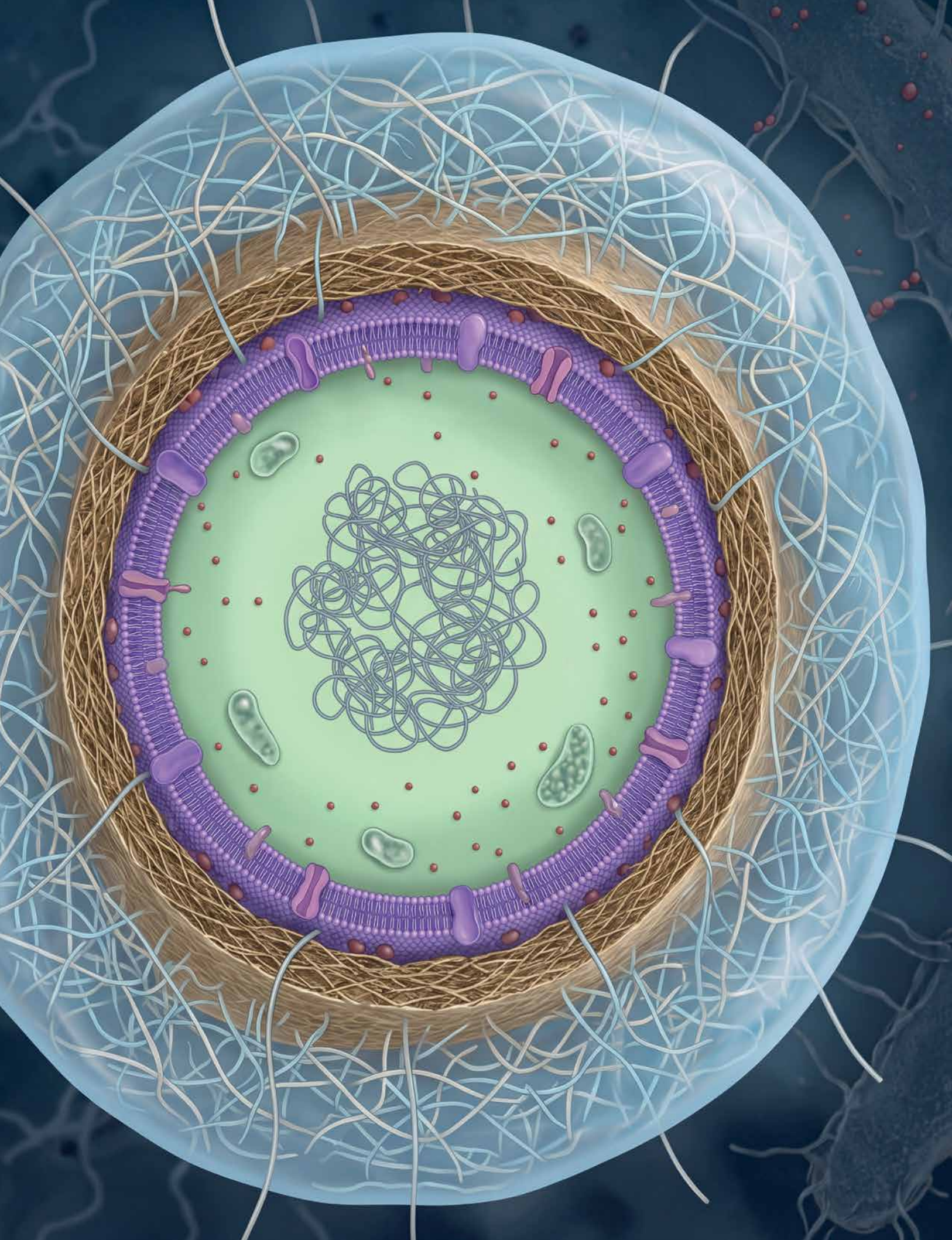
The bacterial world is extraordinarily diverse, and understanding even a single species requires years of research. Most bacteria produce extracellular polysaccharides, including those that make up the capsule. This structure coats the surface of many bacteria and plays a crucial role in bacterial ecology and interactions with the environment.

Introducción

Durante muchos años los seres humanos hemos buscado constantemente maneras de protegernos, puesto que sobrevivir ha sido parte de nuestro éxito en colonizar el planeta Tierra cuando aún era joven.

En la Edad Media, los caballeros usaban armaduras hechas de materiales altamente resistentes, como el bronce o el acero, utilizadas para la defensa en combates y entrenamientos. Éste era el rasgo más destacado de un caballero: su equipo de protección consistía en un yelmo y un escudo, a los que después se les fue añadiendo una coraza, brazales, grebas y escarpes para tener una armadura que proveyera protección completa contra el adversario.

En la vida microscópica, las bacterias en particular también han desarrollado estrategias para defenderse contra múltiples agresiones y así prosperar en casi cualquier ambiente terrestre y marino. La cápsula constituye la estructura más externa de la arquitectura de las bacterias; sin embargo, no todas las bacterias tienen cápsula y algunas pueden producir más de una.



Al igual que la armadura de un caballero, la cápsula protege a las bacterias del estrés ambiental y químico favoreciendo la colonización y persistencia en nuevos ambientes no sólo en hospederos humanos, sino también en plantas y animales. Te imaginarás entonces que la cápsula es una estructura importante para las bacterias, y aquellas que no son capsuladas tienen, en la mayoría de los casos, menos ventajas para colonizar un determinado ambiente o causar una infección.

■ **Funciones de la cápsula**

■ La cápsula desempeña diversos papeles, entre ellos facilitar la adhesión bacteriana a superficies, mientras que en otras bacterias mejora la colonización en diversos nichos fomentando la formación de **biopelículas**. Además, sus propiedades físicas evitan la desecación, al retener la humedad cerca de la superficie celular y mejorar la supervivencia en entornos hostiles.

La cápsula también desempeña un papel esencial durante la infección, ya que favorece la evasión de las primeras barreras de nuestro sistema de defensa. Por ejemplo, los aislamientos de *Klebsiella pneumoniae* con cápsula son menos **fagocitados** que aquellos que no tienen cápsula; por eso se consideran más virulentas aquellas bacterias con cápsula, ya que pueden escapar de la acción del sistema inmune.

Por otro lado, la cápsula también reduce la eficacia de los antibióticos y de los **péptidos antimicrobianos**. Estas implicaciones médicas han impulsado la investigación sobre las cápsulas y sus funciones, lo que ha llevado a estudiar esta estructura como uno de los principales factores de virulencia de las bacterias.

■ **¿Cómo se produce una cápsula?**

■ Las cápsulas conocidas como **antígenos K** se componen principalmente de polisacáridos de alto peso molecular anclados fuertemente a la membrana celular de las bacterias. Los polisacáridos son esencialmente unidades repetidas de muchos azúcares simples como glucosa, fructosa, manosa o galactosa. Estos azúcares simples, denominados monosacáridos, se pueden unir para formar oligosacáridos (unidades de

tres a diez azúcares) y, finalmente, la suma de oligosacáridos forma un polisacárido capsular.

Existen tres vías principales mediante las cuales se lleva a cabo la producción de la cápsula: i) la vía Wzx/Wzy; ii) la vía transportadora ABC dependiente del casete de unión a ATP, y iii) la vía dependiente de sintasa. En esta sección nos enfocaremos en cómo se produce una cápsula mediante la vía Wzx/Wzy, ya que es el mecanismo mejor conocido en bacterias patógenas Gram negativas, como *Escherichia coli*, *K. pneumoniae* y *Acinetobacter baumannii*.

El proceso de producción de la cápsula se divide en tres fases principales, que son síntesis de azúcares, polimerización y transporte de la membrana interna a la externa, representadas en ocho pasos (**Figura 1**). El primer paso comienza en el citoplasma y es iniciado por una **glicosiltransferasa** (GT), que une una molécula de glucosa (WcaJ) o galactosa (WbaP) a un transportador lipídico, el undecaprenil fosfato (Und-P). Posteriormente, los oligosacáridos como la fucosa y el ácido urónico (transportados por otras GT) se agregan al Und-P (2). Estos azúcares son transportados a través de la membrana interna por Wzx (**flipasa**) (3 y 4), para ser polimerizados a otras unidades de oligosacáridos por Wzy (5). La longitud de la cadena oligosacárida es controlada por Wzc (6) y, una vez que ha alcanzado la longitud requerida, la cápsula es transferida al exterior de la célula por Wza (7). Finalmente, la cápsula se ancla a la superficie celular, proceso llevado a cabo por Wzi (8).

Este proceso requiere de mucha energía e involucra varios genes, usualmente de 16 a 20, dependiendo del tipo capsular y del género bacteriano. Estos genes se ubican en una región del cromosoma bacteriano que se conoce como *cps* (*capsule polysaccharide synthesis*, por sus siglas en inglés) y puede medir entre ~10 a 30 **kilobases** (Kb). El conjunto de genes que participan en la síntesis capsular está conformado por genes conservados, los cuales contienen genes que se van a identificar en la mayoría de las cápsulas, y genes variables que son específicos de cada cápsula. Los genes variables codifican para algunas GT, la enzima encargada de unir unidades de oligosacáridos (Wzy) y la enzima encargada de translocar

Biopelícula
Comunidad bacteriana que se adhiere a una superficie y crece en ella.

Glicosiltransferasa
Enzimas que transfieren un residuo de glucosa de un nucleósido difosfato a una molécula aceptora.

Fagocitosis
Proceso llevado a cabo por macrófagos que consiste en ingerir y eliminar patógenos y desechos celulares.

Flipasa
Enzimas que ayudan al movimiento de fosfolípidos entre las dos capas de la membrana celular.

Péptidos antimicrobianos
Moléculas aminoácidas del sistema inmune innato secretadas por células epiteliales y macrófagos.

Kilobases
1 kilobase es igual a 1 000 pares de bases.

Antígeno
Cualquier estructura proveniente de bacterias, virus o toxinas que el sistema inmune identifica como extraña.

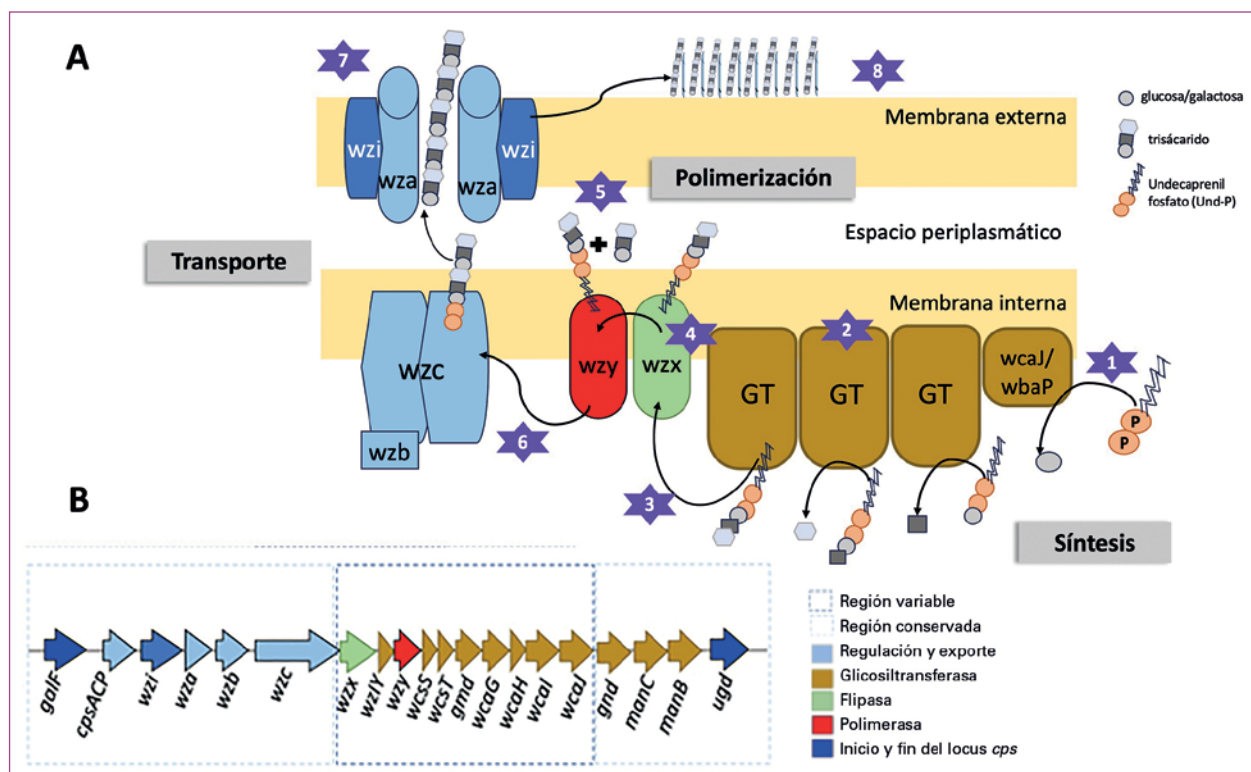


Figura 1. A) Esquematización del proceso de síntesis de la cápsula K1 de *K. pneumoniae*. Las estrellas indican el número de cada fase del proceso. B) Organización de la cápsula K1. Cada flecha representa los genes que conforman el tipo capsular y la longitud de la flecha es proporcional al tamaño del gen. Los genes localizados en el recuadro azul claro son genes conservados y los resaltados en el recuadro azul oscuro son genes específicos de cada tipo capsular.

del citoplasma a la membrana interna la cadena de oligosacáridos (Wzx) (Figura 1B).

Existen bacterias patógenas como *S. pneumoniae* que exhiben 98 tipos capsulares; pero hay algunas, como las especies del complejo *K. pneumoniae*, que exhiben hasta 163. Pero te preguntarás: ¿por qué existen diferentes tipos de azúcares que conforman una cápsula?, y ¿por qué hay tantos tipos de cápsulas? Aunque existen diversos factores que determinan la diversidad de las cápsulas, las GT participan en generar diversidad, aunque no es el principal factor, ya que son las encargadas de transferir las diferentes combinaciones de oligosacáridos que se unirán al transportador lipídico. El tipo de GT y el número de dichas proteínas da lugar a diferentes combinaciones de oligosacáridos y esto resulta en los diferentes tipos de cápsulas. La composición de las cápsulas permite diferenciar las bacterias de acuerdo con su **serotipo capsular**.

Los polisacáridos bacterianos a menudo implican la producción de azúcares poco comunes, como la

L-ramnosa o la L-fucosa, que no se encuentran típicamente en las células animales. Sin embargo, algunas cápsulas bacterianas son atípicas; es decir, no están hechas de azúcares, sino de proteínas o aminoácidos, como es el caso de las bacterias *Yersinia pestis* y *Bacillus licheniformis*, las cuales tienen una cápsula formada de un polímero proteico, o como en el caso de la cápsula de *Bacillus anthracis*, que consta de ácido D-glutámico (un aminoácido no esencial).

Las interacciones que diversifican la cápsula

La diversidad de los azúcares que forman la cápsula puede dar lugar a muchos serotipos capsulares dentro de una sola especie. Las GT tienen un papel fundamental al determinar las combinaciones de oligosacáridos que formarán parte de una cápsula, pero éstas no son los jugadores principales de la generación de la diversidad. Existen diferentes hipótesis que involucran, por una parte, la inmunidad del hospedero, los

Serotipo capsular

Conformación muy específica de azúcares que forman la cápsula y que se evidencian mediante su reacción con anticuerpos específicos para cada tipo capsular.

bacteriófagos (fagos) y las interacciones célula-célula como los principales factores ecológicos que conllevan una diversidad capsular. Una explicación un poco simplista es que la cápsula, al ser el primer contacto de las bacterias con su microambiente, se enfrenta a constantes interacciones con otros microorganismos o células de diferentes hospederos. En cada uno de estos microambientes, los polisacáridos capsulares funcionan como receptores para interactuar o reconocer otras estructuras presentes en fagos, amebas o células de hospederos humanos y animales. Estas interacciones son necesarias para colonizar exitosamente un nicho, intercambiar material genético o simplemente para escapar de células “bacterívoras” (células que comen bacterias). Las bacterias han estado bajo presión evolutiva para adaptarse al espectro de interacciones y modificar los azúcares capsulares que producen para favorecer el reconocimiento, aumentando así sustancialmente sus posibilidades de supervivencia.

Gen regulador
Segmento de ADN que controla la expresión de otros genes.

Plásmido
Molécula de ADN circular extracromosomal que se encuentra en algunas bacterias.

■ **La hipercápsula**

■ La hipercápsula es una variante fenotípica de una cápsula “convencional”, ya que es el resultado de la excesiva producción de azúcares capsulares, combinada con un material extracelular llamado hipermucosidad. Esta característica se puede visualizar en el laboratorio al realizar la prueba de filamento (Figura 2).

Esta característica se ha identificado en cepas hipervirulentas de *K. pneumoniae* (HvKp) y en otras especies del género *Klebsiella*, e incluso en otros géneros bacterianos como *E. coli* y *A. baumannii*. Estudios de nuestro laboratorio sugieren un papel clave en la virulencia.

La producción de una cápsula más abundante se debe a dos mecanismos. Uno de ellos sólo se ha identificado en cepas HvKp y corresponde a tres **genes reguladores** que aumentan la producción de polisacáridos capsulares, llamados reguladores del fenotipo mucosoide *rmpADC* (*regulator of the mucoid phenotype*, por sus siglas en inglés). Estos genes se localizan en los **plásmidos** de virulencia de HvKp. El segundo de ellos es el descrito en cepas no hipervirulentas, el cual consiste en mutaciones identificadas en *wzc*; su producto proteico Wzc participa en la síntesis de la cápsula al controlar la longitud de la cadena oligosacárida. No obstante, existe otra población de bacterias con hipercápsula de la cual se desconocen los genes que participan en dicho proceso.

■ **La cápsula como blanco para el desarrollo de vacunas**

■ La crisis de resistencia a los antibióticos ha provocado un mayor interés en implementar intervenciones alternativas, como las vacunas o terapias basadas

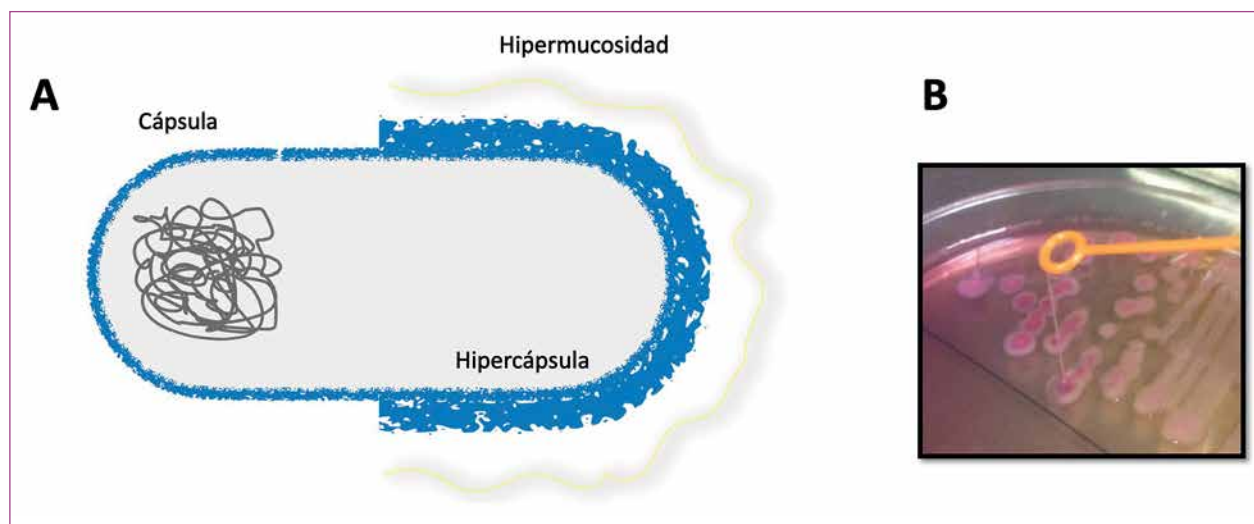


Figura 2. A) Comparación de una cápsula “convencional” (izquierda) y la hipercápsula (derecha). B) Prueba de filamento positiva, la cual es sugerente de aislamientos productores de hipercápsula. Aquellos aislamientos que no producen una hipercápsula no tienen la capacidad de formar un filamento.

en fagos para prevenir o tratar infecciones en poblaciones específicas. Las vacunas son preparaciones que suelen contener microorganismos atenuados, muertos o, en su defecto, alguna estructura de ese microorganismo (como los polisacáridos capsulares) que le enseñan a tu sistema inmune a producir anticuerpos que puedan protegerte contra futuras infecciones.

La cápsula es la estructura antigénica con mayor importancia y de la cual se ha investigado mucho su potencial como blanco terapéutico. El desarrollo de vacunas enfocadas a combatir patógenos capsulados ha sido una estrategia muy valiosa para proteger a poblaciones vulnerables, como infantes y personas de edad avanzada. Por ejemplo, aquellas que se utilizan para prevenir infecciones contra patógenos nasofaríngeos como *S. pneumoniae* y *Haemophilus influenzae* (incluidos en la vacuna hexavalente que se aplica a población infantil). Las vacunas antineumocócicas PCV13 y PCV23 contienen 13 y 20 de los casi 100 tipos distintos de polisacáridos capsulares contenidos en *S. pneumoniae*. Estas vacunas se aplican a niños menores de dos años y adultos mayores de 65 años. En el caso de *K. pneumoniae*, no existe a la fecha una vacuna aprobada. Sin embargo, existen dos empresas biotecnológicas que están desarrollando vacunas para poblaciones en específico. Inventprise (Redmond, Washington, EUA) está enfocada en estudiar los serotipos capsulares que se encuentran en aislamientos de *K. pneumoniae*, causante de sepsis neonatal, para diseñar vacunas que protejan a recién nacidos; en tanto que Omnio-se (St. Louis, Misuri, EUA) está desarrollando una vacuna que proteja contra HvKp (serotipos K1 y K2).

Sin embargo, la capacidad adaptativa de los polisacáridos capsulares para desarrollar nuevas variantes hace más difícil que una vacuna pueda cubrir todos los escenarios posibles de reemplazo capsular y todos los tipos capsulares presentes en una especie. Debido a esto, se investigan otras estructuras antigénicas que no muestren tanta variabilidad, como el

LPS o proteínas de membrana externa (como porinas) para incluirlas en futuras vacunas.

Sin duda, la cápsula continuará siendo una de las estructuras mayormente estudiadas y de la cual se develarán nuevos aspectos clave para entender la colonización y comunicación bacteriana.

■ Conclusiones

■ Las bacterias tienen diversas estrategias para protegerse contra agresiones externas, una de ellas es la producción de una cápsula. Sin embargo, la cápsula no sólo desempeña un papel protector, sino que puede tener roles importantes más allá de la patogénesis. El estudio de la cápsula y sus diversos componentes aporta información importante para el desarrollo de vacunas dirigidas hacia algunos serotipos en particular.

Nadia Rodríguez-Medina

Instituto Nacional de Salud Pública, Centro de Investigación sobre Enfermedades Infecciosas, Laboratorio de Resistencia Bacteriana.
nadia.rmedina@gmail.com

Ulises Garza-Ramos

Instituto Nacional de Salud Pública, Centro de Investigación sobre Enfermedades Infecciosas, Laboratorio de Resistencia Bacteriana.
ulises.garza@insp.mx

Lecturas recomendadas

- Gao, S., W. Jin, Y. Quan *et al.* (2024), "Bacterial capsules: Occurrence, mechanism, and function", *NPJ Biofilms and Microbiomes*, 10:21. Disponible en: <<https://doi.org/10.1038/s41522-024-00497-6>>.
- Rendueles, O., M. García-Garcera *et al.* (2017), "Abundance and co-occurrence of extracellular capsules increase environmental breadth: Implications for the emergence of pathogens", *PLoS Pathogens*, 13(7):e1006525. Disponible en: <<https://doi.org/10.1371/journal.ppat.1006525>>.

◀ Sepsis

Afección mortal que se produce cuando el sistema inmune reacciona de manera extrema a una infección provocando una falla de órganos.

Fulvia Stefany Argueta Zepeda

Guardianes de los metales: la batalla molecular por sobrevivir

Resumen

Imagina una familia de guardianes que han estado en su puesto desde hace millones de años; su misión: vigilar la entrada y salida de nutrientes importantes, como el hierro, en la frontera celular. Están presentes en especies tan diversas como humanos, vacas, ratones, gusanos, moscas, plantas, hongos... ¡y hasta en bacterias! Esto revela una estrategia evolutiva tan antigua como ingeniosa.

Abstract

Imagine a family of guardians that has stood watch for millions of years. Their mission is to regulate the movement of essential nutrients, such as iron, across the cell membrane. They are found in organisms as diverse as humans, cattle, mice, worms, flies, plants, fungi... and even bacteria! This reveals an evolutionary strategy that is as ancient as it is ingenious.

Un mundo microscópico de metales

Aunque solemos pensar en los metales como algo que viene en pastillas o está en las rocas, en realidad, forman parte de la vida desde sus niveles más pequeños. En el mundo microscópico de las células, ya sean bacterias o células que componen nuestro cuerpo, algunos metales son protagonistas silenciosos pero indispensables. Metales como el hierro, el zinc y el manganeso participan en procesos fundamentales: el hierro transporta oxígeno en nuestra sangre, el zinc permite que muchas enzimas hagan su trabajo, y el manganeso ayuda a combatir el **estrés oxidativo**. Es así como estos elementos son necesarios para la vida misma, pero ello depende de la correcta concentración en la que se encuentren. Es peligroso tenerlos en concentraciones muy bajas o en exceso. Por eso, las células han desarrollado mecanismos muy precisos para controlar la cantidad que entra, cuánto se guarda y cuándo se expulsa. Entre esos mecanismos destaca un viejo conocido de la biología: la familia de proteínas llamada Nramp1 y sus parientes cercanos Nramp2, que actúan como vigilantes especializados en transportar metales esenciales y mantener el equilibrio interno.

Estrés oxidativo

Desequilibrio entre radicales libres y antioxidantes que causa daño celular.



Inmunidad nutricional
Estrategia del hospedero para restringir metales esenciales o usar metales tóxicos contra patógenos.

Aunque existen varias familias de proteínas responsables de este transporte, en este texto nos enfocaremos en las Nramp, debido a que fueron de las primeras proteínas transportadoras de metales detectadas en células eucariontes y su estudio ha revelado un papel clave en la defensa celular. De hecho, el nombre Nramp1 proviene del inglés *natural resistance-associated macrophage protein 1*; es decir, “proteína 1 de los macrófagos asociada a la resistencia natural” frente a infecciones.

■ El rol crucial de las Nramp, guardianas multifacéticas

■ Las Nramp1 deben tomar decisiones importantes sobre cuándo y dónde permitir la entrada y salida de metales. Su trabajo es especialmente importante en las células del **sistema inmunológico**, como los macrófagos, que patrullan el cuerpo como si fueran policías celulares. Cuando detectan a una bacteria invasora, la atrapan y la encierran en una especie de “celda”

Sistema inmunológico
Red de células, moléculas y procesos que defienden el cuerpo contra patógenos y enfermedades.

microscópica llamada fagosoma. Pero no basta con encerrarla, para eliminarla hay que quitarle los micronutrientes que necesita para sobrevivir, como parte de una táctica llamada **inmunidad nutricional**. Desde la puerta de la celda, las Nramp1 controlan el acceso de metales como el hierro y el manganeso. Al cortar el suministro, dejan al microbio sin recursos y sin fuerza. Es una estrategia sencilla pero muy efectiva: “hambrear” al enemigo desde dentro (**Figura 1**).

Pero su labor no termina ahí. Además de participar en la defensa, las Nramp1 también contribuyen al abastecimiento interno de metales esenciales, manteniendo niveles adecuados para las enzimas y procesos celulares que dependen de ellos. Un aspecto fascinante de las Nramp es su capacidad para distinguir entre diferentes tipos de metales. Aunque tienen preferencia por el manganeso y el hierro en sus formas solubles (Fe^{2+} y Mn^{2+}), pueden discriminar entre estos y otros metales tóxicos o menos útiles, como el cadmio o el plomo. Este “olfato químico” les permite actuar como un filtro especializado en un

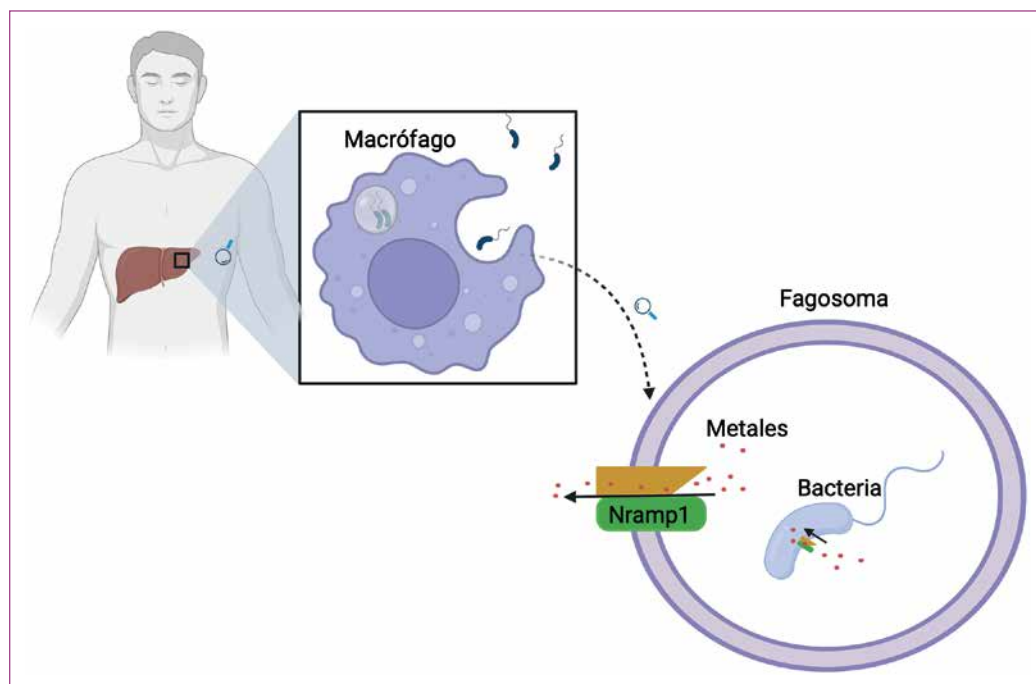


Figura 1. Competencia por metales esenciales en el fagosoma. Cuando un macrófago detecta una bacteria invasora, la envuelve en una vesícula llamada fagosoma. Para impedir que la bacteria aproveche los metales del entorno, el macrófago activa una Nramp1, proteína transportadora que extrae hierro y otros metales del fagosoma. Así, limita el acceso del patógeno a nutrientes esenciales y fortalece la respuesta antimicrobiana. Por otro lado, para sobrevivir las bacterias intentan adquirir y resguardar estos metales antes de que sea demasiado tarde, utilizando su propia versión de Nramp1 llamada MntH. Imagen creada en BioRender.

entorno celular donde hay muchos iones compitiendo por entrar (Figura 2).

Por su parte, sus parientes cercanas, las Nramp2, están presentes en muchas otras células del cuerpo y cumplen una función clave en el transporte de hierro desde el intestino hacia la sangre (Figura 2), así como en el tráfico de metales hacia el interior de organelos celulares como los endosomas y lisosomas. Podemos imaginar a los endosomas como bodegas de paso, donde la célula guarda temporalmente los materiales que llegan del exterior, mientras decide qué hacer con ellos. Los lisosomas, en cambio, funcionan como centros de reciclaje celular, donde se desarmen moléculas viejas o dañadas para reutilizar sus componentes. Juntas, las Nramp equilibran una paradoja fundamental: los metales son vitales, pero también peligrosos si se acumulan o se encuentran en el lugar equivocado.

En un mundo ideal, estos guardianes harían su trabajo sin errores. Pero la biología no siempre es perfecta, y a veces las cosas fallan. Cuando las Nramp1 o las Nramp2 no funcionan bien debido principalmente a **variaciones genéticas** que causan ausencia o desajustes en su actividad, el equilibrio de metales dentro de la célula se rompe y eso puede traer consecuencias en distintas partes del organismo. Desde problemas en el sistema inmunológico hasta trastornos metabólicos.

Variaciones genéticas

Cambios en la secuencia de ADN que pueden o no tener un efecto en la función de los genes.

Las Nramp y la salud: implicaciones en enfermedades

■ Cuando uno de estos guardianes falla, las consecuencias pueden sentirse no sólo dentro de una célula, sino en todo el cuerpo. En el caso de las Nramp1, los errores en su funcionamiento pueden volvernos más vulnerables a infecciones, especialmente a

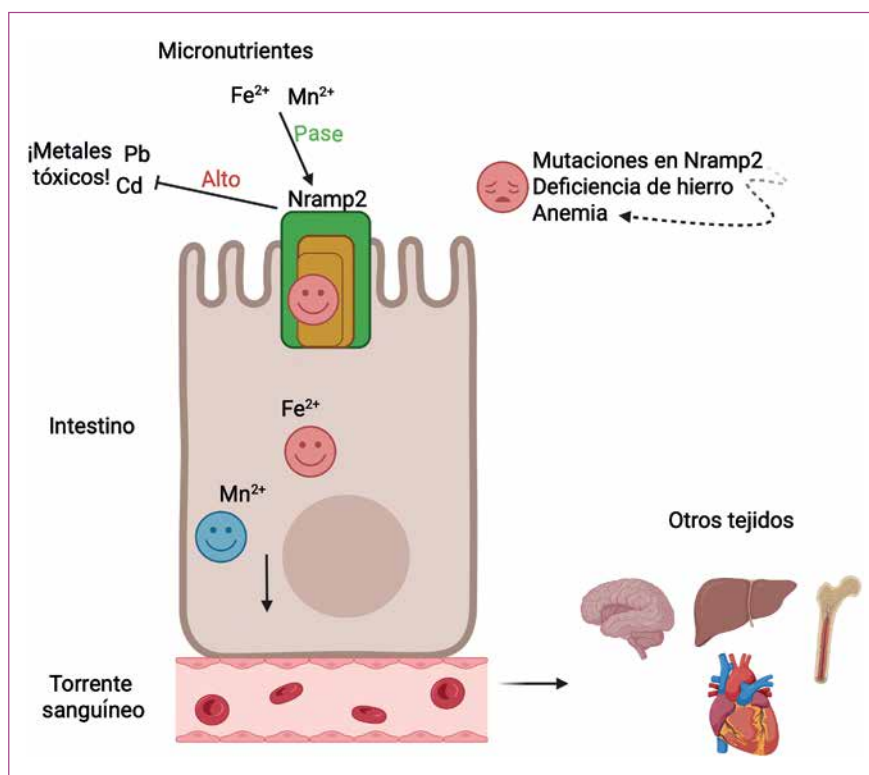


Figura 2. Función de las Nramp2 en la absorción intestinal de hierro. En el duodeno (primera porción del intestino delgado), las Nramp2 actúan como una puerta de entrada para el hierro ferroso (Fe^{2+}), permitiendo que este metal esencial entre a las células del intestino. Una vez dentro, el hierro puede almacenarse o viajar por la sangre hacia otros órganos. Si esta "puerta" está dañada por una variación genética, el hierro no puede entrar... ¡y eso puede causar anemia!, entre otras enfermedades. Aquí se muestra una Nramp2 como un portero simpático que ayuda a los iones metálicos a cruzar la frontera celular. Imagen creada en BioRender.

Bacterias patógenas
Microbios que causan enfermedades.

aquellas causadas por microbios que dependen del hierro y otros metales para sobrevivir. Sin unos buenos retenes para el control del “suministro metálico” en las celdas donde quedan atrapados los intrusos, éstos logran recuperarse, multiplicarse y causar infecciones (**Figura 1**). En humanos, se ha visto que ciertas variantes genéticas de las Nramp1 están asociadas con mayor riesgo de padecer infecciones como la tuberculosis o la leishmaniasis, y lo mismo se ha observado en modelos animales, como los ratones y el ganado.

Pero estos guardianes también tienen otras tareas delicadas, y cuando se desequilibran, pueden generar problemas más allá de las infecciones. Las Nramp1 se han relacionado con enfermedades inflamatorias crónicas. Aunque los macrófagos son los actores más conocidos en esta historia —como policías celulares—, no están solos. Otras células del sistema inmune, como neutrófilos, monocitos y células dendríticas, también pueden verse afectadas por un mal manejo de los metales, lo que alimenta una respuesta inflamatoria que se vuelve excesiva y persistente, causando daños colaterales.

Por su parte, las Nramp2, como se mencionó, están muy activas en el intestino, donde se encargan de absorber hierro para enviarlo a la sangre (**Figura 2**). Si este proceso falla puede provocar anemia, pero sus funciones no se detienen ahí. Este transportador también opera en el cerebro, y su mal funcionamiento se ha vinculado a enfermedades neurodegenerativas como el párkinson o el alzhéimer, donde el hierro se comporta como una herramienta olvidada en el lugar equivocado: se oxida, genera daños y contribuye al desgaste de las neuronas.

En resumen, tanto las Nramp1 como las Nramp2 son mucho más que porteros celulares, son piezas clave para mantener el equilibrio entre defensa, nutrición y salud; cuando se desajustan, pueden abrir la puerta a más de un problema.

Mutagénesis
Proceso que induce cambios en el material genético de un organismo.

¿Nramp en bacterias? ¡Claro que sí, con armadura microscópica y todo!
Así como nuestras células tienen guardianes que controlan el acceso de los metales, muchas bacterias

también cuentan con su propia versión de estas proteínas, conocidas como MntH, las cuales son estructural y funcionalmente muy parecidas a las Nramp1. Curiosamente, estudios genómicos sugieren que las Nramp1 podrían haber aparecido primero en bacterias y, más adelante, haber dado origen a las versiones presentes en células eucariontes.

En las **bacterias patógenas**, las MntH tienen una misión crucial: competir por los metales esenciales que el sistema inmunológico intenta limitar. Como se mencionó antes, cuando un macrófago atrapa a una bacteria, la encierra en un fagosoma y activa mecanismos para restringir el hierro y el manganeso. Por su parte, muchas bacterias patógenas han desarrollado estrategias para resistir esta presión, utilizando MntH para competir por los metales, antes de quedarse sin recursos (**Figura 1**). Esta capacidad puede marcar la diferencia entre la vida y la muerte para el microbio: se ha visto que bacterias que pierden MntH se vuelven mucho más vulnerables a los ataques del sistema inmune. Así que sí, en el mundo microscópico, la competencia por los metales es una batalla antigua... y feroz.

Los descubrimientos en casa: las Nramp en la ciencia mexicana

En México, las investigaciones sobre las proteínas Nramp y sus equivalentes bacterianos comienzan a revelar cómo estos transportadores influyen tanto en la respuesta inmunitaria como en la capacidad de algunos microorganismos para sobrevivir durante una infección. Estudios muestran que variantes del gen Nramp1 en poblaciones mexicanas pueden influir en la respuesta frente a enfermedades como la leishmaniasis (Hernández-Rivera y cols., 2016) y en la falla del tratamiento contra la tuberculosis (Salinas-Delgado y cols., 2015). En otros estudios se ha sugerido que algunas variaciones pueden tener un efecto positivo en enfermedades inflamatorias como la artritis reumatoide (Niño-Moreno y cols., 2017).

Actualmente, en el Centro de Ciencias Genómicas (CCG) de la UNAM, utilizamos estrategias de **mutagénesis** para comprender mejor el papel de MntH

en la **bacteria patógena oportunista** *Stenotrophomonas maltophilia*. Al inactivar el gen que codifica este transportador, observamos que la bacteria pierde parte de su capacidad para multiplicarse dentro de los fagosomas de la ameba *Acanthamoeba castellanii*. Los resultados muestran que el transporte de manganeso a través de MntH es fundamental para resistir las condiciones adversas que enfrenta la bacteria dentro del **hospedero** (Argueta-Zepeda y cols., 2026). Estos hallazgos ayudan a entender cómo los microorganismos compiten por los metales para sobrevivir y podrían contribuir, en el futuro, al desarrollo de nuevas estrategias para combatir infecciones.

A pesar de ser proteínas tan antiguas y esenciales, su diversidad y relevancia en la población mexicana y en los microbios que nos infectan siguen siendo un territorio en gran parte inexplorado.

■ **Conclusión: un pequeño guardián con un gran impacto**

■ A lo largo de este recorrido, vimos cómo las Nramp1 y Nramp2, pequeñas proteínas guardianas, han tenido un papel esencial en la defensa celular y en la nutrición de organismos tan diversos como bacterias y humanos. En México, aunque apenas comenzamos a desentrañar sus secretos, ya sabemos que sus variaciones genéticas pueden influir en la respuesta frente a enfermedades como la tuberculosis o la leishmaniasis. Estos descubrimientos nos recuerdan que, en el mundo microscópico, los detalles más diminutos pueden tener consecuencias enormes. Estudiar proteínas como las Nramp no sólo nos acerca a comprender mejor la base molecular de la vida, sino también abre caminos para avanzar en el cuidado de la salud en el futuro.

Fulvia Stefany Argueta Zepeda

Centro de Ciencias Genómicas, UNAM, Departamento de Ingeniería Genética.

Argueta@ccg.unam.mx

Agradecimiento

A los doctores David Romero, Pablo Vinuesa y Gustavo Pedraza por la revisión crítica del manuscrito y por sus valiosos comentarios y sugerencias que contribuyeron a mejorar este artículo de divulgación científica.

Bacterias patógenas oportunistas

Microbios que causan enfermedades sólo en huéspedes con defensas inmunitarias debilitadas.

Referencias específicas

Argueta-Zepeda, F. S., J. Rivera, J. C. Valerdi-Negros, C. Rensing y P. Vinuesa (2026), "Manganese homeostasis supports *Stenotrophomonas maltophilia* oxidative stress defense and replication in *Acanthamoeba castellanii* phagosomes", *Current Research in Microbial Sciences*, 10:100604. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.crmicr.2026.100604>.

Hernández-Rivera, M. P., A. Ramírez-Ramírez, A. Chifñas-Pérez, A. Monroy-Ostria, M. E. Cancino-Díaz y O. Hernández-Montes (2016), "Nramp1 Polymorphisms like Susceptibility Marker in Mexican Focus of Cutaneous Leishmaniasis", *BioMed Research International*, 1-8. Disponible en: <https://doi.org/10.1155/2016/7951285>.

Niño-Moreno, P., E. Turrubiarres-Martínez, B. Ocegüera-Maldonado, N. Baltazar-Benítez, C. Negrete-González *et al.* (2017), "The Role of Nramp1/SLC11A1 Gene Variant D543N (1730G/A) in the Genetic Susceptibility to Develop Rheumatoid Arthritis in the Mexican Mestizo Population", *Revista de Investigación Clínica*, 69(1):5-10. Disponible en: <https://doi.org/10.24875/RIC.17002152>.

Salinas-Delgado, Y., C. Galaviz-Hernández, R. García Toral, C. A. Ávila Rejón, M. A. Reyes-López *et al.* (2015), "The D543N polymorphism of the SLC11A1/NRAMP1 gene is associated with treatment failure in male patients with pulmonary tuberculosis", *Drug Metabolism and Personalized Therapy*, 30(3):211-214. Disponible en: <https://doi.org/10.1515/dmpt-2015-0019>.

Lecturas recomendadas

Crans, D. C. y K. Kostenkova (2020), "Open questions on the biological roles of first-row transition metals", *Communications Chemistry*, 3:104. Disponible en: <https://www.nature.com/articles/s42004-020-00341-w>, consultado el 25 de julio de 2026.

Danieles, P. (2023), "Got a Cold? Here's How Your Immune System Is Fighting It", *National Geographic* [en línea]. Disponible en: https://www.nationalgeographic.com/premium/article/cold-sick-immune-system-response?utm_source=chatgpt.com, consultado el 25 de julio de 2026.

Hospedero

Organismo que alberga a otro ser vivo en su interior o lo porta sobre sí.

Mario E. Boijseauneau-López, Antonio Pola y Hugo Sereno

¿Qué secretos guardan las rocas?

Resumen

Las rocas guardan en sus minerales, texturas y estructuras la historia de los procesos que las formaron. Estudiar sus propiedades físicas, químicas y mecánicas permite reconstruir esa historia y aplicar el conocimiento en la prevención de riesgos, la gestión del agua, la planificación territorial y el diseño de infraestructura.

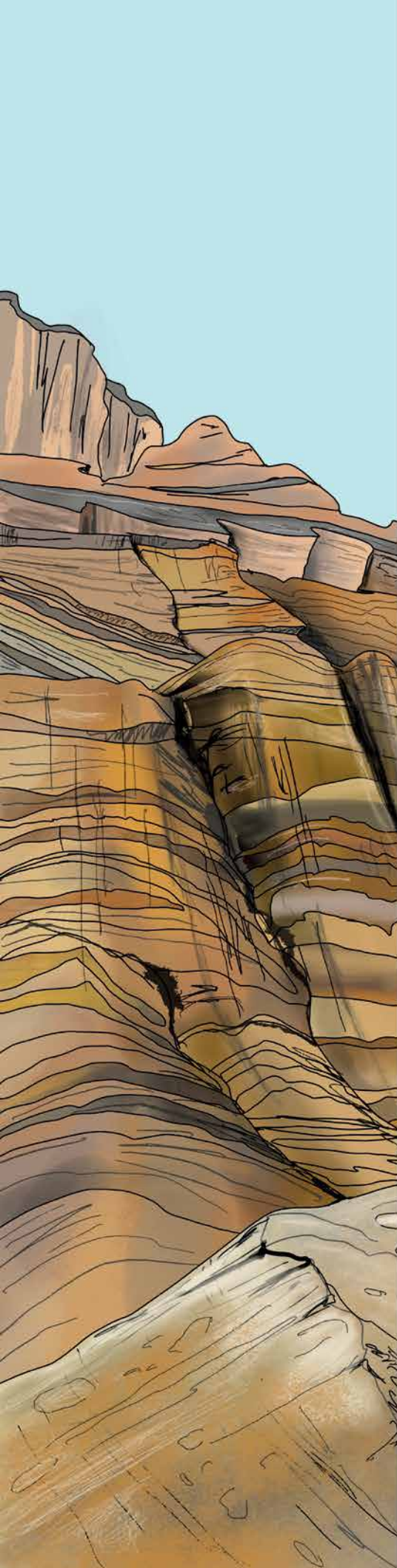
Abstract

Rocks preserve in their minerals, textures and structures the history of the processes that formed them. Studying their physical, chemical and mechanical properties helps reconstruct that history and apply this knowledge to risk prevention, water management, land-use planning and infrastructure design.

Introducción

Las rocas son materiales sólidos formados por la unión natural de uno o varios minerales, material vítreo o fragmentos de otras rocas. Estos minerales, como el cuarzo, la calcita, la plagioclasa o el olivino, tienen estructuras y composiciones químicas específicas que les otorgan distintas propiedades: dureza, color y resistencia, por ejemplo. Las rocas constituyen la mayor parte de la corteza terrestre; es decir, forman las montañas, valles, llanuras y fondos oceánicos. Aunque a simple vista parecen inertes y permanentes, las rocas son el resultado de procesos dinámicos que ocurren tanto en la superficie como en el interior del planeta, y pueden cambiar a lo largo del tiempo.

Existen tres grandes tipos de rocas, clasificados según su origen: las ígneas, que se forman, por ejemplo, cuando el magma (roca fundida) se enfría y solidifica; las sedimentarias, que resultan de la acumulación, compactación y cementación de fragmentos de otras rocas, fósiles o minerales transportados por el viento, el agua o el hielo; y las metamórficas, que se generan cuando una roca ya existente es transformada por la presión y la temperatura sin llegar a fundirse. Cada tipo de roca cuenta una historia distinta: algunas nacen en lo profundo del manto



terrestre, otras en antiguos lechos marinos, y otras más en zonas montañosas donde las placas tectónicas colisionan y forman continentes. Estudiarlas nos permite reconstruir la historia del planeta y entender mejor los procesos naturales que lo moldean.

Justamente por su diversidad de orígenes y transformaciones, las rocas presentan una gran variedad de propiedades que las hacen únicas. Algunas son más porosas o livianas; otras, extremadamente resistentes o químicamente reactivas. Estas diferencias no son casuales: están relacionadas con los procesos geológicos que las formaron, como la presión, la temperatura, el tiempo de enfriamiento o los minerales presentes en su composición. Así, las rocas no sólo nos hablan del pasado de la Tierra, sino que *el uso adecuado de dichas propiedades* nos puede ayudar a enfrentar los retos del presente y futuro.

Entender las propiedades físicas, químicas y mecánicas de las rocas es clave para tomar decisiones que impactan nuestra vida diaria. Permite elegir materiales seguros para obras, identificar riesgos geológicos,

ubicar acuíferos y zonas con potencial geotérmico, y detectar elementos que afectan la calidad del agua, el aire o el suelo. Este artículo muestra cómo ese conocimiento mejora nuestra relación con el entorno.

■ **Propiedades físicas de las rocas: medición, análisis y aplicaciones**

■ Las propiedades físicas son la base para distinguir unas rocas de otras, ya que nos dan información que nos permite reconocer su origen, su historia geológica y su comportamiento ante distintas condiciones. Características como color, densidad, porosidad, textura o dureza revelan dicha información. El estudio de las propiedades físicas de las rocas comienza en campo, donde se observa la forma de los cuerpos rocosos, la presencia de capas, la orientación de fracturas, la compactación y la porosidad visible, entre otras características clave para interpretar cómo se formó una roca y entender su comportamiento en distintas condiciones ambientales (**Figura 1**). Estas observaciones



Figura 1. Trabajo de campo geológico. Estudiantes observan una exposición rocosa en carretera para identificar capas, fracturas y variaciones en los tipos de roca, claves para interpretar su origen y comportamiento en su entorno natural. Fotografía: Orestes A. de la Rosa Mora.

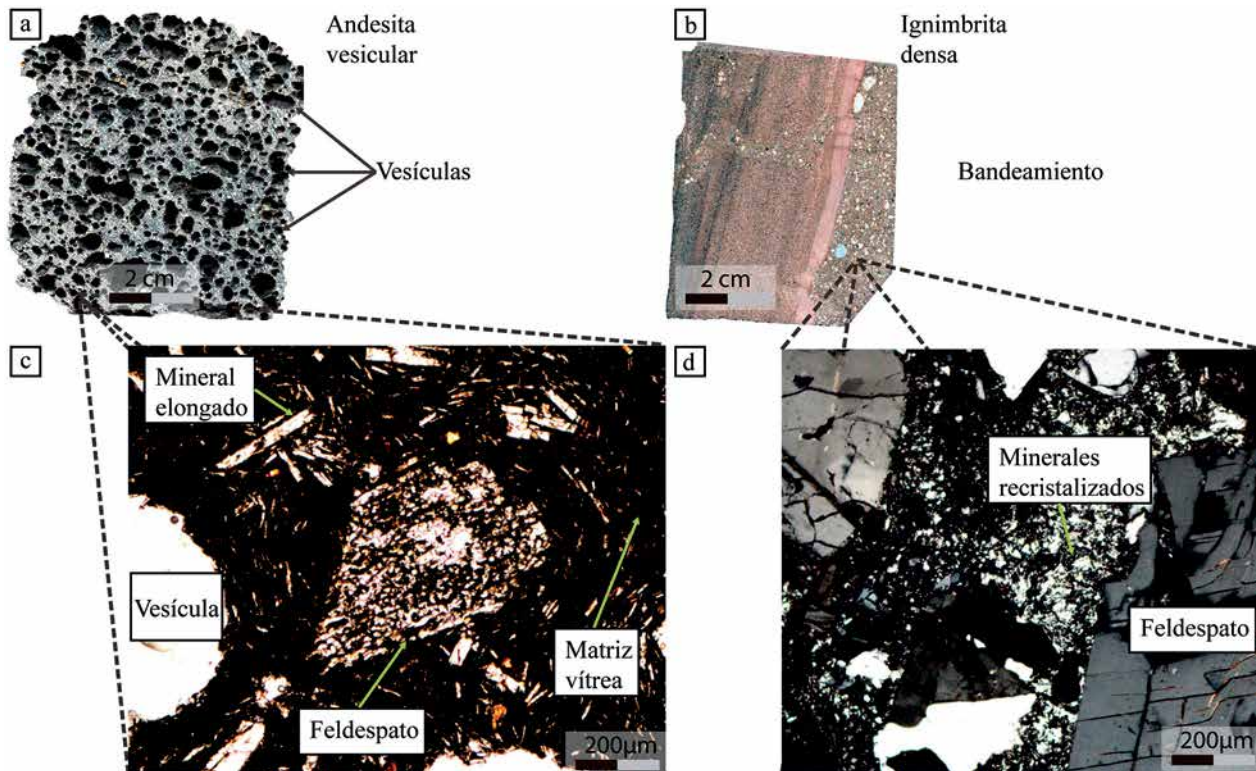


Figura 2. Comparación entre una andesita vesicular y una ignimbrita densa. En las muestras de mano se señalan las vesículas de la andesita (a) y el bandeamiento de la ignimbrita (b). Las microfotografías muestran cristales elongados de feldespatos, vesículas y matriz vítrea en la andesita (c), así como feldespatos y agregados recristalizados de cuarzo en la ignimbrita (d). Estas diferencias reflejan distintos procesos eruptivos y condiciones de enfriamiento.

se complementan en laboratorio, donde se analizan muestras para confirmar y cuantificar sus propiedades bajo condiciones controladas.

Una de las pruebas básicas que se realizan en el laboratorio es la medición de la densidad, lo cual es útil para distinguir rocas ligeras y porosas —como la piedra pómez— de otras más compactas y pesadas —como el basalto o el granito— (Figura 2). Basta con conocer el peso y volumen de la roca, lo cual se puede lograr con métodos simples —por ejemplo, utilizando el principio de Arquímedes— o mediante instrumentos precisos como el **picnómetro de helio**. La densidad también da pistas sobre el origen de las rocas. Las rocas que contienen minerales ricos en elementos metálicos suelen ser más densas que aquellas que no los contienen. Este dato, clave en ingeniería, hidrogeología o petrología, permite, además, estimar otras propiedades como la porosidad, o cuánto espacio vacío hay en su interior.

La porosidad indica cuánto espacio vacío hay en una roca, lo que determina su capacidad para alma-

cenar fluidos como agua, gas o petróleo. Rocas como las areniscas pueden ser muy porosas si sus granos están poco cementados, mientras que otras, como el mármol, son casi impermeables. Esta propiedad se mide saturando una roca con agua o gas, comparando el volumen absorbido con el total, o a través de una tomografía de rayos X computarizada para observar la distribución interna de los poros de las rocas. Pero porosa no siempre significa permeable: la permeabilidad depende de que esos poros estén conectados. Para medir esta propiedad, se hace circular agua o gas a través de una roca en condiciones controladas, utilizando equipos llamados permeámetros, que registran la velocidad del flujo. Estos datos son clave para estudiar acuíferos y recursos hídricos subterráneos.

Además de porosidad y permeabilidad, otras propiedades físicas como la textura, el contenido mineral, el tamaño y la distribución de los granos revelan información sobre el tipo de roca y procesos secundarios que pudieron afectarla. Estas características

◀ **Picnómetro de helio**
Instrumento que mide con gran precisión el volumen y la densidad real de un material. Utiliza helio porque este gas puede penetrar en poros muy pequeños sin reaccionar con la muestra.



pueden observarse en campo con lupas o analizarse en detalle con microscopios petrográficos y electrónicos. La dureza también es clave para clasificar rocas y minerales; se evalúa con la escala de Mohs, que compara la resistencia al rayado, o con métodos más precisos como la dureza Vickers, que mide la marca dejada por una punta de diamante bajo carga controlada.

Conocer estas propiedades físicas no sólo ayuda a entender cómo se formaron las rocas, sino también a usarlas de forma eficiente y sostenible. En la restauración de monumentos de valor histórico se eligen rocas con texturas y resistencias similares a las originales; en vías férreas se prefieren materiales densos y resistentes como el granito o el basalto debido a su alta resistencia al desgaste. Por otro lado, rocas porosas como la piedra pómez se aprovechan en la fabricación de materiales ligeros para la construcción o como abrasivos en productos cosméticos. Comprender estas características nos permite tomar decisiones informadas en ámbitos como el desarrollo de infraestructura, conservación del patrimonio y uso responsable de los recursos geológicos.

 Propiedades químicas y mineralógicas: la identidad invisible de las rocas

Más allá de lo visible, cada roca tiene una composición química y mineralógica que define su compor-

tamiento interno. Esta “identidad invisible” depende de los elementos que la forman, como silicio, calcio, hierro o sodio, y de los minerales que los agrupan, principalmente silicatos. Estas propiedades determinan si una roca es estable o tiende a alterarse, si puede liberar compuestos al agua o al aire, o si actúa como barrera natural. Hay rocas que contienen elementos que pueden liberarse y reaccionar con el medio ambiente. En bajas concentraciones, algunos de estos elementos pueden ser benéficos para la salud, pero en exceso resultan dañinos. Un ejemplo es el elemento flúor. Dicho elemento, en dosis bajas, fortalece los dientes en los seres humanos, pero en exceso causa fluorosis, como ocurre en algunas zonas de San Luis Potosí, donde los acuíferos atraviesan rocas con alto contenido de este elemento.

Para conocer estas propiedades, los geocientíficos usan diversas técnicas de laboratorio. Una de las más comunes es la difracción de rayos X (DRX), que identifica minerales según su estructura interna. También se emplea la fluorescencia de rayos X (FRX) para conocer la composición química total, o la microsonda electrónica, que analiza con precisión la química puntual de un mineral (**Figura 3**). En estudios más avanzados se usa espectrometría de masas, capaz de detectar elementos traza o medir distintos isótopos de un mismo átomo. Estas herramientas revelan el tipo, origen y evolución de las rocas.

Conocer la composición química y mineralógica de las rocas es clave para evaluar yacimientos minerales, ayudar en la prevención y mitigación de riesgos ambientales, seleccionar materiales para la construcción o incluso prevenir problemas de salud pública. En este sentido, conocer la química de las rocas no sólo permite entender el pasado geológico, sino también tomar decisiones informadas para el desarrollo presente y futuro de la civilización.

 Propiedades mecánicas de las rocas: resistencia y deformación

Las propiedades mecánicas nos indican si una roca puede resistir presión sin romperse o si se fractura con facilidad. Su respuesta ante fuerzas externas, como el peso de un edificio, la gravedad en una

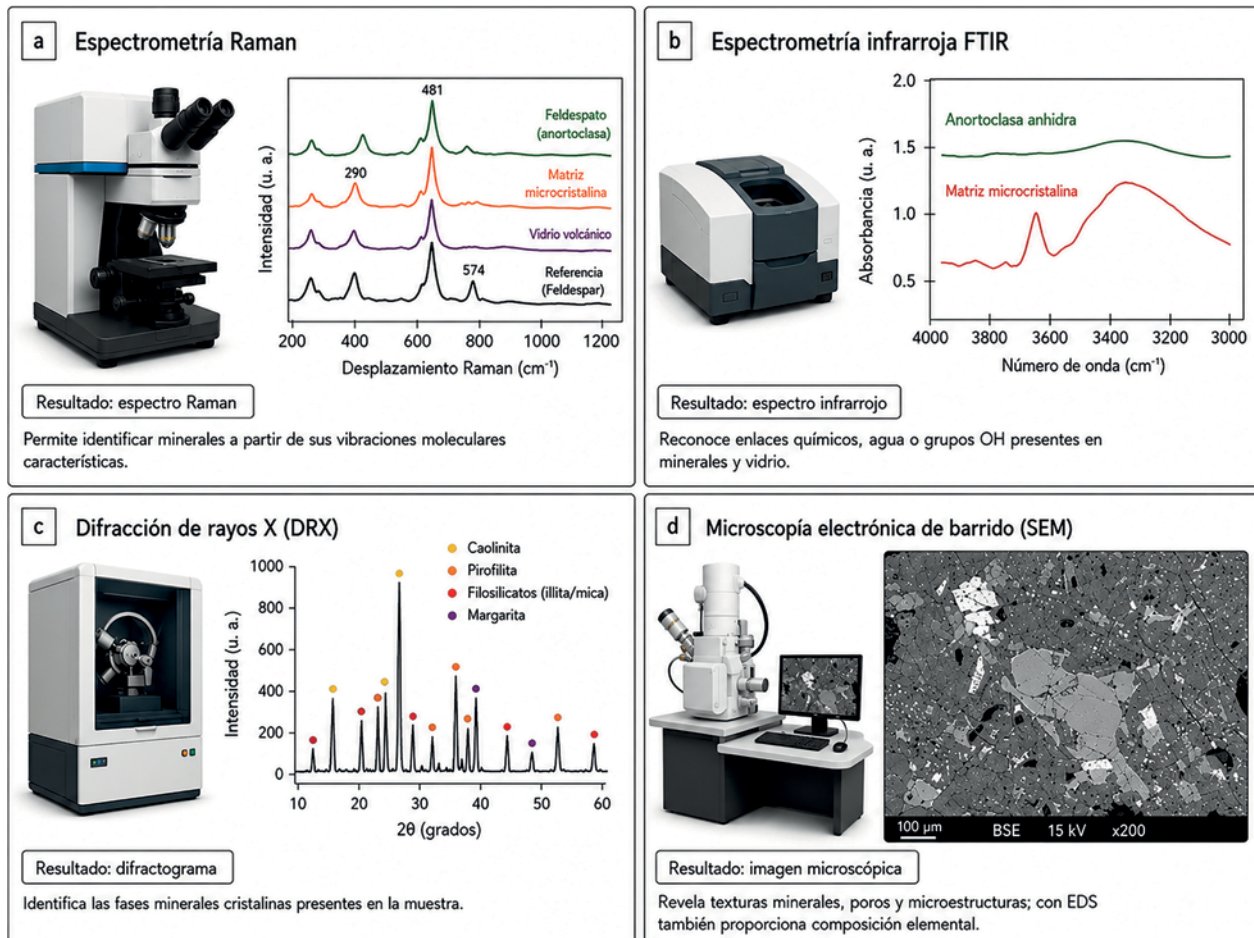


Figura 3. Técnicas empleadas para estudiar la composición y estructura de las rocas: *a*/espectroscopía Raman, que ayuda a identificar minerales mediante sus vibraciones características; *b*/espectroscopía FTIR, utilizada para reconocer enlaces químicos, agua y grupos hidroxilo; *c*/difracción de rayos X, que identifica las fases minerales cristalinas; y *d*/microscopía electrónica de barrido, que permite observar minerales, poros y microfracturas a gran aumento. Cuando el microscopio está acoplado a un detector EDS, también puede determinarse la composición elemental.

ladera o un sismo, depende de su comportamiento mecánico, determinado por características físicas, químicas y mineralógicas como textura, porosidad, composición y organización interna (fábrica). Estas propiedades definen si una roca se deforma lentamente o se rompe abruptamente. Comprender este comportamiento es clave para construir sobre suelo firme, excavar con seguridad o prevenir fallas estructurales ante fenómenos naturales.

Las propiedades mecánicas incluyen la resistencia a compresión, tracción, flexión y **cizalladura**, así como la forma en que una roca se deforma antes de romperse. Dos rocas con igual resistencia pueden comportarse de manera muy distinta ante la aplicación de una carga, una puede fracturarse lentamente y otra de forma súbita. Estas propiedades reflejan

cómo responden las rocas a esfuerzos naturales. Por ejemplo, la compresión es común en regiones donde se forman montañas; la tracción puede generar la apertura de mares o cuencas oceánicas, y la cizalladura ocurre en zonas de falla activa como la de San Andrés, donde grandes bloques de la corteza se deslizan lateralmente.

Para conocer cómo se comportan las rocas ante distintas fuerzas, se realizan ensayos en laboratorio según el tipo de esfuerzo esperado. Si se quiere simular la carga de un edificio, se aplica una prueba de compresión uniaxial: se ejerce presión vertical sobre un cilindro de roca hasta que se fractura. Para condiciones más complejas, como las del subsuelo, se usan ensayos triaxiales (**Figura 4**). También existen pruebas de carga puntual que se pueden aplicar

Cizalladura

Esfuerzo producido por fuerzas paralelas y opuestas que hacen que algunas partes de una roca se deslicen respecto de otras. Puede causar deformación o fracturas.

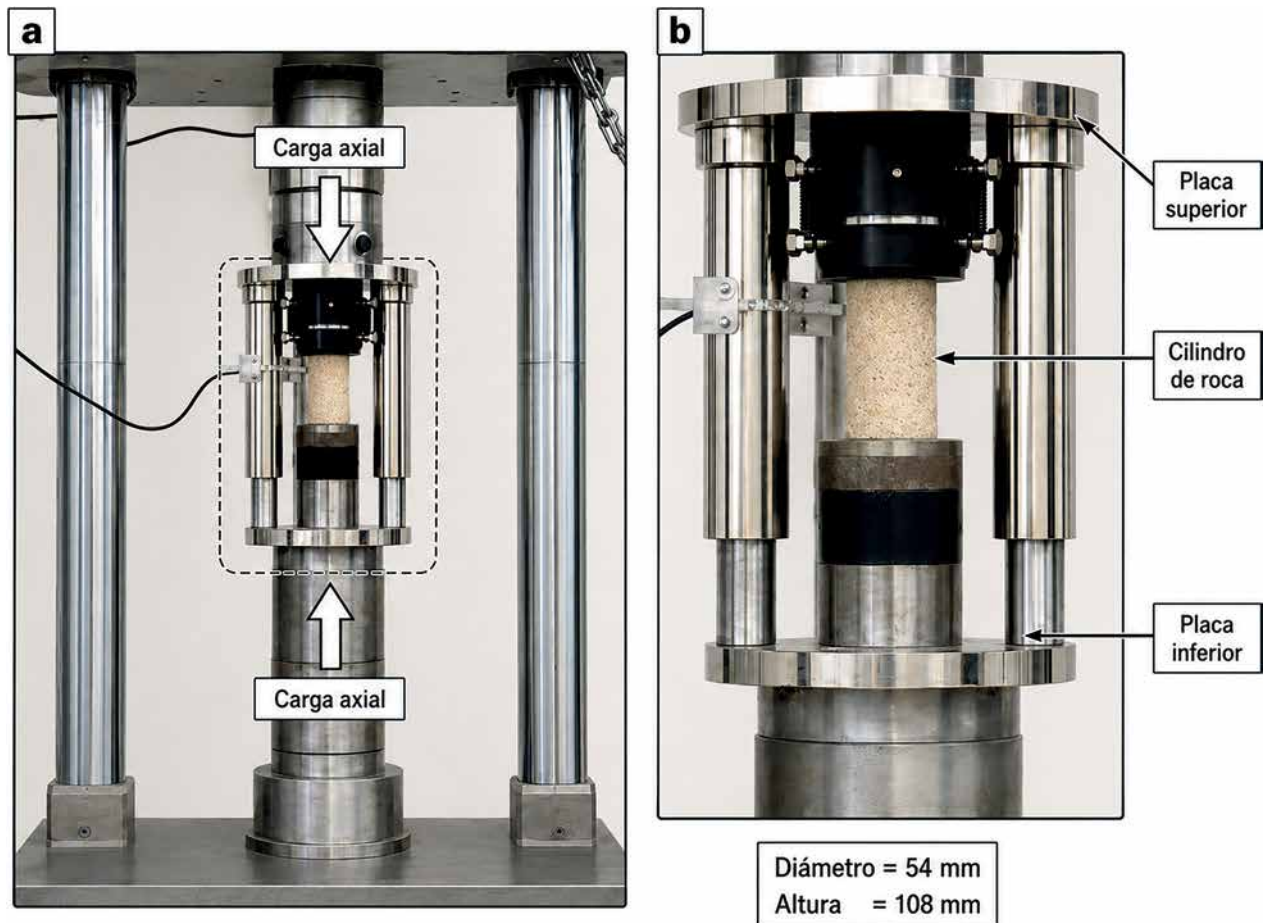


Figura 4. Ensayo de compresión uniaxial. a) Equipo utilizado para aplicar una carga vertical controlada. b) Detalle del cilindro de roca, de 54 mm de diámetro y 108 mm de altura, colocado entre dos placas metálicas. Las flechas indican la dirección de la carga aplicada hasta que la muestra se deforma o fractura, lo que permite determinar su resistencia a la compresión.

Planos de foliación

Superficies paralelas presentes en algunas rocas metamórficas, formadas por la alineación de minerales bajo presión. Estos planos pueden actuar como zonas de debilidad.

directamente en campo. Además, estos resultados se complementan con el análisis de estructuras como fallas, pliegues o fracturas, que revelan cómo ha respondido la roca a los esfuerzos naturales a lo largo del tiempo.

Conocer cómo responden las rocas ante esfuerzos no es sólo un ejercicio de laboratorio, sino una herramienta clave para construir de forma segura. En ingeniería civil, este conocimiento permite saber si una roca soportará el peso de un puente, una presa o un edificio sin fracturarse. También ayuda a evaluar la estabilidad del terreno frente a sismos o excavaciones profundas. En túneles y taludes, anticipa zonas con riesgo de deslizamientos. Aunque una roca parezca sólida, su comportamiento depende de la orientación de sus minerales o la estructura de sus poros. En pizarras y esquistos, por

ejemplo, los **planos de foliación** pueden facilitar fracturas si no se consideran al excavar. En cambio, rocas como el granito, más homogéneas, ofrecen mayor estabilidad. Conocer estas diferencias evita accidentes, optimiza recursos y reduce costos.

Rocas que sostienen el futuro: entre la ciencia, el riesgo y la planificación

Conocer las propiedades físicas, químicas y mecánicas de las rocas es un ejercicio académico y una necesidad estratégica en un mundo presionado por el crecimiento urbano, el cambio climático y la explotación de recursos. En regiones como Islandia o las Islas Canarias, donde conviven la actividad volcánica y los asentamientos humanos, este conocimiento ha permitido desarrollar zonificaciones de riesgo,



Figura 5. Aplicaciones sociales del estudio de las rocas. El análisis de sus propiedades permite planear ciudades resilientes, diseñar rutas de evacuación, construir infraestructura segura y gestionar el agua en territorios complejos como los de Islandia o las Islas Canarias. Imagen generada digitalmente con fines ilustrativos.

rutas de evacuación, normativas de construcción y estrategias para aprovechar la energía geotérmica con bajo impacto ambiental. Estos avances no son obra de una sola disciplina, sino de equipos integrados por geocientíficos, ingenieros, urbanistas y autoridades

que, al estudiar las rocas en profundidad, diseñan soluciones concretas y sostenibles (**Figura 5**). Los terremotos que afectaron Venezuela en junio de 2026 recuerdan que las consecuencias de un fenómeno natural también dependen de las características del terreno, la seguridad de la infraestructura y la capacidad de las comunidades para anticipar y gestionar los riesgos. Más allá de revelar la historia de la Tierra, las propiedades de las rocas ofrecen conocimientos esenciales para transformar la manera en que habitamos, cuidamos y planificamos el territorio.

Mario E. Boijseauneau-López

Escuela Nacional de Estudios Superiores, Unidad Morelia,
Universidad Nacional Autónoma de México.

mboijseauneau@enesmorelia.unam.mx

Antonio Pola

Escuela Nacional de Estudios Superiores, Unidad Morelia,
Universidad Nacional Autónoma de México.

apola@enesmorelia.unam.mx

Hugo Sereno

Escuela Nacional de Estudios Superiores, Unidad Morelia,
Universidad Nacional Autónoma de México.

hugoivansereno@gmail.com

Iris Guadalupe Vizcarra García y Magdalena Elizabeth Bergés Tiznado

Emergencia ambiental: el impacto de la minería en la salud humana y los ecosistemas

Resumen

En México la minería representa aproximadamente el 8.6 % del producto interno bruto industrial, lo que la convierte en uno de los principales motores económicos del país. Sin embargo, puede tener impactos negativos en la salud humana y en los ecosistemas, al afectar la calidad del agua y del suelo, así como la biodiversidad, si no se realiza adecuadamente.

Abstract

The mining industry in Mexico represents approximately 8.6 % of the industrial gross domestic product, making it one of the main economic activities in the country. However, if mining development is not adequate and well controlled, it could have negative impacts in human and environmental health by affecting water and soil quality as well as biodiversity.

Efectos ambientales de la minería

El agua es un recurso vital para la existencia de la vida en nuestro planeta y su calidad es crucial tanto para la salud humana como para el equilibrio de los ecosistemas. En este contexto, la minería se presenta como una de las actividades industriales con mayor impacto ambiental (Joseph, 2025). Durante el proceso de extracción y transformación de minerales, los cuerpos de agua pueden verse afectados por los lixiviados (líquidos que se generan cuando el agua entra en contacto con materiales mineros y arrastra sustancias disueltas, incluidos elementos potencialmente tóxicos), así como por las emisiones generadas en las etapas de trituración, lavado, corrosión y separación química (Joseph, 2025).

Los residuos de estos procesos suelen almacenarse en grandes estanques o represas, conocidos como presas de jales mineros, que son los desechos generados durante el procesamiento de minerales una vez que se ha extraído el recurso de



Estiaje ▶
Periodo del año en el que un río, arroyo o cuerpo de agua presenta su menor caudal debido a la disminución de las precipitaciones.

interés; si estas estructuras fallan o no están apropiadamente construidas, pueden liberar grandes volúmenes de contaminantes (Páez-Osuna y cols., 2022; Mulenga, 2022). Esto puede ocurrir durante la temporada de lluvias, cuando el agua llega a arrastrar contaminantes y sedimentos hacia ríos o lagos cercanos. Además, en época de **estiaje**, los jales expuestos pueden erosionarse debido al viento, lo que lleva partículas finas hacia cuerpos de agua cercanos (Mulenga, 2022).

Una vez que estos residuos llegan a los ríos u otros cuerpos de agua, el pH puede disminuir debido a la formación de aguas ácidas generadas por la oxidación de minerales sulfurados presentes en los residuos mineros o en rocas expuestas durante la minería. Por ejemplo, cuando los minerales que contienen azufre, como la piritita, se exponen al aire y al agua, se oxidan y generan ácido sulfúrico. Esta agua ácida puede movilizar compuestos químicos potencialmente tóxicos que contienen elementos como plomo, mercurio y cobre del suelo y las rocas (Joseph, 2025).

Estos compuestos químicos suelen ser, en su mayoría, persistentes, no biodegradables y bioacumulables, y una vez disueltos en las aguas superficiales son biodisponibles para los organismos, que pueden absorberlos tanto de su alimento como del agua que pasa a través de sus branquias, en el caso de los peces (Joseph, 2025). Además, la actividad minera puede provocar un considerable arrastre de sedimentos hacia los cuerpos de agua y alterar su flujo natural por sedimentación excesiva. Asimismo, el sedimento suspendido puede incrementar la turbidez del agua, lo que dificulta que se lleve a cabo la fotosíntesis y perjudica a organismos que dependen de condiciones específicas para sobrevivir. Una vez que los sedimentos se depositan en el fondo, pueden actuar como reservorios de compuestos potencialmente tóxicos, acumulándolos y liberándolos nuevamente a la columna de agua cuando ocurren cambios en las condiciones fisicoquímicas del medio (Lyautey y cols., 2021). Esta dinámica favorece la exposición prolongada de los organismos bentónicos y puede alterar



la estructura y funcionamiento de las comunidades biológicas asociadas a los sedimentos. Entre los organismos más afectados, se encuentran las comunidades bacterianas, ya que la acumulación de estos compuestos puede reducir la diversidad microbiana y favorecer el desarrollo de microorganismos más tolerantes a la contaminación. Estas alteraciones afectan procesos esenciales para el funcionamiento de los ecosistemas acuáticos, como el reciclaje de nutrientes y la descomposición de materia orgánica, además de influir en la movilidad y disponibilidad de los contaminantes en el ambiente (Lyautey y cols., 2021).

Al igual que el agua, el suelo es un recurso esencial para los seres humanos y se considera saludable cuando tiene la capacidad de sustentar de manera continua la vida de plantas, animales y seres humanos (Mulenga, 2022). A pesar de su importancia, es un recurso no renovable cuya degradación ha aumentado en los últimos años. La minería, en particular, es una de las actividades que más contribuye a esta degradación afectando la calidad del suelo y provocando pérdida de biodiversidad (Mulenga, 2022).

Independientemente del método utilizado, los desechos mineros pueden ser ácidos y contener altas concentraciones de elementos potencialmente tóxicos. Esto puede provocar cambios en las propiedades físicoquímicas del suelo, así como la acumulación de compuestos químicos que contienen elementos potencialmente tóxicos, lo que afecta su fertilidad y a los microorganismos que habitan en él. Estos microorganismos son esenciales para la descomposición de la materia orgánica del suelo y cualquier disminución en su diversidad o abundancia puede afectar negativamente la absorción de nutrientes por parte de las plantas (Mulenga, 2022).

Uno de los efectos negativos más significativos de la minería en el medio ambiente es la deforestación. Esta actividad a menudo implica la limpieza de grandes áreas de terrenos, lo que conlleva la eliminación de árboles y vegetación (Joseph, 2025). Como resultado, se produce la pérdida de diversas especies de plantas y animales, muchas de las cuales pueden ser endémicas de la zona, lo que tiene consecuencias

ecológicas a largo plazo. Además, la deforestación causada por la minería libera el carbono almacenado, contribuyendo al cambio climático (Mulenga, 2022; Joseph, 2025).

En relación con lo mencionado anteriormente, el 21 de enero de 2013 se produjo una falla en la **presa de relaves** de la planta de procesamiento El Herrero, ubicada en la región minera de Santa María de Otáez, en Durango. Esta planta tiene una capacidad de producción de 1 500 toneladas por día, y el depósito corresponde a un tipo de veta caracterizado por la presencia de minerales como oro, plata, plomo, zinc y cobre. Durante la falla, aproximadamente 300 000 toneladas de desechos fueron liberadas al río Los Remedios, desde donde el material fue transportado por el río San Lorenzo hasta la presa conocida como El Comedero, en Sinaloa. Tres meses después, los pescadores de la presa reportaron un evento masivo de mortalidad de peces, al observar ejemplares en malas condiciones y con movilidad reducida. Los peces fueron analizados y mostraron altas concentraciones de arsénico, cadmio, cobre, mercurio, selenio y zinc en el hígado, lo que indicó que estuvieron expuestos a altas concentraciones de estos elementos. Se concluyó que la mortalidad fue probablemente causada por el efecto combinado de los seis elementos analizados, así como de otros residuos presentes en los relaves mineros (Páez-Osuna y cols., 2022). Este desastre ecológico provocó una drástica caída en la producción anual de pescado, que pasó de 1 500 toneladas a sólo 80-85 toneladas, lo que generó graves problemas económicos para los casi 300 pescadores que dependían de la presa para su sustento. Casos como éste ilustran cómo los elementos potencialmente tóxicos liberados por la actividad minera pueden dispersarse a través del aire, el agua y el suelo, incorporarse a los ecosistemas y, finalmente, llegar a las poblaciones humanas mediante distintas vías de exposición (**Figura 1**).

Presa de relaves

Obra de infraestructura construida para almacenar o represar los relaves, colas y desechos acuosos originados durante el beneficio de los minerales.

Impactos negativos en la salud humana

La actividad minera y la geología local pueden concentrar compuestos químicos potencialmente tóxicos en agua y suelo, exponiendo inevitablemente a las

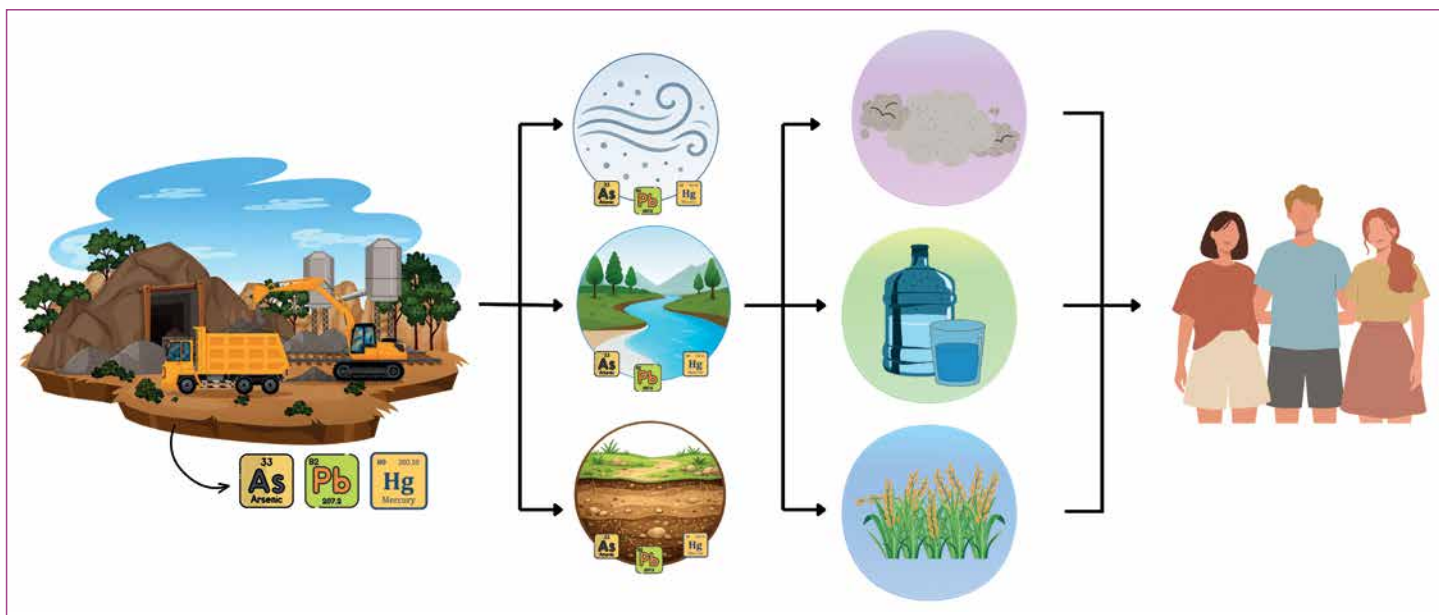


Figura 1. Rutas de dispersión y exposición a elementos potencialmente tóxicos asociados a la actividad minera. Ilustración de creación propia, elaborada en Canva.

Metaloides
Elementos químicos con propiedades intermedias entre los metales y los no metales.

personas a derivados de metales y **metaloides**. Esto provoca efectos tóxicos agudos y crónicos que dañan diversos órganos del cuerpo (**Figura 2**). Elementos como el arsénico (As), el plomo (Pb) y el mercurio (Hg) están clasificados como de alta prioridad en el agua por la Agencia de Sustancias Tóxicas y Registro de Enfermedades.

El plomo es un metal presente de forma natural en la corteza terrestre. Cuando algunos de sus compuestos se liberan al aire, pueden viajar largas distancias antes de depositarse en el suelo, donde se adhieren a sus partículas y pueden penetrar y contaminar los acuíferos subterráneos. La exposición al plomo es peligrosa para los niños, ya que puede dañar el sistema nervioso central y causar coma, convulsiones e incluso la muerte. Los sobrevivientes de intoxicaciones graves pueden sufrir discapacidades intelectuales permanentes. Incluso en niveles bajos, el plomo afecta el desarrollo cerebral, reduce el coeficiente intelectual y altera el comportamiento. No existe un nivel seguro de plomo en sangre, incluso 3.5 microgramos de plomo por cada decilitro de sangre pueden ser dañinos (OMS, 2024).

El arsénico encabeza la lista de sustancias prioritarias del Departamento de Salud y Servicios Hu-

manos de Estados Unidos, dado que fue el primer elemento químico cuyas propiedades cancerígenas se reconocieron. Este elemento natural está ampliamente distribuido en el medio ambiente, y su forma inorgánica es la más tóxica (OMS, 2022).

La intoxicación aguda por arsénico puede causar síntomas inmediatos como vómitos, dolor abdominal y diarrea, seguidos de entumecimiento y hormigueo en las extremidades, calambres musculares y, en casos extremos, la muerte. Por otro lado, los primeros signos de la exposición prolongada a altos niveles de arsénico inorgánico, como la que ocurre por el consumo de agua y alimentos contaminados, suelen afectar la piel. Entre los síntomas más comunes se encuentran cambios en la pigmentación, lesiones cutáneas y la aparición de durezas y callosidades en las palmas de las manos y las plantas de los pies (hiperqueratosis), efectos que suelen desarrollarse tras una exposición mínima de aproximadamente cinco años y que pueden ser precursores de cáncer de piel. Además de este tipo de cáncer, la exposición prolongada al arsénico también está asociada con un mayor riesgo de cáncer de vejiga y de pulmón (OMS, 2022).

El mercurio es liberado al medio ambiente por actividades humanas como la quema de combusti-

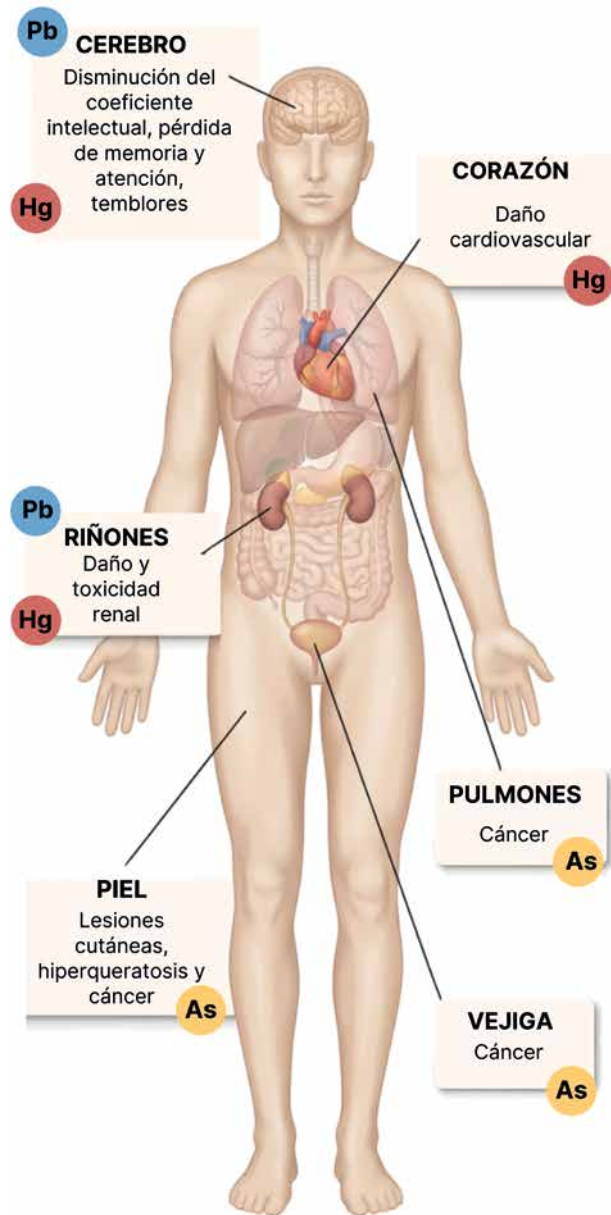


Figura 2. Órganos afectados por la exposición a elementos potencialmente tóxicos asociados a la actividad minera. Ilustración de creación propia, elaborada en Canva.

bles fósiles, el refinamiento de metales preciosos y la disposición de desechos, así como por procesos naturales: la actividad volcánica y la erosión de las rocas, por ejemplo (Gaioli y cols., 2012).

En el agua y en el suelo, bacterias especializadas transforman el mercurio elemental en metilmercurio, una de las formas más tóxicas del metal. Esta conversión incrementa su solubilidad en grasas, lo que facilita su acumulación a lo largo de la **cadena**

trófica animal. Como resultado, la principal fuente de exposición al mercurio para los seres humanos proviene de la dieta, especialmente a través del consumo de peces y mariscos contaminados. La exposición aguda al metilmercurio puede provocar efectos neurológicos graves, como alteraciones visuales, temblores, espasticidad muscular e incluso la muerte. Por otro lado, la exposición crónica está asociada con alteraciones cerebrales y funcionales,

Cadena trófica animal

Secuencia de organismos en la que la energía y los nutrientes se transfieren mediante la alimentación, desde los productores hasta los consumidores. Los contaminantes pueden bioacumularse y biomagnificarse a lo largo de esta cadena.

disminución del coeficiente intelectual y un mayor riesgo de enfermedad cardiovascular, entre otros efectos perjudiciales para la salud (Gaioli y cols., 2012).

Regulación y normativas en la minería

Se han establecido diversas normas oficiales para regular aspectos específicos de la minería. Una de las más importantes es la Norma Oficial Mexicana NOM-141-SEMARNAT-2003, que establece el procedimiento para caracterizar los jales, así como las especificaciones y criterios para la caracterización y preparación del sitio, proyecto, construcción, operación y postoperación de las presas de jales. A grandes rasgos, en esta norma se definen los requisitos técnicos para la preparación del terreno donde se ubicará la presa de jales, lo que incluye la necesidad de realizar estudios geotécnicos, hidrogeológicos y de impacto ambiental. También regula los criterios técnicos y de seguridad para el diseño de la construcción de la

presa de jales, con énfasis en su estabilidad estructural y el control de filtraciones y la prevención de la erosión. Igualmente, establece las condiciones para la correcta operación de las presas, que abarcan la vigilancia constante del comportamiento de los jales, el monitoreo de condiciones ambientales y el control de posibles riesgos. Por último, incluye las acciones necesarias para el cierre y desmantelamiento de las presas de jales una vez concluida la actividad minera, lo que implica la estabilización de los jales, la restauración del sitio y el manejo adecuado de los recursos.

Desafortunadamente, a pesar de la existencia de la normativa, la frecuencia de derrames asociados con relaves mineros y fallas de represas en la región del golfo de California es alta. Tan sólo entre 2013 y 2021 se han producido al menos nueve accidentes de diferente magnitud (10800-300000 m³) (Páez-Osuna y cols., 2022). Este contraste entre la normativa existente y su aplicación deficiente refleja los



Foto de Laura Arvizu, CCMSS.

desafíos que enfrenta la minería en México, donde factores sociales, la falta de recursos para supervisión y la presión de los intereses económicos de grandes corporaciones obstaculizan la correcta implementación de las leyes.

■ Conclusiones y perspectivas

■ La minería es fundamental para la economía de México, pero puede generar impactos negativos en la salud humana y los ecosistemas. Además de fortalecer el cumplimiento de la normativa vigente, es necesario promover prácticas más sostenibles que reduzcan la contaminación, protejan la biodiversidad y preserven procesos ecológicos esenciales. Sólo mediante una regulación efectiva y una gestión responsable será posible equilibrar el desarrollo económico con la protección ambiental y la salud pública.

Iris Guadalupe Vizcarra García

Posgrado en Ciencias del Mar y Limnología, Universidad Nacional Autónoma de México.

vizcarrairis02@gmail.com

Magdalena Elizabeth Bergés Tiznado

Universidad Politécnica de Sinaloa.

mberges@upsin.edu.mx

Lecturas recomendadas

- Gaioli, M., D. Amoedo y D. González (2012), "Impacto del mercurio sobre la salud humana y el ambiente", *Archivos Argentinos de Pediatría*, 110(3):259-264. Disponible en: <https://www.sap.org.ar/docs/publicaciones/archivosarg/2012/v110n3a18.pdf>, consultado el 7 de julio de 2026.
- Joseph, R. (2025), "Environmental issues in mining: a comprehensive review of challenges and strategies for mitigation and rehabilitation", *Revista Minelot – Mining Review*, 31(3):51-71. Disponible en: <https://reference-global.com/download/article/10.2478/minrv-2025-0029.pdf>, consultado el 7 de julio de 2026.
- Lyautey, E., C. Bonnineau, P. Billard, J. L. Loizeau, E. Naffrechoux *et al.* (2021), "Diversity, functions and antibiotic resistance of sediment microbial communities from Lake Geneva are driven by the spatial distribution of anthropogenic contamination", *Frontiers in Microbiology*, 12:738629. Disponible en: <https://doi.org/10.3389/fmicb.2021.738629>.
- Mulenga, C. (2022), "Soil governance and the control of mining pollution in Zambia", *Soil Security*, 6:100039. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.soisec.2022.100039>.
- OMS (2022), "Arsénico", Organización Mundial de la Salud. Disponible en: <https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/arsenic>, consultado el 7 de julio de 2026.
- OMS (2024), "Intoxicación por plomo", Organización Mundial de la Salud. Disponible en: <https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/lead-poisoning-and-health>, consultado el 7 de julio de 2026.
- Páez-Osuna, F., M. E. Bergés-Tiznado, M. G. Fregoso-López, G. Valencia-Castañeda, J. A. León-Cañedo *et al.* (2022), "High accumulation of metals and metalloids in the liver of the blue tilapia (*Oreochromis aureus*) during a massive mortality event induced by a mine tailing spill", *Environmental Geochemistry and Health*, 45(6):3155-3169. Disponible en: <https://doi.org/10.1007/s10653-022-01399-2>.

Salvador Sánchez-Carrillo, David G. Angeler y Miguel Álvarez-Cobelas



Umbrales e incertidumbre: claves para entender la actual crisis ambiental

Resumen

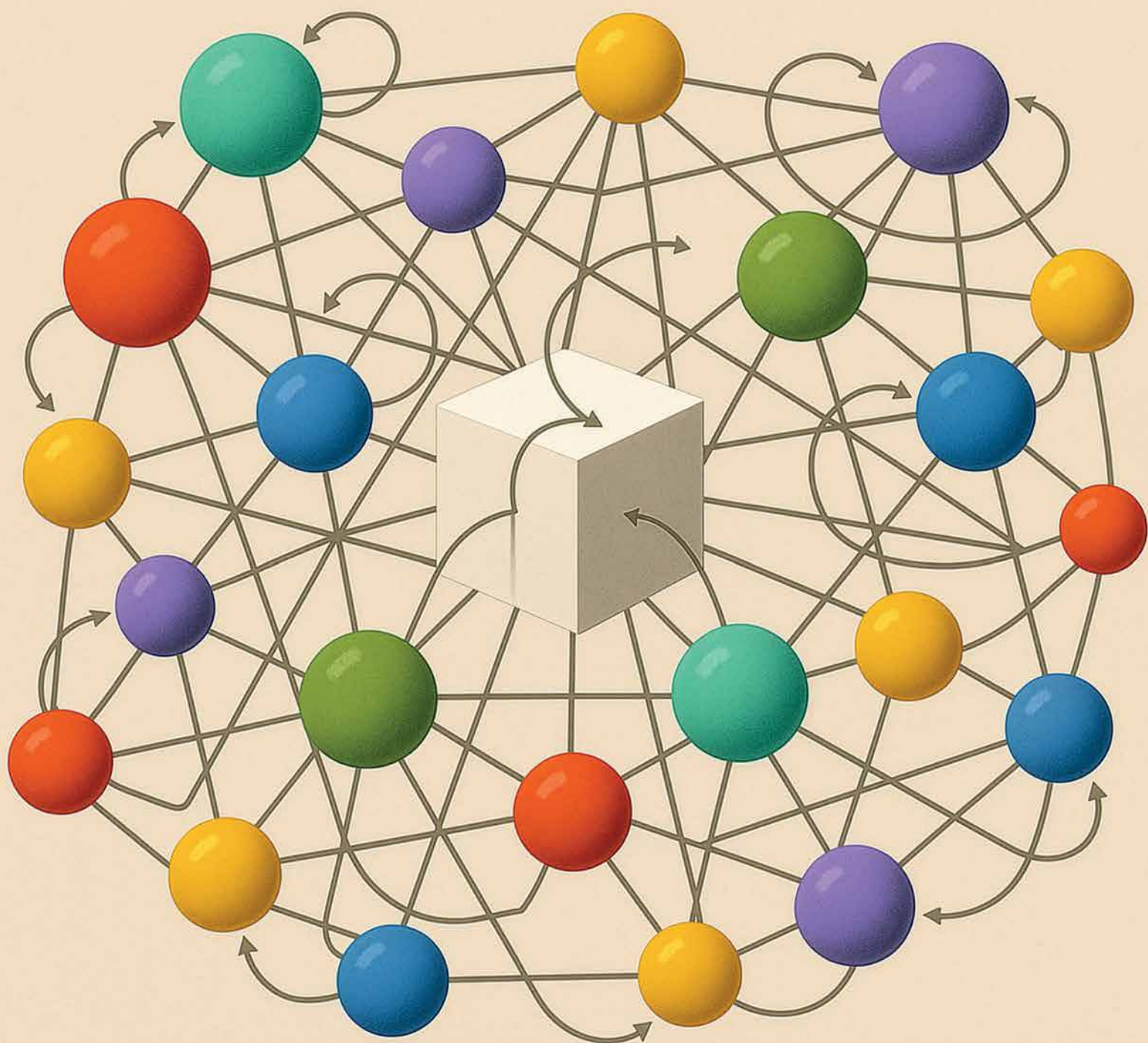
Necesitamos repensar cómo entendemos y manejamos la naturaleza. Los ecosistemas no responden a los cambios ambientales de forma gradual ni predecible: pueden cruzar umbrales, cambiar bruscamente y reorganizarse a través de múltiples interacciones. Para conservarlos, es necesario asumir que la incertidumbre forma parte de su funcionamiento y adaptar nuestras decisiones a ella. Esto exige una ciencia ecológica capaz de integrar la complejidad del mundo natural y de orientar formas de actuación más flexibles y realistas.

Abstract

We need to rethink how we understand and manage nature. Ecosystems do not respond to environmental change in a gradual or predictable way: they can cross thresholds, shift abruptly, and reorganize through multiple interactions. To conserve them, it is necessary to recognize that uncertainty is an inherent part of how they function and to adapt our decisions accordingly. This requires an ecological science capable of integrating the complexity of the natural world and guiding more flexible and realistic ways of action.

Introducción

En la naturaleza, los cambios rara vez son suaves o proporcionales. Ecosistemas aparentemente estables pueden transformarse de forma abrupta tras perturbaciones muy pequeñas. Fenómenos como el colapso de una población de tortugas, las floraciones de algas en la costa o los cambios repentinos en la transparencia de un lago ilustran lo que llamamos procesos no lineales: la respuesta del ecosistema no es proporcional a la perturbación (Scheffer y cols., 2001; Hastings y cols., 2018).



Umbral ▶
Punto crítico a partir del cual un ecosistema cambia bruscamente de un estado a otro, en vez de responder de forma gradual.

Durante gran parte del siglo xx, la ecología se apoyó en modelos lineales, asumiendo que el comportamiento de las poblaciones y los flujos de materia podía predecirse de forma relativamente sencilla (Levin, 1992). Sin embargo, tanto las observaciones como los modelos más recientes han revelado un panorama mucho más complejo, en el que aparecen retroalimentaciones, **umbrales**, cambios abruptos y estados alternativos. Lejos de ser excepciones, estos comportamientos son rasgos habituales de los ecosistemas.

Desde la física y las matemáticas, un sistema se considera no lineal cuando pequeñas perturbaciones pueden amplificarse debido a las interacciones entre sus componentes y a los mecanismos de retroalimentación (Hastings y cols., 2018). En ecología, esto se manifiesta en procesos como los ciclos de nutrientes, el metabolismo de los ecosistemas, la dispersión de especies o la propagación de perturbaciones. En estos sistemas, alejados del equilibrio, pueden darse múltiples trayectorias posibles, muy dependientes de su historia previa.

Un aspecto clave de esta complejidad es la interacción entre escalas. Lo que ocurre a nivel microbiano puede amplificarse hasta afectar al funcionamiento de un ecosistema completo o incluso de un bioma (Levin, 1992; Kéfi y cols., 2016). Las interacciones entre niveles –desde lo local hasta lo regional– generan propiedades emergentes; es decir, comportamientos del conjunto que no pueden explicarse a partir de sus partes por separado. Por eso, la incertidumbre no es sólo una limitación de nuestro conocimiento, sino una característica propia de los sistemas ecológicos.

En este artículo exploramos las bases de estos comportamientos no lineales y sus implicaciones para comprender y gestionar los ecosistemas. Asumir que la naturaleza funciona de una manera compleja y no siempre predecible nos obliga a replantear cómo la estudiamos y cómo tomamos decisiones frente a la actual crisis ambiental.

 **La naturaleza no lineal de los procesos ecológicos**
Los ecosistemas están formados por múltiples componentes interconectados cuyas interacciones no

responden de forma proporcional a los cambios del entorno. Un ejemplo clásico son los lagos someros: un ligero aumento de nutrientes puede desencadenar un cambio brusco, pasando de aguas claras con vegetación sumergida a un estado turbio dominado por algas. Este tipo de transición puede ser difícil de revertir, incluso si las condiciones iniciales se recuperan, porque el sistema puede quedar “atrapado” en un nuevo estado estable, un fenómeno conocido como histéresis.

Patrones espaciales y autoorganización

Además, los ecosistemas no sólo cambian en el tiempo, sino también en el espacio. En muchos casos, muestran patrones que surgen de manera espontánea a partir de interacciones locales, sin necesidad de un control central. En los humedales, por ejemplo, la distribución de la vegetación depende del flujo de agua, el crecimiento de las plantas y los ciclos de nutrientes. Estas interacciones generan configuraciones reconocibles, como mosaicos o bandas de vegetación, que, aunque cambian con el tiempo, mantienen cierta organización funcional. Estos patrones no sólo reflejan la historia del sistema, sino que también influyen en su capacidad para resistir y recuperarse frente a perturbaciones.

En conjunto, estas dinámicas ponen de manifiesto que los ecosistemas son sistemas complejos, en los que múltiples factores interactúan generando comportamientos emergentes. Como resultado, sus respuestas suelen ser difíciles de anticipar, lo que limita la utilidad de los enfoques lineales y simplificados para entender fenómenos como los cambios abruptos de estado, la autoorganización o la propagación espacial de perturbaciones.

Mecanismos de la no linealidad

Una característica fundamental de estos sistemas es la multiestabilidad: bajo las mismas condiciones externas, un ecosistema puede mantenerse en distintos estados posibles. Esto tiene implicaciones importantes para su gestión, ya que pequeñas variaciones o decisiones aparentemente menores pueden empujar al sistema hacia configuraciones muy diferentes, a veces difíciles de revertir.

Las retroalimentaciones son el núcleo de esta dinámica (Figura 1). Algunas actúan estabilizando el sistema –por ejemplo, cuando el aumento de depredadores limita el crecimiento de una población–, mientras que otras amplifican los cambios, como ocurre cuando la pérdida de vegetación reduce la infiltración de agua y favorece procesos de erosión del suelo. La interacción entre ambos tipos de retroalimentación puede dar lugar a oscilaciones o a cambios bruscos en el estado del ecosistema, lo que exige ir más allá de relaciones simples de causa y efecto para comprender su funcionamiento.

Tradicionalmente, el cambio ecológico se ha representado como una respuesta directa a factores externos (Figura 2, a y b). Sin embargo, esta visión simplifica en exceso la realidad. Una forma más intuitiva de entender estos procesos es imaginar el estado de un ecosistema como una bola que se desliza sobre un paisaje con valles y colinas (Figura 2c).

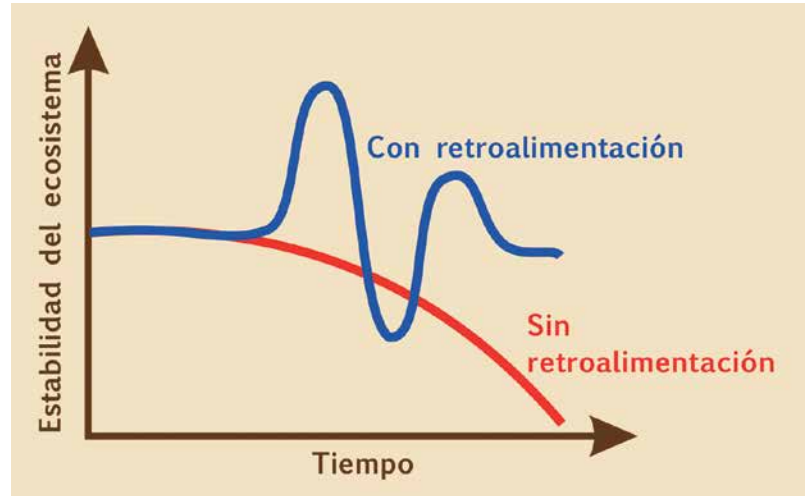


Figura 1. La retroalimentación es un componente fundamental de la estabilidad ecológica. Sin estos mecanismos, los ecosistemas tienden a degradarse frente a perturbaciones. En cambio, las retroalimentaciones, y en particular las negativas, permiten amortiguar los cambios y favorecen la capacidad del sistema para resistir y reorganizarse.

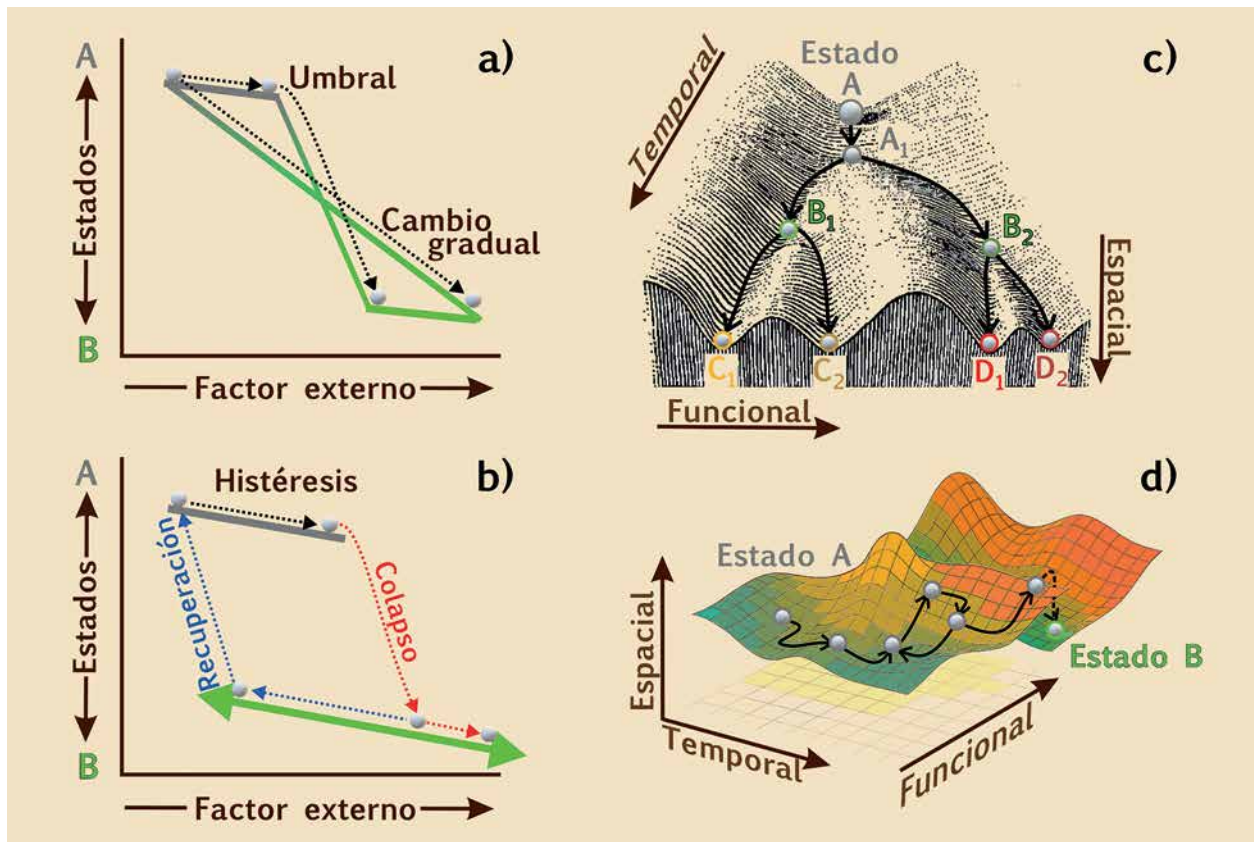


Figura 2. Comparación entre una visión lineal del cambio ecológico (a y b), donde las respuestas son graduales y proporcionales, y una visión compleja (c y d), en la que los ecosistemas pueden cambiar entre distintos estados. El panel d muestra esta dinámica en tres dimensiones, destacando la diversidad de trayectorias posibles.

Cada valle representa un estado estable, mientras que las colinas actúan como barreras que dificultan el cambio entre estados. En este contexto, pequeñas perturbaciones pueden no tener apenas efecto si el sistema permanece en el mismo valle; pero si se supera una de esas barreras, se produce una transición hacia otro estado, a menudo difícil de revertir.

Este tipo de representación permite integrar en una misma imagen ideas fundamentales como la existencia de múltiples estados posibles, la importancia de la historia del sistema y la posibilidad de cambios abruptos. Frente a los modelos lineales, ofrece una visión más realista de la dinámica ecológica y ayuda a comprender por qué los ecosistemas pueden comportarse de forma impredecible (Figura 2d).

Resiliencia

Capacidad de un ecosistema para absorber perturbaciones y reorganizarse sin perder su funcionamiento esencial, no sólo para "recuperarse".

■ Escalas e interacciones cruzadas

■ En los ecosistemas, lo que ocurre a pequeña escala no está aislado. Procesos locales pueden propagarse, amplificarse o modificarse al interactuar con dinámicas de mayor escala. Esta interdependencia hace que los ecosistemas funcionen como redes conectadas, donde las relaciones entre escalas generan comportamientos complejos y, en muchos casos, difíciles de prever.

Ciclos biogeoquímicos

Circulación natural de elementos como el carbono, el nitrógeno o el fósforo entre los seres vivos, la atmósfera, el suelo y el agua.

Del microbio al clima: ecosistemas conectados

Los microorganismos desempeñan un papel esencial en el funcionamiento de los ecosistemas. Aunque operan a escalas muy pequeñas y en tiempos breves, sus efectos acumulados influyen en procesos globales, como los **ciclos biogeoquímicos** (Falkowski y cols., 2008). Cambios locales –por ejemplo, en la humedad o en la disponibilidad de nutrientes– pueden alterar su actividad y desencadenar respuestas que escalan afectando funciones clave como la captura de carbono o la emisión de gases, con consecuencias a nivel regional e incluso global.

De forma similar, las decisiones humanas sobre el uso del suelo, aun siendo locales, pueden modificar procesos físicos fundamentales como el **albedo**, los flujos de humedad o la circulación atmosférica (Bonan, 2008). Estas alteraciones pueden generar efectos en cascada que terminan afectando al clima. Así, los sistemas ecológicos y sociales forman

una red interdependiente en la que las acciones humanas no están fuera del sistema, sino que actúan en su interior amplificando su complejidad.

Por qué importan las interacciones entre escalas

Esta visión resalta que los procesos ecológicos no pueden entenderse desde una única escala. Lo que observamos a nivel local depende, en gran medida, de interacciones con procesos que ocurren a otras escalas (Figura 3). Cuando estas conexiones se mantienen, los ecosistemas pueden absorber perturbaciones y reorganizarse; pero si se debilitan –por ejemplo, por pérdida de conectividad o cambios bruscos en el entorno–, el sistema puede volverse más vulnerable y propenso a cambios abruptos.

En este contexto, la **resiliencia** no implica únicamente recuperarse tras una perturbación, sino también mantener la capacidad de adaptación mediante la reorganización de las relaciones entre escalas.

Modelar estas interacciones es un desafío, ya que implica integrar procesos muy diversos sin perder su coherencia. Más que reducir la complejidad, se trata de interpretar cómo interacciones locales pueden generar efectos a gran escala, de modo que se pueda comprender mejor el funcionamiento conjunto del sistema (Levin, 1992; Kéfi y cols., 2016).

■ La incertidumbre como propiedad intrínseca de los ecosistemas

■ En los ecosistemas, la incertidumbre no es sólo una limitación de nuestro conocimiento, sino una característica propia de su funcionamiento. La no linealidad, las múltiples interacciones entre componentes y la conexión entre escalas hacen que su comportamiento sea difícil de anticipar con exactitud. Incluso en ausencia de azar, pequeñas diferencias pueden traducirse en trayectorias muy distintas.

Por qué los ecosistemas son inherentemente impredecibles

Durante mucho tiempo, la ecología aspiró a predecir el comportamiento de los sistemas naturales acumulando más datos y desarrollando modelos cada vez más detallados. Sin embargo, los ecosistemas no

Albedo

Proporción de luz solar que refleja una superficie; el hielo y las nubes tienen albedo alto, mientras que bosques y océanos lo tienen bajo.

siguen este ideal de predicción precisa. Pequeñas diferencias en las condiciones iniciales pueden amplificarse con el tiempo, dando lugar a trayectorias divergentes o a cambios bruscos sin señales previas claras (**Figura 4**).

Además, existen límites a la predicción que no pueden superarse simplemente con más información. Los ecosistemas pueden cambiar de estado al cruzar ciertos umbrales, y una vez que lo hacen, no siempre regresan a su situación anterior, incluso si las condiciones originales se restauran. Nuevas retroalimentaciones pueden estabilizar ese estado alternativo, haciendo que el sistema siga una trayectoria distinta.

En este sentido, la historia importa: los ecosistemas no recorren todas las posibilidades, sino que evolucionan siguiendo trayectorias concretas, condicionadas por procesos previos y eventos contingentes. Esto hace que su evolución no pueda anticiparse completamente a partir de reglas generales o condiciones iniciales.

El papel del azar y la autoorganización

En este contexto, el azar no es sólo una fuente de ruido, sino también de innovación. Procesos como la dispersión de especies, las colonizaciones o las fluctuaciones ambientales introducen variabilidad que puede generar nuevas configuraciones ecológicas. Esta dinámica, combinada con procesos de autoorganización, da lugar a sistemas en constante cambio, capaces de adaptarse y reorganizarse.

Lejos de alcanzar un equilibrio estático, muchos ecosistemas funcionan como sistemas dinámicos en continua transformación, donde estabilidad y cambio coexisten. Esta combinación de azar y organización es clave para entender su diversidad y su capacidad de respuesta frente a perturbaciones.

Qué implica esto para la gestión ambiental

Aceptar que la incertidumbre es inherente al funcionamiento de los ecosistemas tiene consecuencias importantes para su gestión (**Figura 4**). En lugar de buscar el control total o predicciones exactas, es más eficaz adoptar enfoques adaptativos, basados en el seguimiento continuo, la flexibilidad y la capacidad de respuesta.

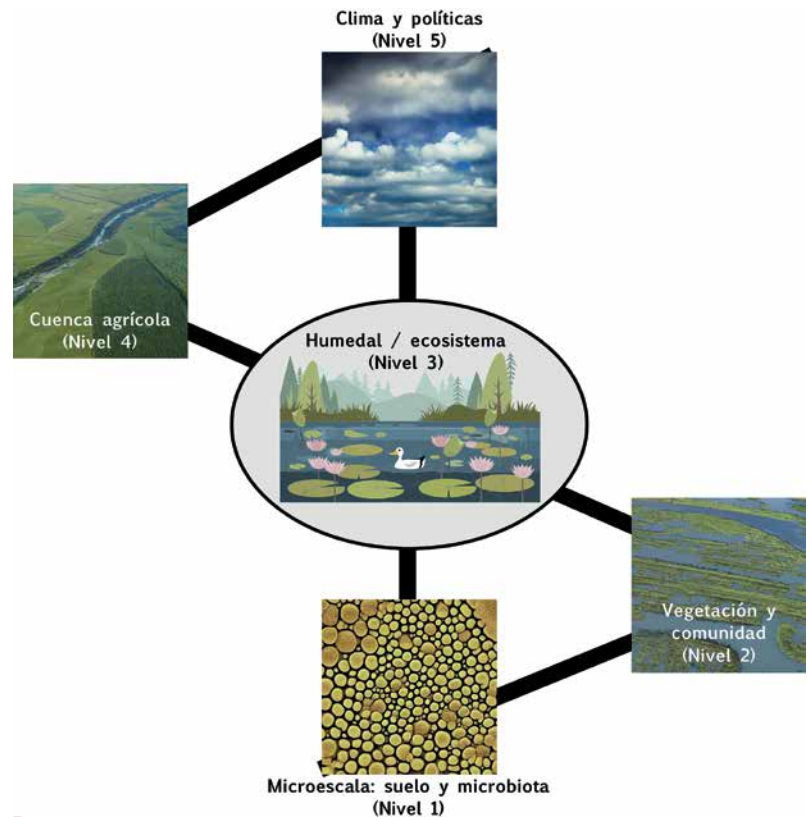


Figura 3. Ejemplo de interacción entre escalas en un ecosistema. En un humedal, procesos locales, como el crecimiento de la vegetación o el flujo de agua, se conectan con dinámicas más amplias, generando cambios que afectan al conjunto del sistema.

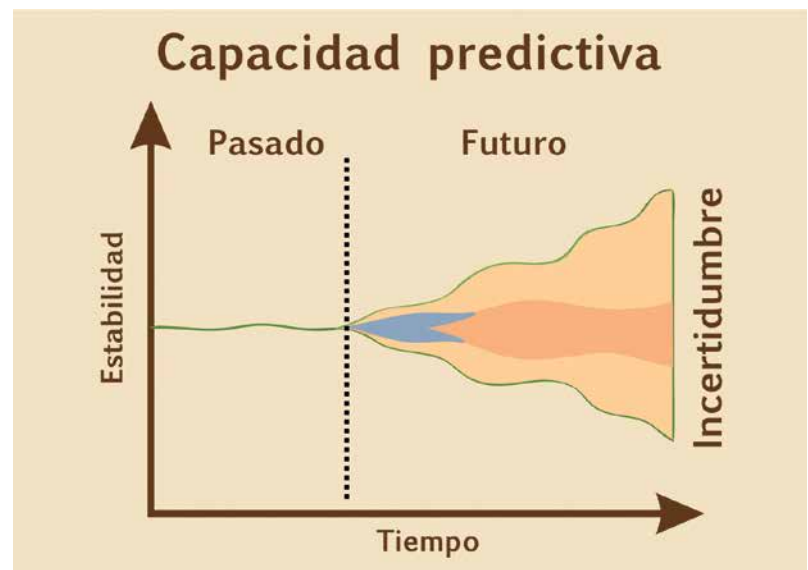


Figura 4. En sistemas no lineales, la capacidad de predicción se reduce con el tiempo. Los ecosistemas pueden seguir distintas trayectorias en función de pequeñas diferencias iniciales, perturbaciones o mecanismos de retroalimentación.

Tabla 1. Cómo difieren los sistemas lineales y no lineales en los ecosistemas.

Característica	Sistemas lineales	Sistemas no lineales
Relación causa-efecto	Relación directa y proporcional.	La respuesta puede ser mayor o menor de lo esperado.
Respuesta al cambio	Gradual y predecible.	Puede ser brusca o inesperada.
Estabilidad	Un único estado estable.	Varios estados posibles bajo las mismas condiciones.
Retroalimentación	Poco relevante o limitada.	Interacciones que pueden estabilizar o amplificar los cambios.
Predictibilidad	Generalmente alta en condiciones simples.	Limitada, especialmente a largo plazo.
Sensibilidad a condiciones iniciales	Baja.	Alta: pequeñas diferencias pueden generar grandes cambios.
Efectos de escala	Poco considerados.	Muy importantes: lo que ocurre a una escala afecta a las otras.
Ejemplos ecológicos	Crecimiento de poblaciones en condiciones simples.	Cambios abruptos en lagos, brotes poblacionales, patrones espaciales.
Modelado	Modelos matemáticos sencillos.	Modelos más complejos con múltiples interacciones.
Implicaciones para el manejo ambiental	Permiten prever resultados con cierta seguridad.	Exigen enfoques flexibles que tengan en cuenta la incertidumbre.

Esto implica trabajar con márgenes de seguridad, fomentar la diversidad, que amplía las posibles respuestas del sistema, y desarrollar sistemas de alerta temprana que permitan detectar cambios antes de que se vuelvan irreversibles. También requiere promover formas de gobernanza más flexibles, capaces de adaptarse a contextos cambiantes.

En última instancia, reconocer los límites de la predicción no supone renunciar al conocimiento, sino utilizarlo de manera más realista. Entender y aceptar la incertidumbre no es sólo un desafío científico, sino también una condición necesaria para tomar mejores decisiones en un contexto de crisis ambiental.

■ **Implicaciones para el entendimiento y manejo de los ecosistemas**

Durante mucho tiempo, la ciencia ha buscado explicar la naturaleza mediante leyes generales y modelos capaces de predecir su comportamiento. Este enfoque ha sido muy exitoso en muchos campos. Sin embargo, los ecosistemas –caracterizados por la no linealidad, la autoorganización y la dependencia de su historia– plantean límites claros a esta forma de entender el mundo.

En este contexto, el conocimiento no puede considerarse una representación completa y definitiva de la realidad, sino una herramienta parcial para

interpretar sistemas en constante cambio. Ningún modelo ni ninguna escala por sí sola puede captar toda la complejidad de un ecosistema, por lo que distintas aproximaciones resultan necesariamente complementarias.

Aceptar esta limitación no implica renunciar al rigor científico, sino utilizarlo de forma más realista. Nos obliga a incorporar la incertidumbre como parte del proceso de conocimiento y a reconocer que nuestras decisiones se basan siempre en información incompleta.

Al mismo tiempo, esta perspectiva abre la puerta a enfoques más integradores. Comprender los ecosistemas requiere no sólo datos y modelos, sino también contextos, valores y formas diversas de interpretar la relación entre sociedad y naturaleza. La ciencia, en este sentido, no es una actividad aislada, sino una práctica situada que forma parte de la manera en que las sociedades entienden y gestionan su entorno.

En un contexto de crisis ambiental, esta visión tiene implicaciones directas: las decisiones no dependen únicamente de evidencia técnica, sino también de cómo interpretamos los riesgos, las incertidumbres y las posibles trayectorias futuras. Integrar diferentes perspectivas y fomentar enfoques más flexibles y participativos puede ayudar a diseñar estrategias de gestión más robustas frente a la complejidad del mundo natural.

Conclusiones

Los ecosistemas no cambian de forma gradual ni predecible. Comprenderlos exige reconocer sus umbrales y aceptar que la incertidumbre forma parte de su funcionamiento. Esto implica replantear cómo actuamos sobre ellos: no desde el control, sino desde la adaptación a su complejidad. Esto requiere combinar el conocimiento técnico con sensibilidad ecológica y responsabilidad ética. Sólo así podremos imaginar políticas que escuchen, en lugar de imponer, los ritmos y umbrales del mundo vivo.

Salvador Sánchez-Carrillo

Museo Nacional de Ciencias Naturales, Consejo Superior de Investigaciones Científicas, Madrid, España
sanchez.carrillo@mncn.csic.es

David G. Angeler

Museo Nacional de Ciencias Naturales, Consejo Superior de Investigaciones Científicas, Madrid, España.
david.angeler@mncn.csic.es

Miguel Álvarez-Cobelas

Museo Nacional de Ciencias Naturales, Consejo Superior de Investigaciones Científicas, Madrid, España.
malvarezcobelas@gmail.com



Referencias específicas

- Bonan, G. B. (2008), "Forests and climate change: forcings, feedbacks, and the climate benefits of forests", *Science*, 320(5882):1444-1449. Disponible en: <https://doi.org/10.1126/science.1155121>.
- Falkowski, P. G., T. Fenchel y E. F. Delong (2008), "The microbial engines that drive Earth's biogeochemical cycles", *Science*, 320(5879):1034-1039. Disponible en: <https://doi.org/10.1126/science.1153213>.
- Hastings, A., K. C. Abbott, K. Cuddington *et al.* (2018), "Transient phenomena in ecology", *Science*, 361(6406):eaat6412. Disponible en: <https://doi.org/10.1126/science.aat6412>.
- Kéfi, S., V. Miele, E. A. Wieters *et al.* (2016), "How structured is the entangled bank? The surprisingly simple organization of multiplex ecological networks leads to increased persistence and resilience", *PLOS Biology*. Disponible en: <https://doi.org/10.1371/journal.pbio.1002527>.
- Levin, S. A. (1992), "The problem of pattern and scale in ecology", *Ecology*, 73:1943-1967. Disponible en: <https://doi.org/10.2307/1941447>.
- Scheffer, M., S. R. Carpenter, J. A. Foley, C. Folke y B. Walker (2001), "Catastrophic shifts in ecosystems", *Nature*, 413:591-596. Disponible en: <https://doi.org/10.1038/35098000>.
- Walker, B. y D. Salt (2006), *Resilience Thinking: Sustaining Ecosystems and People in a Changing World*, Washington, Island Press.

Tomás Ramón Florville-Alejandro y René Ricardo Cuéllar Rodríguez

Explorando las estaciones hidrométricas

Resumen

Las estaciones hidrométricas son clave para la gestión de los recursos hídricos y del territorio. Este artículo las define, explica su propósito, introduce los parámetros e instrumentos que emplean, aborda su identificación y clasificación, y destaca la importancia de su ubicación y distribución según criterios internacionales. Presenta, asimismo, alternativas en contextos desafiantes y concluye resaltando su función estratégica frente al cambio climático.

Abstract

Hydrometric stations are essential for the management of water resources and land use. This paper defines them, explains their purpose, introduces the parameters and instruments they use, discusses their identification and classification, and highlights the importance of their location and distribution according to international criteria. It also presents alternatives for challenging contexts and concludes by emphasizing their strategic role in addressing climate change.

Para resolver un problema es esencial conocer y entender las causas que lo provocan. En la gestión de los recursos hídricos las estaciones hidrométricas son cruciales para este propósito. Una estación hidrométrica es un lugar donde se miden y registran sistemáticamente parámetros hidrológicos de ríos, arroyos u otros cuerpos de agua. Así pues, proporcionan información valiosa sobre la cantidad y calidad del recurso hídrico.

Dichos parámetros incluyen caudal, nivel, velocidad, sedimentos y calidad del agua. El *caudal* es la cantidad de agua que fluye por unidad de tiempo y permite conocer la magnitud del flujo en un río o canal. El *nivel* corresponde a la altura de la superficie del agua respecto a un punto de referencia y es clave para monitorear variaciones en embalses y cauces. La *velocidad* describe la distancia recorrida por una partícula de agua en una unidad de tiempo y es esencial para calcular el



Aforos
Medición del volumen de agua que atraviesa una corriente en un punto y momento específicos. Se expresa en unidad de volumen sobre tiempo; por ejemplo, metros cúbicos por segundo (m³/s).

Curva de gasto
Relación matemática entre el nivel y el caudal, construida a partir de aforos previos en distintos niveles, y utilizada para estimar el flujo en un punto del río sin necesidad de efectuar aforos directos. Se denomina también *curva de descarga* (rating curve en inglés).

caudal y analizar la dinámica del movimiento. Los *sedimentos* representan la cantidad de partículas sólidas transportadas por el agua en un volumen determinado, información necesaria para estudiar procesos de erosión y sedimentación. Finalmente, la *calidad del agua* se evalúa mediante parámetros físicos, químicos y biológicos como temperatura, conductividad, pH o presencia de patógenos, lo que permite determinar el estado del recurso hídrico y su aptitud para distintos usos.

Registrar el nivel es más económico y sencillo que medir directamente el caudal; por ello, con frecuencia se realizan **aforos** a diferentes niveles en secciones transversales de interés, a partir de los cuales se obtienen pares nivel-caudal. Estos pares se ajustan mediante una función matemática llamada **curva de gasto**, que transforma registros automáticos de nivel en valores de caudal, para permitir la estimación continua del flujo. La curva de gasto es el principio operativo esencial de la mayoría de las estaciones hidrométricas.

■ **Instrumentación hidrométrica**

■ Los instrumentos convencionales permiten medir parámetros clave en ríos y embalses. El nivel se registra con reglas limnimétricas y sensores de presión, radar o ultrasonido, que indican la altura de la superficie libre. El caudal se determina mediante aforos con molinetes hidrométricos o con perfiladores acústicos Doppler (ADCP, por sus siglas en inglés), capaces de calcular el flujo total a partir de la velocidad y la sección transversal del cauce. La velocidad del agua se mide con correntómetros mecánicos o electrónicos, que registran la rapidez del flujo en distintos puntos. Para analizar sedimentos se emplean muestreadores como el USDH-48 o bo-

tellas Van Dorn, que recolectan partículas en suspensión o de fondo, esenciales para estudiar erosión y transporte sólido. Finalmente, la calidad del agua se evalúa con equipos multiparámetro portátiles que miden pH, conductividad, oxígeno disuelto, turbidez y otros indicadores físicoquímicos, fundamentales para el control ambiental y la gestión de recursos hídricos.

■ **Diversidad y complejidad hidrológica**

■ Las estaciones hidrométricas se clasifican según tres criterios esenciales. Por su modo de transmisión, pueden ser locales, con almacenamiento en sitio y recuperación periódica; remotas, mediante el envío de datos a distancia en intervalos programados; o en tiempo real, con transmisión inmediata a centros de control. Según los parámetros medidos, se distinguen estaciones de nivel, caudal, velocidad, calidad del agua, sedimentos, temperatura o integrales, que combinan varios registros. Finalmente, por modalidad de registro, hay estaciones manuales, con lecturas realizadas por un observador; automáticas, con sensores electrónicos de registro continuo; y semiautomáticas, con instrumentos que realizan la medición, pero requieren apoyo humano.

■ **Identificación y clasificación de las estaciones hidrométricas**

■ Las estaciones se distinguen mediante un sistema de códigos de identificación y clasificación, que varía según la organización o país. El código de identificación es una clave única, numérica o alfanumérica, asignada a cada estación por el organismo encargado de operarla como, por ejemplo, el Servicio Geológico de Estados Unidos (**Tabla 1**).

Tabla 1. Códigos de identificación comunes para estaciones hidrométricas.

Núm.	Código	Descripción
1	Código Hidrológico Nacional	Identificador único de estaciones hidrométricas en México.
2	Código del Servicio Geológico de EE. UU.	Identificador único de estaciones hidrométricas en EE. UU.
3	Código de la Organización Meteorológica Mundial	Identificador único en el ámbito internacional.

Tabla 2. Atributos descriptivos para el establecimiento de códigos de clasificación de estaciones hidrométricas (OMM, 2008).

Núm.	Atributo	Descripción
1	Denominación	Nombre común de la estación, generalmente asociado al del río o cuenca donde se ubica.
2	Localización	Coordenadas geográficas (latitud y longitud), que permiten ubicar la estación en un mapa.
3	Nivel de referencia	Altitud de la estación respecto a un nivel de referencia, como el nivel del mar.
4	Tipo	Clase de estación, como aforo (caudal), limnigráfica (nivel) o limnimétrica (variación del nivel).
5	Parámetros observados	Variables registradas en la estación, como nivel del agua, caudal, temperatura, etcétera.
6	Instrumentación	Instrumentos y equipos empleados, como sensores de nivel, pluviómetros, caudalímetros, etcétera.
7	Programa de observación	Horario y frecuencia de observación, que indican cuándo y con qué regularidad se toman mediciones.
8	Información de control	Información sobre controles o regulación aguas arriba que puedan afectar los registros.
9	Antecedentes	Historia de la estación, incluido el registro de fechas de inicio de operación, reubicaciones y cambios de clasificación.
10	Observador	Datos del encargado de las observaciones, para garantizar seguimiento y responsabilidad en las actividades.
11	Accesos y croquis	Esquema detallado de la estación, incluidas rutas de acceso, distancias y medios de transporte disponibles.

El código de clasificación es un identificador usado para categorizar las estaciones hidrométricas con base en atributos que definen sus características y finalidades (Tabla 2). Ambos códigos se almacenan en un padrón hidrológico a cargo de la entidad administradora del recurso hídrico para simplificar la localización y acceso a los datos hidrométricos.

Sinergia entre estaciones hidrométricas

Las estaciones hidrométricas generalmente funcionan en conjunto. A un grupo de estaciones operadas para alcanzar un objetivo hidrológico específico se le llama red de observación hidrométrica, o simplemente red hidrométrica. Los datos recolectados ayudan en la planificación del territorio, lo que permite prevenir, mitigar o corregir riesgos de inundación y sequía, además de facilitar la asignación de recursos hídricos y la conservación de ecosistemas ribereños y acuáticos, entre otros.

Como ejemplo, la red hidrométrica de México es un sistema nacional operado por la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) que integra más de 2000 estaciones para medir niveles y caudales de ríos, con datos centralizados en el Banco Nacional de Datos de Aguas Superficiales (BANDAS). Estos registros se complementan con el Servicio Meteorológico Nacional (SMN), que aporta información climática esencial para la gestión del recurso hídrico. Las cuencas de los ríos Bravo, Lerma-Chapala-Santiago y Grijalva-USUMACINTA son las más importantes monitoreadas en México.

Ubicación de las estaciones hidrométricas

La ubicación de las estaciones suele basarse en criterios de la Organización Meteorológica Mundial (OMM, 2008). Un emplazamiento y distribución adecuados garantizan información de la mejor calidad por el monto de los recursos invertidos, lo que maximiza la relación costo-beneficio.

Para diseñar una nueva red o revisar una existente, estos criterios se relacionan con factores institucionales, económicos y el propósito específico de la red. Éstos son útiles para guiar la selección general de los cursos de agua donde se realizarán mediciones (Tabla 3).

Respecto a las variables para elegir el emplazamiento, los criterios se relacionan con las características físicas del curso de agua y factores de comunicación y accesibilidad del sitio, pues resultan útiles para orientar las decisiones en contextos específicos, como la selección de sitios para instalar estaciones dentro del curso de agua (Tabla 4).

Los criterios para establecer la densidad mínima de estaciones por unidad de superficie se relacionan con factores fisiográficos, climáticos y socioeconómicos. Sirven de guía en un contexto intermedio

cuando no se dispone de suficiente información para determinar el número mínimo de estaciones que se deben instalar (Tabla 5).

■ ■ ■ **Implementación hidrométrica efectiva**

■ Es importante reconocer que en muchos casos no será posible cumplir todos los criterios. En contextos complejos se recomienda analizar cuidadosamente cada situación antes de decidir el emplazamiento más adecuado y seleccionar el más conveniente. Generalmente, se sugiere aplicar las técnicas más apropiadas para el diseño de la red hidrométrica según la información disponible y los objetivos definidos, que pueden incluir características hidrológicas sencillas, relaciones de regresión o análisis de red más complejos por métodos generalizados de mínimos cuadrados.

Tabla 3. Criterios para el diseño de una nueva red hidrométrica o la revisión de una existente (OMM, 2008).

Núm.	Etapas	Criterio
1	Contexto institucional	Las organizaciones que explotan recursos hídricos deben definir sus funciones y objetivos, en especial, sus responsabilidades legislativas, y mejorar su comunicación para coordinar e integrar las redes.
2	Finalidad de la red	Se deben identificar las finalidades de la red en relación con las variaciones en tiempo y espacio de los usuarios y los usos de los datos, así como anticipar necesidades futuras.
3	Objetivos de la red	Los objetivos de la red deben basarse en su finalidad y la información requerida.
4	Definición de prioridades	Cuando existan múltiples objetivos se deben establecer prioridades. Si el presupuesto disponible es suficiente, todos podrán cumplirse; en caso contrario, deben descartarse los de menor prioridad.
5	Evaluación de redes	Se debe compilar e interpretar la información de las redes existentes para verificar que cumplan sus objetivos, y compararse con otras cuencas.
6	Diseño de red	En el diseño de la red se deben aplicar las técnicas más adecuadas de acuerdo con la información disponible y los objetivos establecidos.
7	Optimización de operaciones	Gran parte del costo de recolección de datos proviene de procedimientos operativos (instrumentos, frecuencia de visitas a estaciones y organización del trabajo en campo). Se debe adoptar un enfoque de costo mínimo.
8	Presupuesto	El costo de funcionamiento de la red debe fijarse según los procedimientos operativos; si se ajusta al presupuesto, puede avanzarse a la siguiente etapa. De lo contrario, se debe buscar financiamiento adicional o reevaluar objetivos y prioridades para reducir gastos. El proceso debe reflejar el impacto de la falta de recursos, los objetivos no alcanzados y la información limitada.
9	Implementación	La puesta en marcha de nuevas redes debe planificarse a corto y largo plazo.
10	Revisión de la red	Dado que algunos componentes cambian con el tiempo, es esencial revisar la red de forma continua para adaptarse a variaciones en usuarios, usos de datos o presupuesto.



Tabla 4. Variables para la selección de sitios potenciales de emplazamiento de estaciones hidrométricas (OMM, 2008).

Núm.	Variable	Criterio
1	Tramo de control	El río debe mantener un curso recto unos 100 m aguas arriba y abajo del punto de medición, así como tener una longitud suficiente para registrar caudales en todos los niveles cercanos. El flujo debe permanecer en el canal sin desvíos subterráneos.
2	Erosión de márgenes y lecho	La sección transversal (las márgenes y el lecho) debe estar libre de erosión, sedimentación y maleza.
3	Pendiente lateral de las márgenes	Las márgenes deben ser permanentes, suficientemente altas para contener niveles de agua elevados y estar libres de arbustos.
4	Presencia de formaciones geológicas	En bajo caudal deben existir controles naturales estables, como afloramientos rocosos; en caudal alto, el canal debe estrecharse o contar con una cascada no sumergida en todos los niveles.
5	Superficie del agua	La superficie del agua cerca de la estación hidrométrica debe permanecer sin olas ni ondulaciones.
6	Tipo de flujo	El flujo en la sección del canal que contiene la estación no debe ser turbulento en ningún nivel de agua.
7	Confluencia con corrientes y efecto de la marea	El emplazamiento debe situarse lejos de confluencias o efectos de marea para evitar influencias externas en el nivel del agua.
8	Diferencia de nivel	El tramo de control debe situarse más alto que los afluentes.
9	Accesibilidad	El emplazamiento debe ser accesible para la instalación y operación de la estación.
10	Transmisión de datos	El emplazamiento debe permitir instalaciones de telemetría o transmisión satelital, si es necesario.
11	Profundidad	La sección transversal debe tener una profundidad mínima de 0.30 m.

Tabla 5. Densidad mínima de estaciones hidrométricas (km²/estación) (OMM, 2008).

Unidad fisiográfica	Precipitación		Evaporación	Flujo fluvial	Sedimentos	Calidad del agua
	Registradoras	Núm. registradoras				
Costa			50 000	2 750	18 300	55 000
Montaña	250	2 500	50 000	1 000	6 700	20 000
Planicie interior	575	5 750	5 000	1 875	12 500	37 500
Montes/ondulaciones	575	5 750	50 000	1 875	12 500	47 500
Islas pequeñas	25	250	50 000	300	2 000	6 000
Áreas urbanas	-	10 a 20	-	-	-	-
Polos/tierras áridas	10 000	100 000	100 000	20 000	200 000	200 000

Aunque se han desarrollado métodos más avanzados para la ubicación y distribución de estaciones, su implementación extensiva continúa siendo limitada en países en desarrollo por restricciones técnicas y económicas. En este sentido, la simplicidad de los criterios expuestos representa su principal fortaleza, y los consolida como herramientas eficaces y de gran valor en el ámbito hidrológico.

■ **Conclusiones**

■ Las estaciones hidrométricas son pilares para la gestión sostenible de los recursos hídricos en América Latina. Su adecuada clasificación, ubicación y operación generan información confiable para la planificación del territorio, la prevención de riesgos y la conservación ambiental. La integración de redes nacionales como BANDAS/CONAGUA con estándares



Medidor de nivel de agua. Tomada de: <https://www.gob.mx/conagua/articulos/sabes-que-es-una-estacionhidrometrica>.

Recuadro 1.

En México se han empleado distintos sistemas de codificación para estaciones hidrométricas. El formato oficial del Sistema Nacional del Agua usa la estructura RHxx-Subregión-Número (ejemplo: RH12-LM-0203). Otro formato, más detallado y común en manuales técnicos o bases regionales, incluye Región-Subregión-Cuenca-Número de Estación (ejemplo: NO-29-001). Ambos identifican cada estación de forma única: el primero es más compacto y nacional, mientras que el segundo es más descriptivo y regional.

internacionales asegura coherencia metodológica y fortalece la toma de decisiones en escenarios de incertidumbre climática, mientras que la adaptación a contextos geográficos o socioeconómicos complejos amplía las posibilidades de monitoreo en territorios con limitaciones. En este marco, fortalecer la investigación en tecnologías emergentes es una necesidad impostergable que amplía las capacidades de observación y abre nuevas oportunidades para enfrentar los retos del cambio climático.

Tomás Ramón Florville-Alejandre

Departamento de Ciencias, Corporación Educativa del Llano, Colombia, y Facultad de Ingeniería, Corporación Universitaria del Meta, Colombia.
tomas.florville@nas.edu.co

René Ricardo Cuéllar Rodríguez

Facultad de Ingeniería, Corporación Universitaria del Meta, Colombia.
rene.cuellar@unimeta.edu.co

Referencias específicas

OMM (2008; actualización, 2025), *Guía de prácticas hidrológicas, vol I. Hidrología: de la medición a la información hidrológica* (núm. 168), Ginebra, Organización Meteorológica Mundial. Disponible en: <https://library.wmo.int/idurl/4/32737>.

Lecturas recomendadas

Aparicio, F. J. (1989), *Fundamentos de hidrología de superficie*, México, Limusa.

CONAGUA (2019), *Sistema de Información Hidrológica (SIH)*, México, Comisión Nacional del Agua, Subdirección General Técnica. Disponible en: <https://sih.conagua.gob.mx/>, consultado el 13 de agosto de 2026.

Dobriyal, P., R. Badola, C. Tuboi y S. A. Hussain (2017), "A review of methods for monitoring streamflow for sustainable water resource management", *Applied Water Science*, 7:2617-2628. Disponible en: <https://doi.org/10.1007/s13201-016-0488-y>.

OMM (2010a), *Manual on Stream Gauging, vol. I: Fieldwork* (núm. 1044), Ginebra, Organización Meteorológica Mundial. Disponible en: https://old.wmo.int/extranet/pages/prog/hwarp/publications/stream_gauging/1044_Vol_I_en.pdf.

OMM (2010b), *Manual on Stream Gauging, vol. II: Computation of Discharge* (núm. 1044), Ginebra, Organización Meteorológica Mundial. Disponible en: https://old.wmo.int/extranet/pages/prog/hwarp/publications/stream_gauging/1044_Vol_II_en.pdf.

Simpson, M. (2001), "Discharge Measurements Using a Broad-Band Acoustic Doppler Current Profiler", *United States Geological Survey*, usgs [en línea]. Disponible en: <https://pubs.usgs.gov/of/2001/ofr0101/>, consultado el 13 de agosto de 2026.

Tang, Q., G. Huilin, L. Hui y D. P. Lettenmaier (2009), "Remote sensing: hydrology", *Progress in Physical Geography*, 33(4):490-509. Disponible en: <https://doi.org/10.1177/0309133309346650>.

Marco A. Domínguez-Aguilar, Luis Felipe Ramírez-Verduzco y Norma Icoquih Zapata-Peñasco

El sargazo: un problema que puede convertirse en oportunidad para el Caribe mexicano

Resumen

En este artículo se presenta una visión más optimista del uso y procesamiento del sargazo. Revisa los aspectos de acumulación, naturaleza, composición y su transformación en productos de valor como el bioetanol y el biogás. Sugiere el inicio de una política sólida para el manejo del sargazo y llama a la conciencia de la gente para proteger el medio ambiente del calentamiento global.

Abstract

This article presents a more optimistic perspective on the use and processing of sargassum. It reviews aspects regarding its accumulation, nature, and composition, as well as its transformation into value-added products such as bioethanol and biogas. It advocates for the implementation of a robust policy for sargassum management and calls for public awareness regarding the protection of the environment from global warming.

El sargazo es un tipo de alga marina que, en los últimos años, ha llamado la atención tanto en la academia como en la sociedad mexicana debido al problema que ha ocasionado en el Caribe ([Figura 1](#)).

Desde que se registró su llegada masiva en 2011, este fenómeno ha preocupado, pero también ha abierto puertas a nuevas oportunidades tecnológicas y de valorización. Aquí te contamos qué es el sargazo, cómo afecta al medio ambiente y qué soluciones tecnológicas se están desarrollando para aprovecharlo y reducir su impacto en las costas mexicanas ([Figura 2](#)).

¿Qué es el sargazo y por qué es un problema?

Existen dos especies principales de sargazo: *Sargassum natans* y *Sargassum fluitans* ([Figura 3](#)), presentes en el Mar de los Sargazos y en el Gran Cinturón de Sargazo del Atlántico (GASB, por sus siglas en inglés). *Sargassum natans* tiene tallos largos

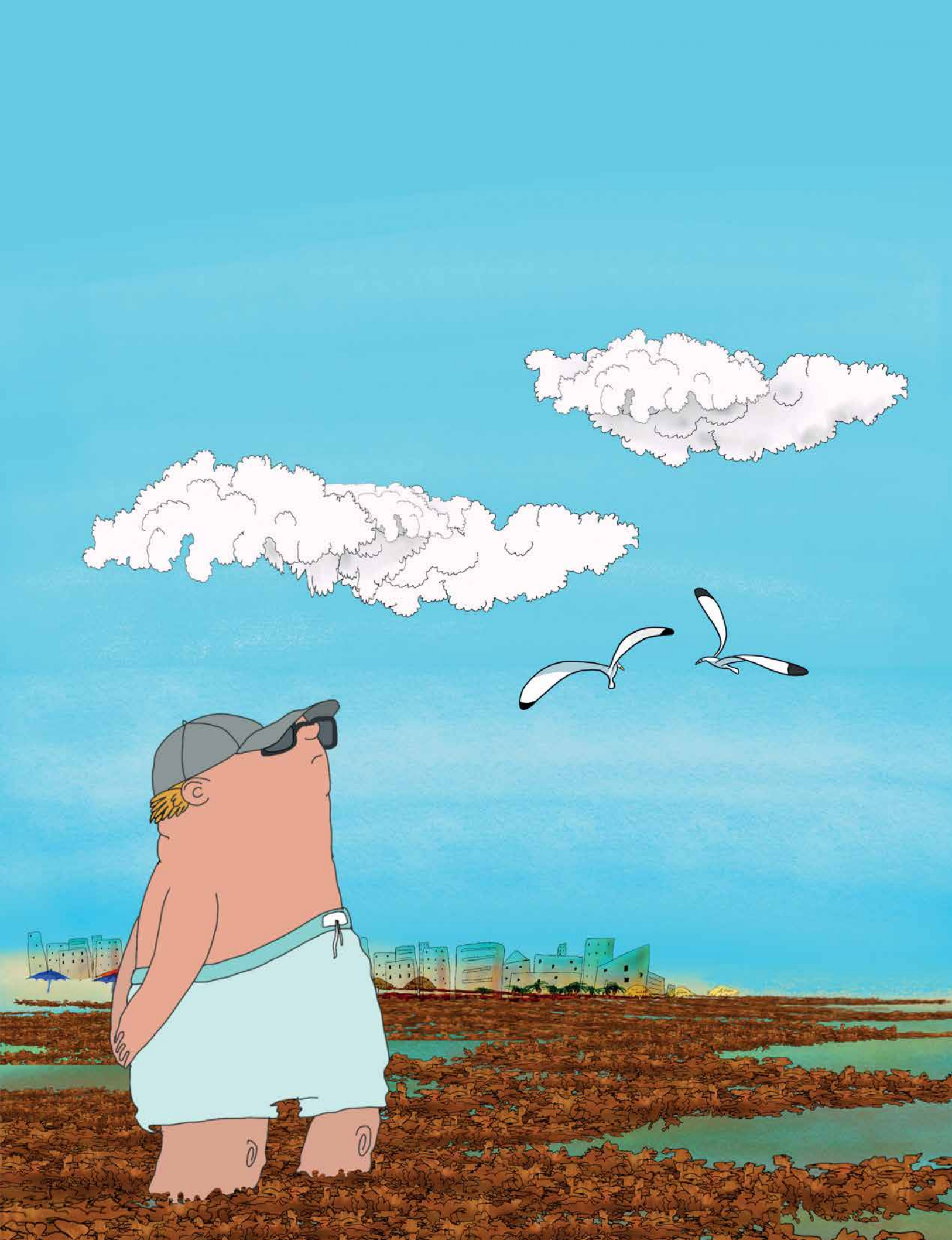




Figura 1. Imagen inédita registrada en Cancún, México (2023), donde se observa la acumulación masiva de sargazo en la zona costera. Fotografía cortesía de L. N. Mónica Contreras.

y hojas angostas, mientras que *Sargassum fluitans* presenta tallos cortos y hojas anchas. Ambas especies dependen de vesículas de aire para flotar, que se consideran estructuras importantes, pues hacen

posibles los eventos de arribo de sargazo en el Caribe, el Golfo de México y el Atlántico. Este sargazo flotante ofrece refugio, alimento y áreas de reproducción para diversas especies marinas, extendiéndose tanto en aguas poco profundas como en arrecifes y en mar abierto. El problema es que, en los últimos años, el sargazo arriba en grandes cantidades a las costas del Caribe, lo que está generando graves problemas para el medio ambiente y para la economía local. Desde 2013, se ha convertido en un problema constante en lugares como Tulum y Cancún, donde afecta a la biodiversidad y el turismo.

La llegada masiva de sargazo se ha incrementado debido a varios factores. El aumento de la temperatura del mar por el cambio climático, sumado a la deforestación del Amazonas y el uso excesivo de fertilizantes para actividades agrícolas, han provocado que lleguen más nutrientes –como nitrógeno y fósforo– al océano, lo que, junto con las corrientes oceánicas más fuertes, ha creado el ambiente propicio para que el sargazo se desarrolle en mayores densidades en el Atlántico tropical formando un cinturón mucho más poblado que viaja hasta nuestras costas.

■ ■ ■ **Impacto ambiental del sargazo**

■ El sargazo acumulado en las playas no sólo es desagradable a la vista, sino que también tiene con-

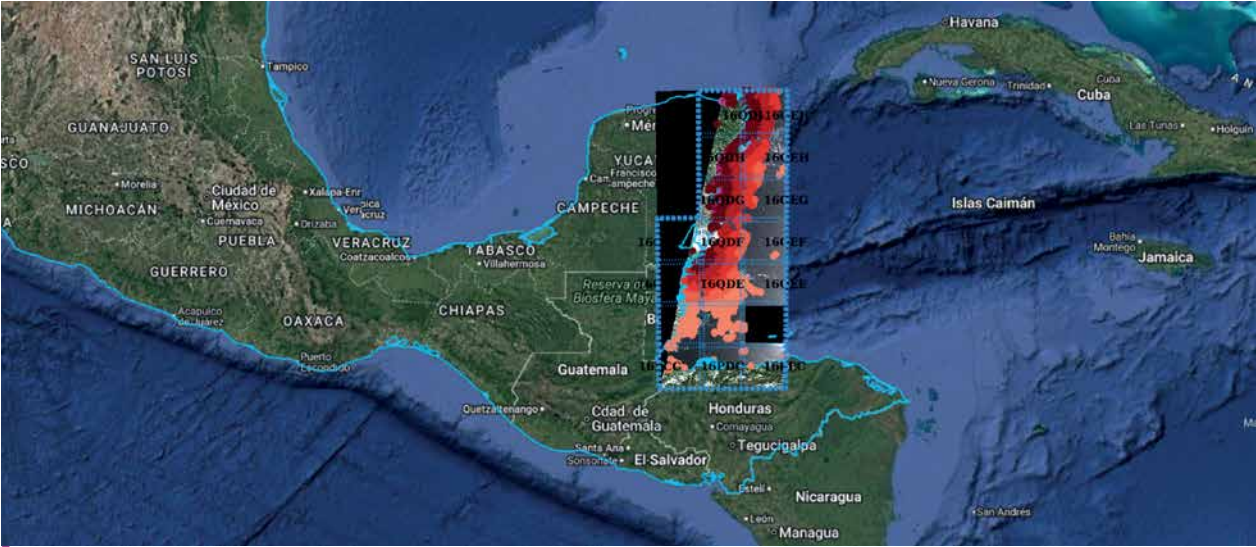


Figura 2. Mapa que muestra las principales áreas de afectación y acumulación de sargazo en el Caribe mexicano con más de 20 000 toneladas registradas.

Diferencias entre especies de sargazo

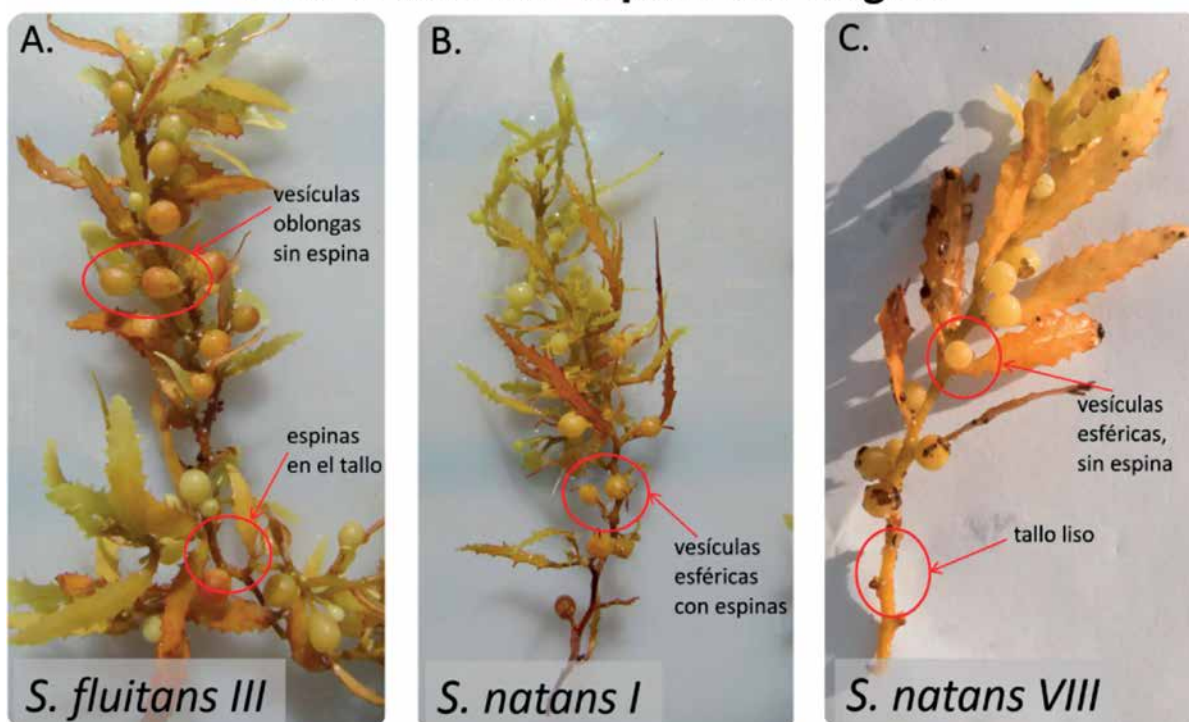


Figura 3. Diferencias morfológicas entre las dos especies pelágicas de sargazo, *Sargassum fluitans* y *Sargassum natans*.

secuencias graves para el medio ambiente. Cuando cubre grandes áreas del mar, bloquea la luz del sol y evita que las plantas marinas realicen la fotosíntesis, lo que pone en riesgo la vida marina (Aldana y cols., 2024). Además, durante el proceso de descomposición del sargazo se liberan gases tóxicos –como el ácido sulfhídrico– que puede contaminar el aire y el agua, lo que afecta la salud de las personas.

En cuanto a su composición, además de glucosa, el sargazo tiene otros azúcares fermentables, como manitol, xilosa, ramnosa, fucosa y galactosa, y ácidos urónicos. Todos estos compuestos pueden ser aprovechados por microorganismos para producir biocombustibles y otros productos de valor comercial (Flores-Contreras y cols., 2023). La composición básica del sargazo se muestra en la **Figura 4**.

El sargazo está constituido principalmente de agua y polisacáridos, los cuales suministran la glucosa para su procesamiento en biocombustibles y otros productos como proteínas, grasas, vitaminas y metabolitos. Los polisacáridos representan la estructura química de los carbohidratos complejos, mientras que la fibra

es una categoría funcional y nutricional que agrupa a dichos polisacáridos –junto con otros compuestos como la lignina– que resisten la digestión enzimática en el sistema digestivo humano y animal.

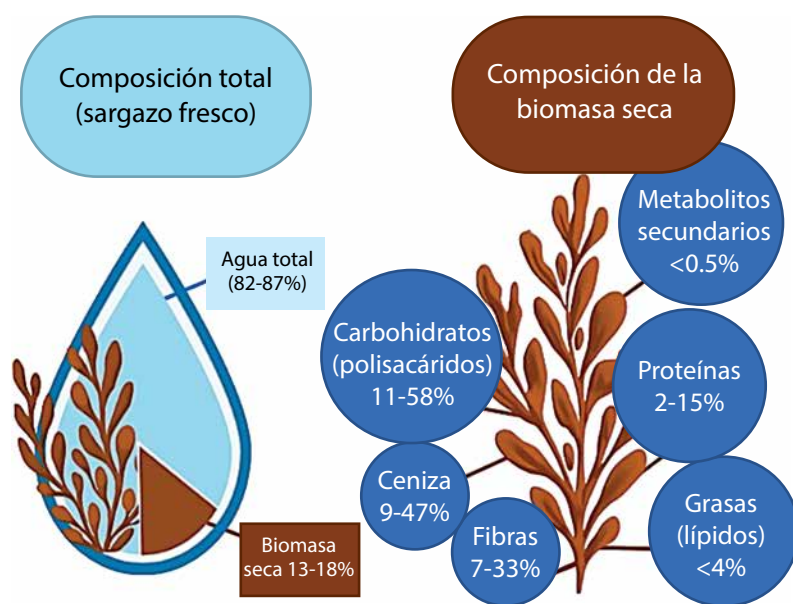


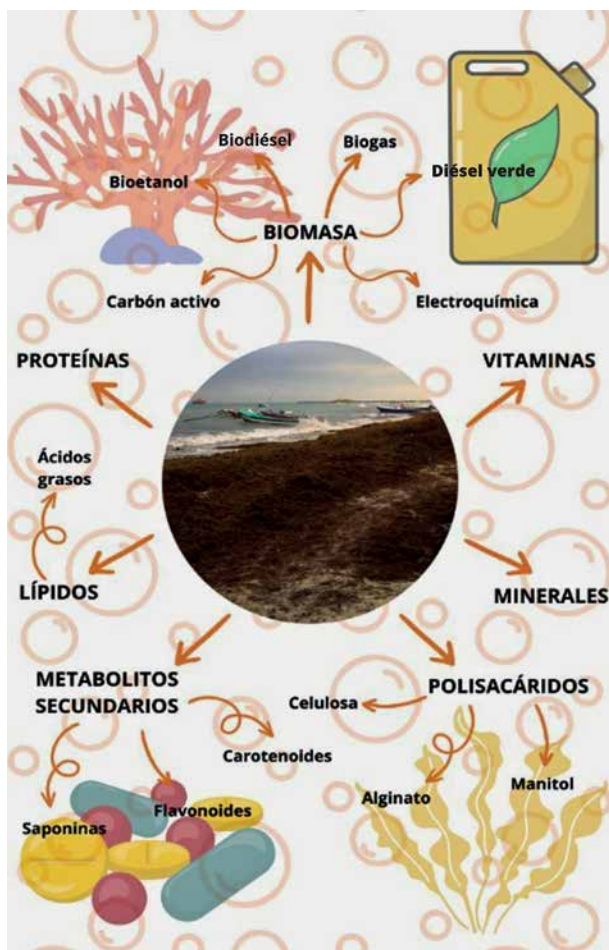
Figura 4. Composición química básica del sargazo.

La **Figura 5** muestra la amplia gama de los productos derivados del sargazo y destaca su valor para diversas industrias. Entre éstos se encuentran polisacáridos como el alginato, utilizados en alimentos y fármacos; metabolitos secundarios con propiedades medicinales, así como lípidos y minerales que aportan nutrientes; además de proteínas y vitaminas beneficiosas para la nutrición. También se investiga su potencial para producir biocombustibles y aprovecharlos como recursos energéticos sostenibles.

El sargazo también puede acumular microplásticos en las áreas costeras, lo que intensifica la contaminación. Eliminar de manera eficiente el sargazo que llega a las playas puede ayudar a combatir la contaminación por plásticos en los ambientes marinos, y constituir por tanto una estrategia de mitigación prometedora en este sentido (Aldana y cols., 2024).

Para mitigar esta problemática, la Secretaría de Marina de México ha estado recolectando sargazo. Sólo en 2022 colectó más de 52 000 toneladas; pero estas actividades exigen costos económicos altos y un gran esfuerzo, y aunque es necesario, no es suficiente para frenar el problema de raíz.

Aún enfrentamos grandes retos tecnológicos y biotecnológicos. Por ejemplo, para procesar el sargazo, primero hay que secarlo y molerlo. El sargazo fresco tiene hasta 87 % de agua, por lo que secarlo consume mucha energía y es costoso económicamente. Por otro lado, el sargazo guarda sales y metales pesados en su biomasa que pueden afectar a los microorganismos que se emplean en los procesos de fermentación. Actualmente, los científicos están desarrollando pretratamientos con ácidos suaves, enzimas y microorganismos especializados que degradan la macroalga sin dañar los azúcares que contiene el sargazo. La investigación actual incluye la aplicación de biorreactores de alta presión, ultrasonido y microondas para romper las paredes celulares del sargazo, pero aún falta hacer más asequibles estos procesos para que sean viables a gran escala.



Digestión anaerobia

Proceso biológico en ausencia de oxígeno en que microorganismos degradan materia orgánica dentro de un reactor cerrado, transformándola en biogás, que es una fuente de energía renovable rica en metano, y digestato, residuo estabilizado con alto valor fertilizante.

Figura 5. Esquema de la gama de productos de valor comercial que pueden obtenerse de los componentes del sargazo.

¿Cómo podemos aprovechar el sargazo?

No todo son malas noticias. Investigadores han estado buscando formas de aprovechar el sargazo. Se ha estudiado la posibilidad de usarlo como materia prima para producir biocombustibles, madera plástica y productos para las industrias química y alimentaria (Tulashie y cols., 2024). Por ejemplo, se puede convertir en bioetanol y biogás (**Figuras 6 y 7**), lo que sería un paso importante tanto para el medio ambiente como para la economía.

Cuando el sargazo se descompone en las playas, apesta y contamina, pero si lo capturamos antes de que llegue a la costa y lo transportamos a tierra firme, lo secamos y lo metemos en un biorreactor cerrado, sin oxígeno, y lo dejamos con microorganismos que lo pueden degradar, ocurre el bioproceso de la **digestión anaerobia**. Estos microorganismos rompen la materia orgánica de la macroalga y se obtiene como producto biogás, que está compuesto principalmente por metano (como el gas natural que usamos

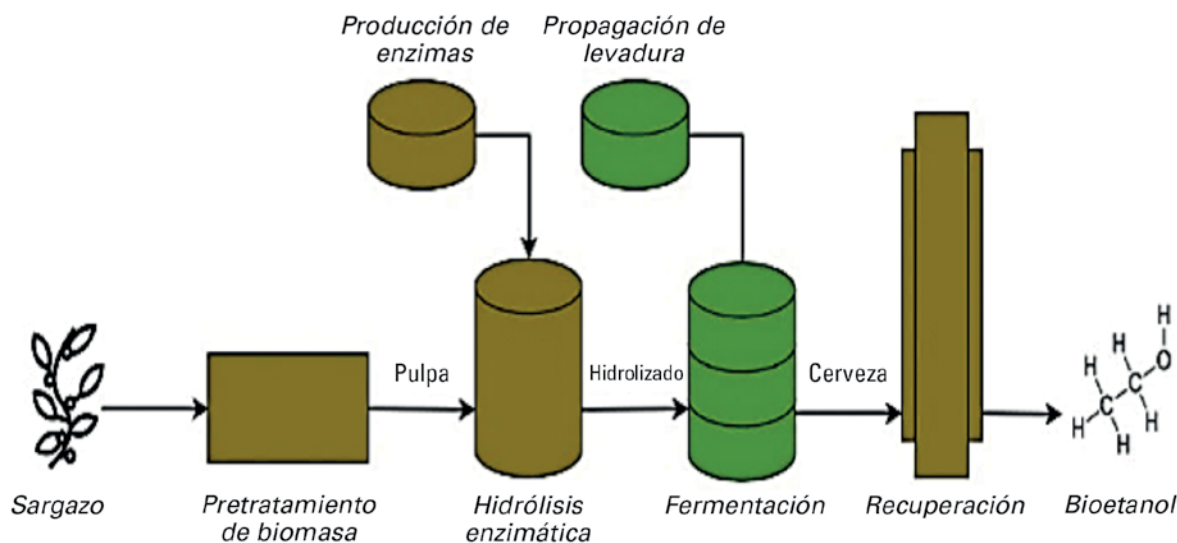


Figura 6. Ruta tecnológica del bioproceso de digestión anaerobia para la producción de bioetanol a partir de sargazo.

comúnmente) y dióxido de carbono. Este proceso no huele mal, no contamina y ofrece energía limpia que se puede usar para cocinar, generar electricidad e incluso para mover vehículos. El problema es que el sargazo tiene metales pesados que, en ocasiones, intoxican a los microorganismos responsables de su degradación. Por esta razón, los científicos están buscando microorganismos resistentes y están mezclando sargazo con otros residuos para mejorar su biodegradación. El residuo que queda de este bioproceso anaerobio se llama digestato y es un excelente abono para enriquecer suelos para la agricultura. Así que de un problema ambiental, se puede obtener

energía, biofertilizante y empleos locales, lo que incentiva la economía circular (López-Aguilar y cols., 2025). Si logramos aprovechar el sargazo y valorizarlo, no sólo reduciremos su acumulación en las costas, sino que también podríamos generar empleo y mejorar la economía local. Eso sí, para que esto funcione se requiere infraestructura adecuada para recolectarlo, procesarlo y comercializarlo.

Impacto social y económico del sargazo

La llegada masiva de sargazo ha golpeado fuertemente a las comunidades costeras. En lugares turísticos

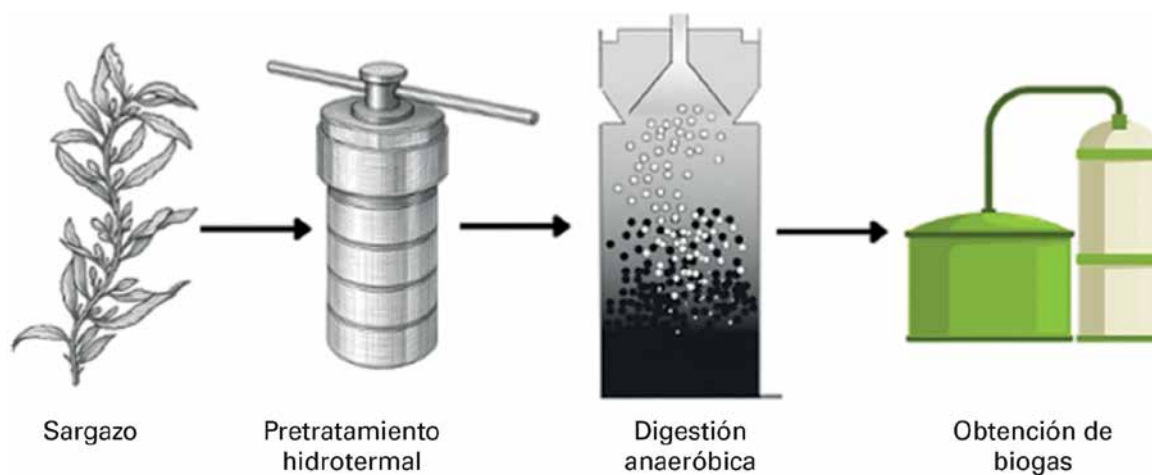


Figura 7. Ruta tecnológica del bioproceso de digestión anaerobia para la producción de biogás a partir de sargazo.

como Cancún y Tulum se han reportado pérdidas económicas enormes debido a la baja asistencia de visitantes, ya que los turistas prefieren evitar playas llenas de sargazo. Esto afecta directamente a los negocios locales que dependen de esta industria.

Esta situación ha incentivado la innovación. Científicos y emprendedores están trabajando en proyectos para convertir el sargazo en algo útil, desde biocombustibles hasta productos sostenibles. El sargazo tiene el potencial de convertirse en una fuente de ingresos en lugar de ser sólo un problema (Orozco-González y cols., 2022).

Mirando al futuro: de la crisis ambiental a la economía circular en el Caribe

El futuro del sargazo en el Caribe mexicano no tiene por qué ser apocalíptico. Hoy sabemos que esta macroalga puede convertirse en biocombustibles, como el bioetanol y el biogás, en plásticos biodegradables, biofertilizantes, alimentos para animales y medicinas. No obstante, para lograrlo a gran escala se requiere de tecnología para recolectar el sargazo a un bajo costo y basada en una logística inteligente

antes de que arribe a las playas; asimismo, se necesitan plantas de procesamiento locales que generen empleos seguros y eviten el transporte del sargazo a largas distancias, de modo que se pueda tratar en donde tiene efectos ambientales adversos. Este esquema estaría completo si se integran las políticas públicas pertinentes con instrumentos legales capaces de financiar la investigación y proporcionar incentivos a empresas con etiquetas verdes en sus procesos.

En un sentido técnico y científico, hay información importante para abordar el manejo del sargazo y generar bioproductos de alto valor comercial, sólo resta que los gobiernos, científicos y empresarios se unan para buscar soluciones sostenibles y se integren en un plan de desarrollo. Es crucial que se implementen políticas públicas que apoyen la recolección y el manejo del sargazo, y que se promuevan la educación y la concientización sobre su impacto. La colaboración entre los sectores público y privado, así como la participación de la comunidad, serán esenciales para enfrentar este reto de manera efectiva y sostenible. Si esto se logra, el sargazo dejará de ser una pesadilla para el turismo y podría convertirse en la base de una economía circular, limpia y próspera para el Caribe mexicano (Moncada y cols., 2016).

Para reflexionar

A primera vista, la llegada masiva de sargazo a las costas del Caribe mexicano representa una grave crisis ambiental. Sin embargo, gracias a los avances en la ciencia y la tecnología, este fenómeno también puede transformarse en una valiosa oportunidad de desarrollo. Es fundamental continuar explorando el potencial de esta macroalga como recurso natural renovable. Por medio del trabajo colaborativo entre comunidades, gobiernos y científicos es posible convertir el sargazo en un aliado estratégico para construir un futuro sustentable en la región. Por el contrario, ignorar esta problemática traerá consecuencias críticas para la biodiversidad marina, el equilibrio de los ecosistemas y la salud pública (Figura 8). Este desafío local está conectado con la salud de todo el planeta. Actualmente, la humanidad lucha por frenar el aumento de la temperatura global

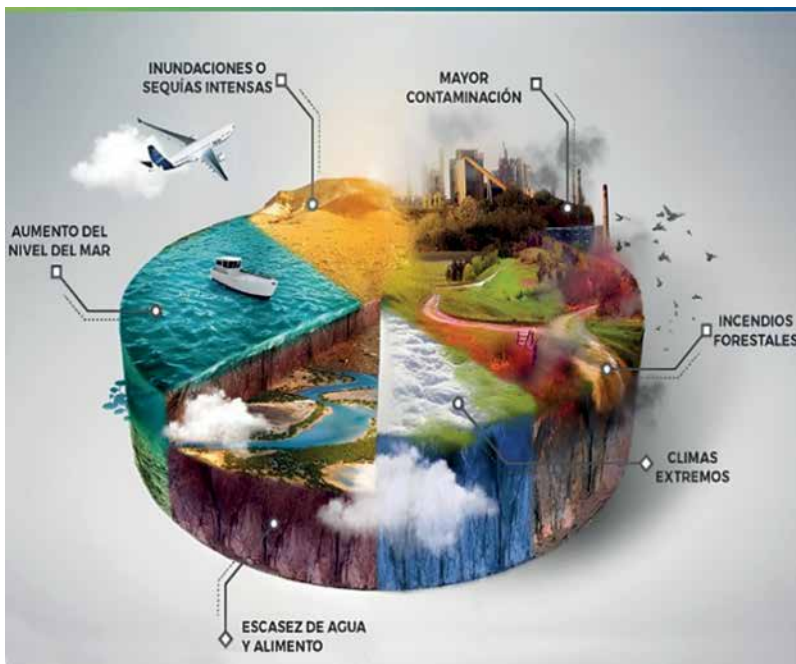


Figura 8. Esquema de las consecuencias ambientales por exceso de gases de efecto invernadero (CO_2 , NO_x , SO_x , etc.), las cuales se tornarían catastróficas por el aumento de la temperatura en el medio ambiente.

por debajo del límite de los 1.5 °C, establecido en el Acuerdo de París de 2016. Aunque el calentamiento actual altera el clima mundial –provocando sequías, inundaciones y cambios en la rotación de la Tierra por el deshielo de los polos–, la crisis del sargazo nos ofrece una oportunidad única para actuar. Al transformar esta macroalga en biocombustibles y bioproductos ecológicos, demostramos que la innovación a través de la aplicación del conocimiento puede ayudar a sanar los océanos. El sargazo no tiene que ser el fin de nuestras playas, puede ser el inicio de una nueva era de energía limpia, resiliencia y armonía con la naturaleza.

Marco A. Domínguez-Aguilar

Dirección de Investigación del Instituto Mexicano del Petróleo.
madoming@imp.mx

Luis Felipe Ramírez-Verduzco

Dirección de Investigación del Instituto Mexicano del Petróleo.
lframir@imp.mx

Norma Icoquih Zapata-Peñasco

Dirección de Investigación del Instituto Mexicano del Petróleo.
izapata@imp.mx



Referencias específicas

- Aldana Arana, D., T. P. Gil Cortés, V. Castillo Escalante y R. E. Rodríguez-Martínez (2024), “Pelagic *Sargassum* as a potential vector for microplastics into coastal ecosystems”, *Phycology*, 4(1):139-152. Disponible en: <https://doi.org/10.3390/phycology4010008>.
- Flores-Contreras, E. A., R. G. Araujo, A. A. Rodríguez-Aguayo, M. Guzmán-Román, J. C. García-Venegas et al. (2023), “Polysaccharides from the *Sargassum* and Brown Algae Genus: extraction, purification, and their potential therapeutic applications”, *Plants*, 12(13):2445. Disponible en: <https://doi.org/10.3390/plants12132445>.
- Govindarajan, A. F., L. Cooney, K. Whittaker, D. Bloch, R. M. Burdorf et al. (2019), “The distribution and mitochondrial genotype of the hydroid *Aglaophenia latecarinata* is correlated with its pelagic *Sargassum* substrate type in the tropical and subtropical western Atlantic Ocean”, *PeerJ*, 7:e7814. Disponible en: <https://doi.org/10.7717/peerj.7814>.
- López-Aguilar, H. A., A. Pérez-Hernández, D. Quiroz-Cardoza, M. de R. Peralta-Pérez, F. J. Zavala-Díaz de la Serna et al. (2025), “Biogas production and evaluation of the potential of sargassum digestate as an agricultural substrate”, *Resources*, 14(10):160. Disponible en: <https://doi.org/10.3390/resources14100160>.
- Moncada, J., V. Aristizábal y C. A. Cardona (2016), “Design strategies for sustainable biorefineries”, *Biochemical Engineering Journal*, 116:122-134. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.bej.2016.06.009>.
- Orozco-González, J. G., F. Amador-Castro, A. R. Gordillo-Sierra, T. García-Cayuela, H. S. Alper et al. (2022), “Opportunities surrounding the use of *Sargassum* biomass as precursor of biogas, bioethanol, and biodiesel production”, *Frontiers in Marine Science*, 8. Disponible en: <https://doi.org/10.3389/fmars.2021.791054>.
- Tulashie, S. K., C. Akonnor Osei, R. Kwofie, M. O. Olorunyomi, H. Attagba et al. (2024), “The potential production of biofuel from *Sargassum* sp.: turning the waste catastrophe into an opportunity”, *Biofuels*, 15(7):849-863. Disponible en: <https://doi.org/10.1080/17597269.2024.2306008>.

El mar profundo ante el cambio climático: impactos en el ecosistema más grande del planeta

Resumen

Hoy día se sabe que el mar profundo, por su extensión en el planeta, tiene un papel importante en la regulación del clima. En él participa la vida marina, micro y macroscópica. Debido al calentamiento global, resultado de la actividad humana, la tendencia del mar profundo es a calentarse, acidificarse y desoxigenarse. Estos cambios amenazan la biodiversidad y comprometen procesos esenciales en el mar profundo para la vida en el planeta.

Abstract

The vast deep sea plays a vital role in regulating our planet's climate through all forms of marine life. Human-caused global warming is now making these deep waters warmer, more acidic, and lower in oxygen. These dangerous changes threaten deep-sea biodiversity and risk vital life-support systems on Earth.

¿Qué es el mar profundo?

Hace poco más de 150 años, el mar profundo, agua y fondo marino a más de 200 metros de profundidad, se consideraba desprovisto de vida por la ausencia de luz que permitiera llevar a cabo fotosíntesis. Este hecho fue cuestionado por diversos académicos involucrados en el tendido de cable telegráfico y su mantenimiento. La controversia suscitada dio inicio a décadas de exploración del ecosistema marino más grande.

La exploración marina del siglo XIX también promovió el desarrollo y la innovación de tecnología que reconoció la dimensión del océano como el más extenso espacio habitable para la vida en el planeta Tierra, donde las aguas y el fondo marino a más de 200 metros de profundidad comprenden un volumen estimado de 1 368 millones de kilómetros cúbicos y una profundidad promedio de 3 800 metros. En este entorno de oscuridad permanente, la temperatura es baja, la vida marina está expuesta a alta presión hidrostática y, en su mayor parte, aquélla depende del alimento producido en la superficie del océano.



A pesar de haber transcurrido más de 150 años de la exploración de este ecosistema remoto y de difícil acceso, se tiene un limitado conocimiento y conciencia de su existencia. La visita a éste de manera física se realiza para fines bélicos y científicos por medio de submarinos y sumergibles (vehículos tripulados) (**Figura 1**) con acceso limitado a un número reducido de personas. A los sumergibles se suman los vehículos de operación remota (vehículos no tripulados) que permiten la observación directa del fondo marino, el registro y la colecta de muestras en los hábitats de mar profundo (**Figura 1**). Ambos tipos de vehículos se encuentran equipados con cámaras –actualmente de alta definición–, instrumentos para el registro de condiciones ambientales como temperatura, profundidad y oxígeno, y herramientas como el procesador de muestras ambientales (ESP, por sus

siglas en inglés) que colecta y analiza *in situ* muestras de agua e identifica la presencia de organismos y toxinas biológicas, o como los brazos robóticos para la colecta de muestras de roca, sedimento y biota. Dependiendo de las características de construcción, algunos vehículos de operación remota pueden alcanzar profundidades de hasta 6 000 metros. El costo para el despliegue de estos equipos de alta tecnología es elevado y requiere de infraestructura única y personal técnico altamente capacitado para su construcción, operación y mantenimiento. Todo ello ha limitado la exploración y el conocimiento sobre el mar profundo.

En 2012, la expedición llevada a cabo por James Cameron en la trinchera de las Marianas en el océano Pacífico occidental –considerado el punto más profundo del océano– descendió a 10 908 metros de

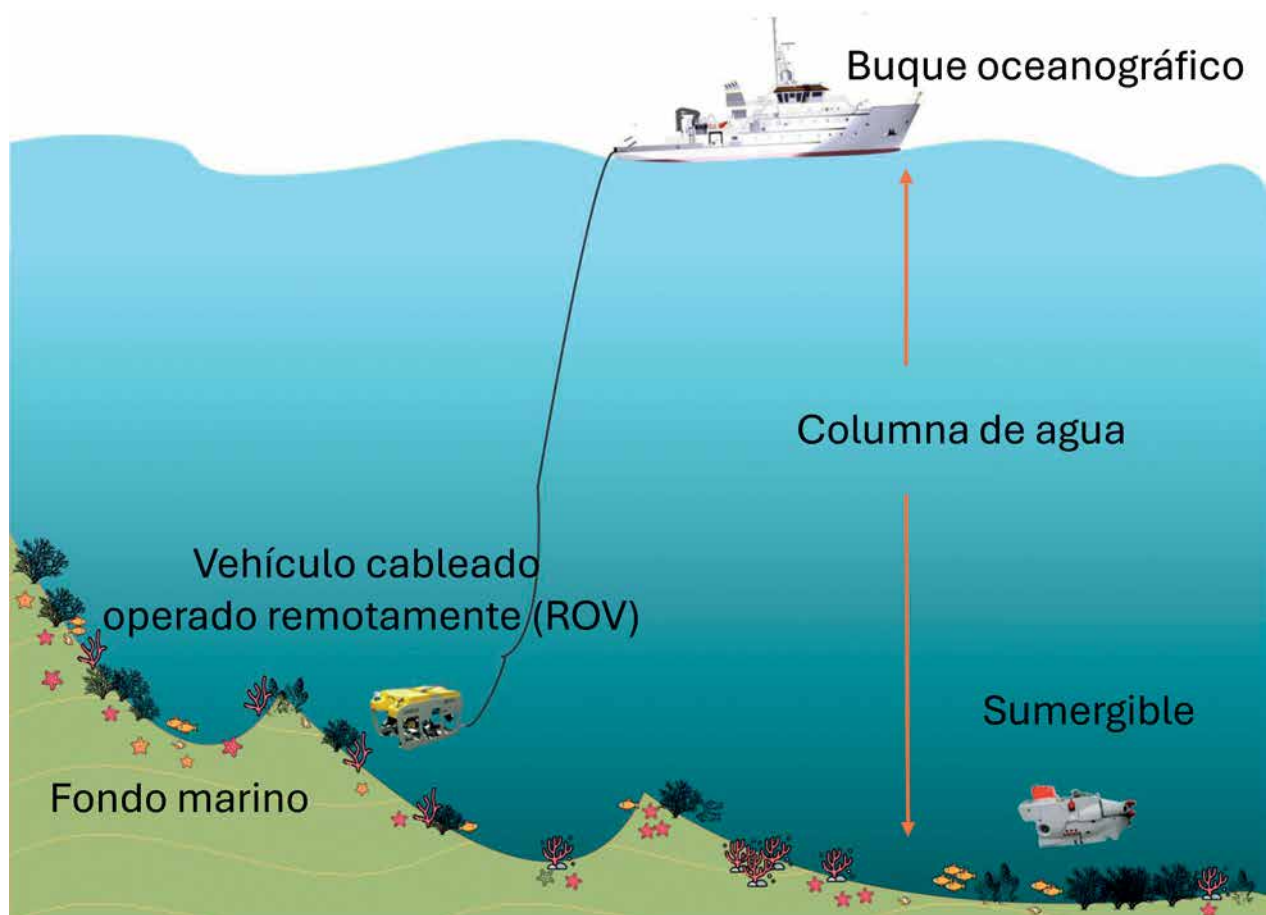


Figura 1. Estudio de la fauna y hábitats en el mar profundo. Ilustración de un sumergible (derecha) y un vehículo de operación remota (izquierda) desplegados desde un buque de investigación oceanográfica. El vehículo de operación remota es controlado desde el buque por cable con capacidad de transmisión de datos y video en tiempo real.

profundidad con el sumergible Deepsea Challenger —que cuenta con un innovador diseño vertical tipo cápsula con capacidad para una sola persona— y confirmó en video la presencia de vida en el lecho marino. Posteriormente, Victor Vescovo llevó a cabo 39 inmersiones documentando los sitios más profundos de cada uno de los cinco océanos.

La exploración del mar profundo en las últimas décadas ha evidenciado la presencia de una gran diversidad de hábitats, como cañones, cordilleras, acantilados y montes submarinos, entre muchos otros, que albergan vida, la mayor parte de la cual ha resultado nueva para la ciencia, por lo que este ecosistema de mayor extensión, de gran estabilidad y más antiguo, caracterizado por especies longevas y endémicas, puede ser uno de los más diversos.

■ Importancia del mar profundo para el planeta

■ En el mar profundo, la biota que lo habita lleva a cabo importantes procesos, entre los que está la filtración de partículas por organismos gelatinosos que habitan el agua y por fauna sésil, anclada en rocas y sustrato duro, que captura las partículas que se depositan en su caída desde la superficie hasta el fondo marino, manteniendo un océano transparente. Los microorganismos degradan la materia orgánica

—conformada principalmente por partículas que provienen de restos del fitoplancton— y la transforman nuevamente en compuestos y elementos básicos para los ciclos de carbono, nitrógeno, fósforo y sílice, entre otros —lo que se denomina **remineralización**—, requeridos en procesos de la zona iluminada del océano. Mucha de la materia orgánica remineralizada en el agua, la depositada en el sedimento y la acumulada en organismos longevos es secuestrada de la atmósfera por más de cien o mil años y tiene un rol fundamental en la regulación del clima de la Tierra. Esto es parte de la bomba biológica en el océano.

El aumento en las cantidades de dióxido de carbono y otros gases de efecto invernadero producidos en la generación de electricidad, transporte, en la industria, la agricultura, la ganadería y en el hogar, ha incrementado la velocidad y la magnitud del calentamiento global. No obstante, se estima que, desde el inicio de la Revolución Industrial en el siglo XVIII hasta el día de hoy, el mar profundo ha capturado alrededor del 30 % del dióxido de carbono atmosférico producido por actividades humanas, así como el 90 % del calor resultante de los cambios en la composición de la atmósfera por efecto de dichas actividades humanas que han iniciado una transformación de las características del océano (**Figura 2**).

◀ Remineralización

Proceso biológico y químico de reciclaje de nutrientes en el océano, en el cual la materia orgánica de la superficie desciende al fondo marino, se descompone y se transforma nuevamente en compuestos inorgánicos simples.



Figura 2. Efectos del calentamiento del océano para el mar profundo y su fauna como resultado del cambio climático provocado por las actividades humanas.

Vulnerabilidad del mar profundo ante el cambio climático

El cambio climático, a través del calentamiento, acidificación y desoxigenación del océano, amenaza la biodiversidad y compromete los servicios naturales que provee el mar profundo (Figura 2). La evidencia actual indica que el calentamiento global incrementa en promedio 0.1 °C cada diez años, aunque este proceso es distinto en las diferentes regiones oceánicas. En aguas mexicanas, existe un registro desde 1970 del incremento gradual de la temperatura (0.017 °C por año) en la costa suroeste de la península de Baja California, lo cual, para el año 2013, correspondía a un incremento de 0.80 °C. Esto ha afectado la abundancia de moluscos y peces de interés comercial, por ejemplo, en Bahía Magdalena, donde se ha observado una disminución de estos recursos pesqueros.

La fauna marina tropical es una de las más sensibles ante el cambio climático debido a que por largo tiempo ha evolucionado en condiciones estables de temperatura; aunque puede ser que responda con cambios metabólicos o modificando su distribución hacia áreas más propicias para mantener una condición fisiológica óptima.

El cambio en la temperatura del océano comúnmente va acompañado de modificaciones en otras variables ambientales. En las aguas marinas tropicales de México, el calentamiento se asocia a una menor disolución de oxígeno y menor aporte de **carbono orgánico particulado** por estratificación térmica (Figura 2), todo ello sumado a una menor capacidad de investigación. Por su ubicación geográfica, el océano en México se estratifica más tiempo. El agua más caliente y menos densa se encuentra en la superficie, el agua más fría y densa se halla por debajo. A mayor temperatura se disuelve menos oxígeno. En el Pacífico oriental se desarrolla de forma natural, entre 25 y a más de 1 500 metros de profundidad, una región de oxígeno bajo conocida como “zona de mínimo oxígeno”, donde los microorganismos agotan casi por completo el oxígeno en el agua y sedimento. Algunas especies de microorganismos y de fauna son tolerantes a las bajas condiciones de oxígeno y prosperan asociadas a éstas o en las fronteras con la zona

oxigenada. Investigaciones realizadas en el Golfo de California, México –en una colaboración entre el Monterey Bay Aquarium Research Institute, de Estados Unidos, y el Instituto de Ciencias del Mar y Limnología de la UNAM–, han registrado densidades elevadas de escualos, bivalvos, nemátodos, corales y esponjas de aguas profundas que toleran las condiciones de la zona de mínimo oxígeno (Figura 3). Con el cambio climático muchas especies se desplazarán a otras regiones más frías, mejor oxigenadas y con mayor cantidad de alimento.

El calentamiento global actúa en sinergia con otros cambios en el océano que afectan el patrón de suministro de alimento proveniente de la superficie (Figura 2). Esto causará impactos en los ecosistemas del mar profundo que dependen en gran parte del suministro de alimento de la superficie. También se verán afectadas algunas especies del mar profundo que tienen larvas que habitan aguas someras y se alimentan en aguas superficiales. La acidificación del océano, sumada a la desoxigenación de las aguas y a las altas temperaturas en los océanos, afecta los jardines de corales y esponjas del mar profundo que forman complejas estructuras tridimensionales y proveen de un hábitat a numerosas especies asociadas (Figura 2). Los corales de aguas profundas crecen unos cuantos milímetros por año y este ritmo lento los hace vulnerables para recuperarse tras los cambios.

Ante estos escenarios, se ha buscado reducir el dióxido de carbono atmosférico mediante diversas estrategias de hundimiento de carbono al mar profundo, pero al momento no se tiene certeza científica de que funcionen en la escala espacial y temporal requeridas. Los modelos predictivos necesarios para conocer la tendencia del calentamiento, la acidificación del océano o la expansión de las zonas de oxígeno mínimo se basan en registros del ambiente marino. El conocimiento y datos de observaciones de largo plazo en diversas localidades con que se cuenta actualmente permiten generar escenarios climáticos.

Las áreas protegidas en el mar profundo son refugios que evitan la pérdida de especies. A la fecha estas áreas protegidas representan menos del 30 % a

Carbono orgánico particulado

Fracción de carbono orgánico originado en la superficie del océano a través de fotosíntesis en suspensión o en descenso hacia el fondo marino, con un tamaño de 0.7 a 10 µm, compuesta por células muertas, heces, detritos y nieve marina.



Figura 3. Corales de aguas profundas. Jardín de corales y esponjas a 849 metros de profundidad en la cuenca de Guaymas, Golfo de California, que habitan en la frontera de la zona oxigenada con la zona de oxigenación reducida. La acidificación y desoxigenación producto del cambio climático podrían causar la pérdida de estos hábitats que son oasis de diversidad. Imagen: Monterey Bay Aquarium Research Institute.

nivel global y en México constituyen el 21.55 %, lo cual contribuye a alcanzar la meta del 2030. Desde 2010 en México se ha decretado como áreas protegidas de mar profundo a ventilas hidrotermales y en 2016 se decretó la Reserva de la Biosfera Pacífico Mexicano Profundo.

El estudio del mar profundo requiere de mayor inversión, de la colaboración entre instituciones de investigación y de instrumentos jurídicos que ayuden a la creación de programas de observación y seguimiento a largo plazo.

Pedro H. López-Garrido

Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación.

pedro_lopez@comunidad.unam.mx

Elva Escobar Briones

Instituto de Ciencias del Mar y Limnología, UNAM.

escobri@cmarl.unam.mx

Referencias específicas

Escobar-Briones, E. (2014a), “¿Qué es el mar profundo?”, en A. Low Pfeng y E. M. Peters Recagno (comps.), *La frontera final: el océano profundo*, México, Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales e Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático, pp. 1-10.

Escobar-Briones, E. (2014b), “Efectos de las actividades humanas sobre el mar profundo: tendencias mundiales y estado actual del conocimiento en la Zona Económica Exclusiva (ZEE) de México”, en A. Low Pfeng y E. M. Peters Recagno (comps.), *La frontera final: el océano profundo*, México, Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales e Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático, pp. 287-304.

Levin, L. A. y N. Le Bris (2015), “The deep ocean under climate change”, *Science*, 6262(350):766-768.

María Dolores Flores Aguilar



De la copia al plagio

Resumen

En este artículo se muestra cómo el proceso de “copiar y pegar” textos ha cambiado a lo largo de la historia de la humanidad, de acuerdo con las tecnologías utilizadas y sus fines. Con el paso de los años y la reciente irrupción de la inteligencia artificial generativa, se ha vuelto necesario que cada persona se conduzca con actitud crítica y respeto por la autoría, para fomentar la autoconfianza y la participación informada en distintas comunidades.

Abstract

This article examines how the practice of “copying and pasting” texts has evolved throughout human history in response to changing technologies and purposes. Over time, and particularly with the recent emergence of generative artificial intelligence, it has become increasingly important for individuals to approach this practice critically and respect authorship, thereby fostering self-confidence and informed participation in diverse communities.

Profesor de la Universidad de Costa Rica detecta uso de ChatGPT en examen y califica con cero a estudiantes.

(Villanueva, 2023)

Desde la invención de la escritura manual hasta el desarrollo de tecnologías como el papel, la tinta y los grandes pasos entre la imprenta y los equipos de cómputo, las funciones de los textos escritos han sido múltiples: han servido para llevar un control de las cuentas por cobrar y pagar, para alfabetizar, enviar mensajes a lugares distantes, para preservar la cultura y el arte, para dar a conocer las noticias, para mantener un registro y difundir los hallazgos científicos, entre muchas otras funciones.

Desde los escribas en el antiguo Egipto a los copistas de la Edad Media, se han tratado de reproducir documentos y libros importantes lo más fielmente posible;



este trabajo ancestral de copia y reproducción de textos era asignado y reconocido públicamente por la labor tan delicada que tenían encomendada quienes la efectuaban. Los escribas y copistas, que preservaban tan cuidadosamente los documentos para la posteridad, se destacaban en la sociedad por sus funciones de artesanos de la escritura.

El reconocimiento de autoría y el plagio

 Aunque el verbo *plagiar* en la actualidad puede tener al menos dos significados diferentes: secuestrar a una persona o copiar algo sin darle crédito a su autor, en este artículo me refiero al plagio¹ como el resultado de copiar sin establecer la fuente original. De tal manera que, si copiamos algo y no reconocemos públicamente que no es de nuestra autoría, podríamos, de acuerdo con las circunstancias, incurrir en el delito de plagio.

El derecho de autor está reconocido en la Declaración Universal de los Derechos Humanos, además de estar protegido por las leyes internacionales. En la actualidad, definir con precisión el plagio y castigar a quien lo comete sigue siendo muy difícil, como se identificó desde hace más de 20 años (Howard, 2000); sobre todo porque el afectado por el plagio debe hacer una denuncia formal y sostenerla ante una autoridad competente, para que se pueda determinar que efectivamente se cometió el mencionado delito y se puedan aplicar las leyes o normas correspondientes. Esto puede llevar a procedimientos complicados y difíciles de dirimir.

De tal manera que, si alguien considera que se han vulnerado sus derechos de autor, puede hacer una denuncia y darle seguimiento ante el organismo que corresponda; mientras que quien comete plagio debe saber que podría ser multado o incluso encarcelado, de acuerdo con lo que dictamine la autoridad.

En cuanto al plagio académico, se pueden clasificar las modalidades de acuerdo con su extensión y complejidad. Están las que implican desde sim-

plemente “copiar y pegar” partes o el total de un documento, hasta otras más complejas, que suelen combinar palabras o párrafos de distintas fuentes, traducir y parafrasear fragmentos, sustituir datos originales con datos falseados, hacer “parches” tomados de distintos textos a lo largo de un documento. Incluso existe el plagio como encargo, que consiste en pagar a otros la escritura de un documento para una tarea en concreto. De tal manera que distinguir con precisión –aun con *softwares* antiplagio– qué partes de un documento son originales de las que no lo son puede ser una tarea ardua y sinuosa. Incluso se puede incurrir en catalogar un texto como un texto plagiado, aunque no lo sea.

En algunas instituciones educativas el plagio académico está precisamente identificado y es posible que quien lo cometa, si es descubierto y denunciado, reciba alguna sanción. Cada escuela, facultad o universidad establece regularmente sus normas y las consecuencias de cometer esta falta.

¿Está bien o está mal si “copio y pego”?

 Ya sea que pertenezcas a la generación silenciosa, a la de los *baby boomers*, a la X, a la de los *millennials*, a la Z o a la Alpha, y que hayas aprendido a leer y escribir con menos tecnologías que las que ahora tenemos al alcance, con seguridad has sido protagonista o espectador del plagio académico en menor o mayor medida.

Antes era común copiar partes de un texto de enciclopedia, de un diccionario o libros escolares en general, del conocido “Rincón del Vago”, de Wikipedia o de las láminas, biografías y estampillas que encargaban en la escuela para hacer tareas. Ése pudo ser tu inicio en la práctica de “copiar y pegar” para hacer la tarea y entregar trabajos escolares.

Pues bien, en el recorrido por la vida escolar, distintas generaciones han “copiado y pegado” de distintas fuentes, desde algunas confiables hasta sitios que falsean la información. No es que pretenda satanizar los materiales didácticos que están al alcance de cualquiera para aprender a leer, escribir e investigar; sin embargo, “copiar y pegar” sin mencionar las fuentes es algo común desde la educación

¹ El *Diccionario de la lengua española* (2023) define el término *plagio* como “Acción o efecto de plagiar (o copiar obras ajenas)”, con sinónimos como: “copia, calco, remedo, reproducción, imitación”.

preescolar, primaria y secundaria o aun en el bachillerato y, en múltiples ocasiones, en los estudios de licenciatura y posgrado, ¿o no?

Al parecer, copiar y pegar en las primeras etapas de la educación escolar no está “mal visto”, no se considera una deshonestidad académica ni una falta a la integridad, y por tanto no está penado pues se entiende que su objetivo, en etapas tempranas de la educación formal, es reproducir lo que alguien más ha dicho con la finalidad de aprender sobre un tema o para aprender a leer y escribir. En general, en los primeros años escolares estamos conscientes de que lo copiado no es un producto original y los destinatarios (profesores y compañeros de escuela) también lo saben. Aquí podemos decir que esta forma de copiar no es un plagio, pues no se identifica como tal ni se considera una mala práctica o está penalizado de forma alguna. Más bien, ese “copiar y pegar” se recompensa en ocasiones si la copia fue fiel al original o si hicimos recortes y añadimos algunas palabras nuestras, o resaltamos lo que nos pareció importante. Tal como sucedía con escribas y copistas en otros tiempos de la humanidad.

■ El juego del escondite y sus consecuencias

■ Pero llegamos a la educación superior y al posgrado y entonces todo se comienza a complicar, porque hay formas de escritura que no son “buenas prácticas” y se espera que seamos originales y, si no lo somos, que cite las fuentes adecuadamente colocando las notas necesarias para dar el crédito a quien corresponda. Entonces puede comenzar el juego del escondite, cuando a veces –cansados de esperar a que llegue esa inspiración que nunca llega–, nos encontramos con contenido que expresa justo lo que necesitamos o lo que estábamos queriendo decir sin éxito. En consecuencia, podemos vernos tentados a simplemente “copiar y pegar”, o a hacer algún tipo de copiado más complejo con la intención de no ser descubiertos en nuestro escondite con fines de acreditación académica.

Las experiencias y las personas con las que convivimos se encargan de enseñarnos distintas formas para alcanzar nuestros objetivos, aunque a veces nos

resistamos a aprender. Transitamos por la educación formal a través de experiencias individuales y colectivas. Así, vamos por la vida recorriendo situaciones que tal vez nos permitan aprender cuáles son las consecuencias agradables o desagradables de nuestras acciones.

■ La autorregulación en la generación de información

■ Si te encargan un ensayo escolar y te dicen que para hacerlo debes leer determinados libros o textos y, al leerlos, te gusta lo que lees, seguramente en algún momento podrás pensar que ya todo está dicho y que está tan bien escrito que mejor lo copias, porque tú ya no tienes nada que aportar. Entonces puedes verte atraído hacia la idea de “copiar y pegar”. Hasta aquí todo estaría bien si copiaras, pegaras y citaras apropiadamente tus fuentes de información, además de opinar o comentar desde tu perspectiva sobre lo leído. Lo mismo pasaría, aunque con mayor complejidad, en el caso de una investigación o una tesis, que tienen procesos, estructuras y contenidos sujetos a mayor rigor.

Sin embargo, si copiamos y no citamos, podemos recibir una mala calificación, no acreditar una asignatura, no concluir una carrera profesional o convertirnos en protagonistas de una noticia escandalosa. Podríamos encontrarnos en graves problemas académicos si fuéramos descubiertos en ese “copiar y pegar” oraciones, párrafos, secciones o documentos completos y los quisiéramos hacer pasar como nuestros. Mientras que, si nadie se da cuenta de nuestra



“trampa”, no pasará nada y solamente quedará en nuestra conciencia lo que hicimos, si acaso con el transcurrir del tiempo lo recordamos.

La inteligencia artificial y la generación de contenido “fácil”

Las herramientas de inteligencia artificial generativa (IAGen) elaboran información estadísticamente probable a partir de preguntas o instrucciones que les da un usuario, con base en grandes cantidades de información no verificada. Por lo tanto, las herramientas de IAGen suelen dar respuestas de dudosa rigurosidad o no confiables, ya sea porque la base de la generación de sus resultados es una mezcla de información falsa e información confiable, o porque llenan vacíos para dar respuestas satisfactorias a los usuarios con referencias que muchas veces no se pueden ubicar, lo que se ha dado por llamar “alucinaciones”.

Actualmente existen múltiples herramientas de inteligencia artificial generativa que nos permiten elaborar rápidamente un escrito, dependiendo de las necesidades que tengamos. Basta con que sepamos exactamente qué queremos que genere (que a veces no es tan sencillo de explicar), la forma en la que lo deseamos y, después, si fuera nuestra costumbre, “copiar y pegar” y ya: la tarea está casi terminada. Solamente tenemos que darle formato, entregarla y nuestro problema estará resuelto con gran velocidad.

Sin embargo, al no tener certidumbre de los complejos procesos que se dan para la generación de los resultados que hasta ahora ofrece la IAGen, estamos en posibilidad de incurrir en errores, falsos positivos e irreproducibilidad de hallazgos, tal como se señala en un estudio presentado en la revista *Nature* (Van Noorden y Perkel, 2023).

Es decir, si no revisamos críticamente las respuestas de la inteligencia artificial generativa podríamos estar tomando datos e información falsos como verdaderos y no ser capaces de identificar las fuentes de donde se obtuvo la información, por lo que estaremos incurriendo también en plagio, sobre todo al no reconocer que hemos utilizado la IAGen para

hacer una tarea y cuando no hemos revisado y contrastado sus respuestas con fuentes confiables.

¿Seguiremos jugando al escondite con el uso de la inteligencia artificial?

Uno de los más populares juegos infantiles es el de “las escondidas” o “juego del escondite”, que aprendemos con nuestros familiares y amistades cuando somos pequeños y suele ser divertido. En este juego, a una corta edad, es muy importante que nos encuentren, porque si no es así podemos sentirnos verdaderamente perdidos y frustrados. Pero cuando comenzamos a crecer y lo jugamos, lo importante es que no nos encuentren, que tengamos el mejor escondite y que no nos descubran, o ser el último en salir de la guarida.

Si somos estudiantes podríamos pensar que el juego del escondite es el que jugamos cuando no queremos que alguien copie nuestras respuestas en un examen o cuando no deseamos que nuestros profesores se den cuenta de que hicimos trampa al presentar un trabajo. Mientras que si somos profesores deseamos principalmente que nuestros estudiantes aprendan y que todo lo que presentan sea producto de ese aprendizaje y no el resultado de copiar por ahí o por allá. Hay una gran diferencia entre usar la tecnología para apoyarnos al aprender y usarla para hacer trampa (Eaton, 2023). En este juego de ver quién resulta descubierto y quién atrapa a quien trata de engañar sobre la autoría de un documento, es necesario reconocer cuáles son las razones para tratar de ser original.

Lo que hasta hace muy poco era imposible, hoy día, con la IAGen, es aparentemente simple; resulta sencillo hacer trampa y nos toma menos tiempo generar textos completos. Sin embargo, tenemos que convencernos de que el no dar el crédito correspondiente a los autores originales –o no indicar los procedimientos con los que generamos la información– puede provocar inseguridad y desconfianza en nuestras ideas y conocimientos, además de arriesgarnos a sufrir las consecuencias por nuestras faltas.

En la escalada de buscar quién copia y cómo lo hace, las instituciones educativas han adoptado he-



ramientas de inteligencia artificial (como Turnitin o Grammarly) para detectar similitudes en la entrega de trabajos académicos (Ibarra y cols., 2023), además de insistir en la promoción de buenas prácticas y adaptar su normatividad.

■ Dejar de jugar a las escondidas

■ Hacer el esfuerzo de tener nuestra propia voz, ser creativos, analíticos y críticos se valora en distintos grupos y comunidades; asimismo, nos permite mejo-

rar nuestra autoestima y fortalecer nuestro conocimiento. Expresar nuestra opinión fundamentándola con información que dominamos nos permite forjar nuestro conocimiento. De tal forma que la integridad académica reside en la posibilidad de afirmar, sin dudar, “esta idea es mía”.

De ahí que, ya sea que suelas “copiar y pegar” en mayor o menor medida o que uses ChatGPT, Claude, Copilot, DeepSeek, Gemini, Meta AI, Perplexity o cualquier otra herramienta de IAGen que conozcas o que surja en las próximas semanas, meses o años, es indispensable que partas de ideas originales, que identifiques claramente las fuentes de información –además de citarlas y referenciarlas adecuadamente– y que las contrastes con información confiable. Esto te permitirá hacer un uso ético de las herramientas, tener dominio de lo que sabes, justificar tus decisiones y dejar de jugar a las escondidas indiscriminadamente con los trabajos académicos.

María Dolores Flores Aguilar

Instituto Tecnológico de Mazatlán, Tecnológico Nacional de México.

maria.fa@mazatlan.tecnm.mx

Referencias específicas

- Eaton, S. E. (2023), “Artificial intelligence and academic integrity, post-plagiarism”, *University World News* [en línea]. Disponible en: <https://www.universityworldnews.com/post.php?story=20230228133041549>, consultado el 23 de julio de 2026.
- Howard, R. M. (2000), “Sexuality, Textuality: The Cultural Work of Plagiarism”, *College English*, 62(4):473. Disponible en <https://doi.org/10.2307/378866>.
- Ibarra Beltrán, Á. de J., Z. Aguayo Álvarez y R. E. Velázquez García (2023), “Desmitificando el plagio digital: percepciones y realidades de la ética estudiantil desde el Centro Universitario de Tonalá”, *LATAM Revista Latinoamericana de Ciencias Sociales y Humanidades*, 4(5):1418-1431. Disponible en: <https://revistalatam.redilat.org/index.php/lt/article/view/desmitificando-plagio-digital-percepciones-realidades-etica/1743>, consultado el 23 de julio de 2026.
- RAE (2023). “Plagio”, *Diccionario de la lengua española*, 23ª ed., Real Academia Española [en línea]. Disponible en: <https://dle.rae.es/plagio>, consultado el 23 de julio de 2026.
- Van Noorden, R. y J. M. Perkel (2023), “AI and science: What 1,600 researchers think”, *Nature*, 621(7980):672-675, Disponible en: https://www.edithlaszky.eu/WorkProductList/WUR/OnSemanticWeb/pdf/nature20230927_AI_and_science.pdf, consultado el 23 de julio de 2026.
- Villanueva, D. (2023), “Profesor de la Universidad de Costa Rica detecta uso de ChatGPT en examen y califica con cero a estudiantes”, *CNN Latinoamérica* [en línea]. Disponible en: [https://cnnespanol.cnn.com/2023/07/12/profesor-costa-rica-chatgpt-examen-estudiantes-orix#:~:text=\(CNN%20Espa%C3%B1ol\)%20E2%80%9320Dieciocho%20estudiantes,este%20centro%20de%20ense%C3%B1anza%20superior](https://cnnespanol.cnn.com/2023/07/12/profesor-costa-rica-chatgpt-examen-estudiantes-orix#:~:text=(CNN%20Espa%C3%B1ol)%20E2%80%9320Dieciocho%20estudiantes,este%20centro%20de%20ense%C3%B1anza%20superior), consultado el 23 de julio de 2026.



Casa abierta al tiempo

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA METROPOLITANA

En el cuarto número del año, en la sección **Desde la UAM**, nos adentramos en la extraordinaria investigación médica que se realiza en la Casa Abierta al Tiempo, con miras a la apertura de la nueva Licenciatura en Medicina en la UAM Iztapalapa en 2027.

En el artículo titulado **El enemigo invisible de tu corazón: lo que la diabetes le puede hacer a tus latidos**, la doctora Julieta Anabell Díaz Juárez y su equipo abordan cómo la diabetes daña de manera silenciosa la función del corazón hasta desencadenar miocardiopatía diabética e insuficiencia cardíaca. Más allá de subrayar la importancia del estilo de vida y la prevención, se presentan las investigaciones más recientes del Departamento de Atención a la Salud de la UAM: una propuesta terapéutica innovadora que recurre al uso de nanopartículas (exosomas) y terapia génica para recuperar la fuerza de contracción del tejido cardíaco de forma precisa y poco invasiva.

Luis Enrique Gómez Quiroz y su equipo abordan en **La revolución de la medicina traslacional, una nueva esperanza**, el papel fundamental de la medicina traslacional como un puente directo y bidireccional entre los descubrimientos de laboratorio y la cama del paciente. A través del análisis de herramientas moleculares de vanguardia –tales como la secuenciación de nueva generación, la edición genética CRISPR/Cas9, las terapias dirigidas, la inmunoterapia CAR-T y las biopsias líquidas–, ilustran cómo la investigación básica transforma de manera radical el diagnóstico temprano y el tratamiento personalizado de enfermedades complejas como el cáncer.

En **¿Qué más pone en riesgo el corazón de los mexicanos? El descubrimiento de nuevos factores de riesgo cardiovascular**, Luis Manuel Amezcua Guerra ahonda en los resultados obtenidos en el estudio de cohorte Tlalpan 2020 en conjunto con el Instituto Nacional de Cardiología Ignacio Chávez. El artículo explora factores biológicos no convencionales que influyen en el desarrollo de afecciones cardiovasculares en adultos mexicanos. Asimismo, el texto analiza detalladamente el papel de la lipoproteína(a), el urato sérico y el óxido de trimetilamina para demostrar cómo la herencia genética, el estado metabólico y la microbiota intestinal aportan información clave sobre la salud de las arterias, destacando la relevancia de generar evidencia médica adaptada a las características de nuestra población.

Finalmente, Arturo Simoni-Nieves, con su colaboración titulada **Inmunoterapia: la nueva esperanza contra el cáncer alimentado por la obesidad**, expone cómo el entorno inflamatorio provocado por la obesidad protege a las células tumorales e interfiere con los tratamientos convencionales contra el cáncer. Para contrarrestar esta problemática, el autor describe el funcionamiento de los anticuerpos biespecíficos: moléculas diseñadas para unir de manera precisa las células tumorales con los linfocitos T del sistema inmunitario, ofreciendo alternativas prometedoras y de alta especificidad para combatir tumores de hígado, pulmón y ovario.

DR. MARIO DE LEO WINKLER
Director de Comunicación del Conocimiento, UAM



Julieta Anabell Díaz Juárez, Leoncio Morel Díaz y Arizbell Morel Díaz



El enemigo invisible de tu corazón: lo que la diabetes le puede hacer a tus latidos

Resumen

La diabetes es una *enfermedad metabólica* caracterizada por hiperglucemia. Cuando quienes la padecen no reciben un tratamiento oportuno y eficaz, aparecen complicaciones que afectan a varios órganos. De manera silenciosa el principal órgano perjudicado es el corazón. En este artículo se presenta una terapia innovadora con nanopartículas llamadas *exosomas*, así como la aplicación de la terapia génica dirigida a los sistemas enzimáticos dañados por la diabetes.

Abstract

Diabetes is a *metabolic disorder* characterized by hyperglycemia. When patients do not receive timely and effective treatment, complications affecting multiple organs arise. Silently, the primary organ affected is the heart. This review presents an innovative therapeutic approach utilizing nanoparticles called *exosomes*, alongside targeted gene therapy directed at the enzymatic systems impaired by diabetes, aiming to achieve a more efficacious treatment.

Introducción

En México, las enfermedades del corazón son la primera causa de muerte en adultos, y la diabetes ocupa el segundo lugar a nivel nacional, de acuerdo con las estadísticas realizadas en 2025, para ambos sexos, por el Instituto Nacional de Estadística y Geografía. En el año 2021, el mismo Instituto registró que la principal causa de muerte en mujeres eran las enfermedades cardiovasculares, las cuales superaron las defunciones por COVID-19. Estos datos alarmantes han generado la necesidad de nuevos tratamientos que puedan contribuir a disminuir las causas que dañan el corazón.

La diabetes mellitus se caracteriza por **hiperglucemia** crónica que, cuando no se controla adecuadamente mediante modificaciones en el estilo de vida (dieta y

Hiperglucemia

Niveles altos de azúcar (glucosa) en la sangre.

ejercicio) o medicamentos, desencadena un proceso de eventos microscópicos nocivos. Estas pequeñas lesiones no se pueden detectar en una consulta médica ni con aparatos que puedan medirlas, sino hasta que provocan un daño macroscópico, es decir, visible y medible. Al ocurrir esto, el corazón –que funciona como una bomba– pierde la fuerza y el ritmo para expulsar la sangre a todo el cuerpo. Para entonces ya es muy tarde porque aparece la insuficiencia cardíaca por diabetes, también llamada miocardiopatía diabética. Esta enfermedad es el principal enemigo del corazón, ya que lo afecta de manera invisible, provocando que disminuyan los nutrientes y el oxígeno en todo el cuerpo. La persona que padece esta enfermedad comienza a manifestar una sensación de falta de aire y cansancio extremo (**Figura 1**), que en medicina se denomina *disnea*. Si la persona diabética permanece mucho tiempo inactiva (sedentarismo), no cambia la alimentación, no toma sus medicamentos o no se inyecta la insulina, la disnea puede progresar hasta el grado en que actividades diarias, como vestirse o comer, causan fatiga. Por el contrario, si a pesar de padecer diabetes, se siguen las medidas dietéticas, se realiza ejercicio y se lleva un estricto control médico, la posibilidad de daño cardíaco disminuye considerablemente. A pesar de los avances en el tratamiento convencional, surgen día a día nuevos casos de miocardiopatía diabética. Por este motivo es prioritario investigar tratamientos efectivos, dirigidos y poco invasivos para mejorar

la calidad de vida de las personas afectadas por esta enfermedad.

■ **Objetivo de la investigación**

■ La investigación que se realiza en la Universidad Autónoma Metropolitana en el área de salud pretende contribuir a la resolución de problemas prioritarios para el país. Dada la necesidad de frenar la enfermedad cardíaca por diabetes, en el Departamento de Atención a la Salud de la UAM estamos comprometidos con la sociedad para generar nuevas metodologías que contribuyan a disminuir la mortalidad por diabetes, por lo que el principal objetivo es investigar la eficacia de **nanopartículas**, como los **exosomas**, y la **terapia génica** dirigida a la producción de energía para mejorar la contractilidad cardíaca en el corazón diabético.

■ **Metodologías de la investigación**

■ Para contraerse, el corazón requiere de energía que se obtiene de las mitocondrias. Una mitocondria es un orgánulo que se encuentra dentro de la célula y su función es producir gran parte de la energía que el cuerpo necesita para funcionar. Además, para que el músculo cardíaco se contraiga adecuadamente, es necesario un control preciso del calcio dentro de las células del corazón. Diversas proteínas participan en este proceso al permitir la entrada, liberación y recap-

◀ **Nanopartículas**

Estructuras microscópicas extremadamente pequeñas.

Exosomas

Pequeñas vesículas, no visibles, que son liberadas por las células. Sirven como mensajeros que transportan proteínas, lípidos y material genético para regenerar tejidos, para estimular el crecimiento y para mantener viva a la célula.

Terapia génica

Técnica de medicina experimental que modifica genes dentro de las células de una persona para el tratamiento y curación de una enfermedad.

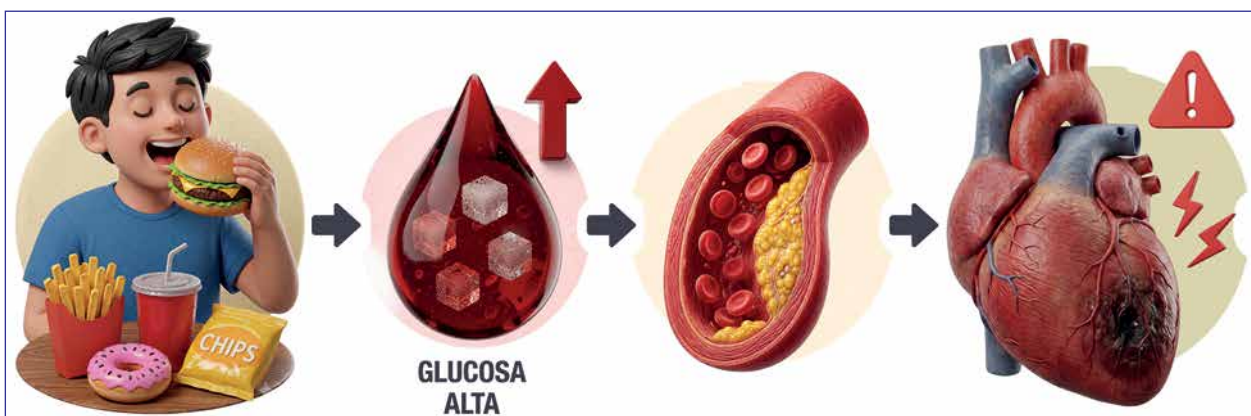


Figura 1. Relación entre una alimentación poco saludable, el aumento de la glucosa en sangre, el daño de los vasos sanguíneos y las alteraciones cardíacas asociadas con la diabetes. La hiperglucemia sostenida puede favorecer cambios en los vasos sanguíneos y contribuir al daño cardiovascular. Imagen: Anabell Díaz Juárez y Joaquín González Vázquez, con apoyo de inteligencia artificial.

Adenovirus
 Virus de material genético, de tamaño mediano, que pueden llevar sustancias sanas al interior de las células.

tación del calcio; cuando este mecanismo se altera, la fuerza de contracción del corazón puede disminuir.

En nuestra investigación se utilizaron animales de laboratorio a los cuales se les provocó diabetes.

Posteriormente, se administró un **adenovirus** modificado que se utilizó como vehículo para introducir material genético de interés en las células. Estos vectores pueden introducir genes en células del corazón sin integrarse al material genético de la célula y, en este tipo de investigación, permiten estudiar los efectos de modificar la producción de determinadas proteínas. Después, se midieron las proteínas contráctiles, es decir, proteínas como la actina y la miosina que permiten que las células musculares del corazón se acorten y generen fuerza. Estas proteínas son fundamentales para que el corazón pueda contraerse y bombear sangre adecuadamente.

También se obtuvieron exosomas de animales sanos y se administraron a los animales con diabetes. Los exosomas son pequeñas vesículas que las células utilizan para comunicarse y que pueden transportar proteínas, lípidos y material genético; por ello, los exosomas provenientes de células sanas pueden llevar moléculas capaces de modificar procesos celulares alterados por la diabetes.

En conjunto, los resultados mostraron una mejoría en el bombeo del corazón después de ambos tratamientos. En el caso de los exosomas, su posible efecto beneficioso se relaciona con su capacidad para transportar moléculas que participan en la comunicación entre células y que pueden ayudar a recuperar procesos alterados en el corazón diabético, entre ellos el manejo del calcio y otros mecanismos relacionados con la contracción cardíaca.

Innovación de la investigación

La aplicación de exosomas y de terapia génica dirigida a tratar moléculas afectadas por la diabetes es un cambio en la medicina convencional que explora una nueva manera de abordaje terapéutico, basado en la aplicación de metodologías de investigación biomédica para mejorar la calidad de vida y el pronóstico de los pacientes diabéticos en México y en el resto del mundo.

Incidencia social

Debido a que la diabetes es una enfermedad cuyo desarrollo se caracteriza por ser un proceso lento y sigiloso, la detección y prevención es fundamental. De ahí que la mejor manera de tratar este trastorno sea evitarlo. Pero ¿cómo podemos prevenir un padecimiento que no vemos? ¿Cómo nos afecta colectivamente que no se hable de diabetes?

Para contestar la primera pregunta, es necesario tener en cuenta que la manera más eficiente de evitar la diabetes es con un estilo de vida saludable; es decir, comer verduras, frutas, proteínas suficientes; tomar agua; realizar actividad física constante y evitar lo más posible el consumo de azúcares procesadas en nuestro día a día. Si bien no se trata de eliminar por completo aquellos alimentos que nos producen placer, es primordial restringir su ingesta en grandes cantidades. Una rebanada de pastel no es garantía de enfermedad, pero un postre familiar completo cada dos días sí que lo es. Asimismo, las bebidas azucaradas como refrescos, *frappés* o *smoothies* también contienen un exceso de edulcorantes que a largo plazo provocan diabetes y, por lo tanto, daños al corazón. De ahí que llevar una dieta balanceada sea una de las mejores formas de prevención que existen. No obstante, es importante recordar que la asesoría profesional es vital cuando se realiza un



cambio tan drástico en la alimentación: eliminar alimentos de la dieta tampoco es necesariamente garantía de salud.

Ahora bien, respecto a la actividad física, es relevante recordar que gran parte de los trabajos actuales conllevan un estilo de vida sedentario. Por esta razón, es primordial recalcar la importancia de realizar actividad física constante. Si bien la cantidad de movimiento varía de acuerdo con la edad, el peso y el estilo de vida, incrementar la frecuencia de la activación física es fundamental en la prevención de enfermedades como la diabetes.

■ Conclusión

■ Los tratamientos con exosomas y terapia génica son una alternativa menos invasiva y más precisa para mejorar la contractilidad cardíaca en la diabetes, con el potencial de reducir las complicaciones por esta enfermedad. Sin embargo, su implementación en el área clínica aún enfrenta varios desafíos que disminuirán a medida que se desarrolle investigación de frontera para administrar una terapia eficaz y segura.

Julieta Anabell Díaz Juárez

Universidad Autónoma Metropolitana Xochimilco.
jdiazj@correo.xoc.uam.mx

Leoncio Morel Díaz

Facultad de Medicina, Universidad Nacional Autónoma de México.
leoncio.moreldiaz@gmail.com

Arizbell Morel Díaz

Universidad Autónoma Metropolitana Azcapotzalco.
al2243804606@azc.uam.mx



Lecturas recomendadas

Canal Diabetes (s. f.), “El corazón diabético”, *Canal Diabetes* [en línea]. Disponible en: <<https://canaldiabetes.com/el-corazon-diabetico/>>, consultado el 30 de agosto de 2026.

Crowe, A. (s. f.), “La diabetes afecta el riesgo de insuficiencia cardíaca y su progresión”, *American Diabetes Association* [en línea]. Disponible en: <<https://diabetes.org/es/salud-bienestar/diabetes-y-corazon/la-diabetes-afecta-la-insuficiencia-cardiaca>>, consultado el 30 de agosto de 2026.

Federación Mexicana de Diabetes (2018), “Corazón y diabetes”, *Federación Mexicana de Diabetes A. C.* [en línea]. Disponible en: <<https://fmdiabetes.org/corazon-y-diabetes/>>, consultado el 30 de agosto de 2026.

González-Manzanares, R. (2026), “Insuficiencia cardíaca y diabetes mellitus: comprendiendo esta estrecha relación y el nuevo paradigma de tratamiento”, *Diabetes*, 99. Disponible en: <<https://www.revistadiabetes.org/wp-content/uploads/Insuficiencia-Cardiaca-y-Diabetes-Mellitus-comprendiendo-esta-e.pdf>>, consultado el 30 de agosto de 2026.



Jaqueline Quevedo Ocampo, Maciel Juárez Ángeles y Luis E. Gómez Quiroz



La revolución de la medicina traslacional, una nueva esperanza

Resumen

Para ofrecer mejores beneficios a los pacientes con enfermedades complejas como el cáncer, la ciencia básica y la clínica deben colaborar estrechamente. Aunque el trabajo comienza en un laboratorio de investigación, responde a una necesidad clínica. Los avances recientes en medicina han seguido esta lógica, ahora conocida como medicina traslacional. No es una ciencia nueva en sí, sino una forma más estructurada de aplicar los descubrimientos científicos en la atención del paciente. En este trabajo, se presentan algunos de los avances más recientes en esta disciplina.

Abstract

To provide better benefits to patients with complex diseases like cancer, basic science and clinical practice must work closely together. Although the work begins in a research laboratory, it responds to a clinical need. Recent advances in medicine have followed this logic, now known as translational medicine. It is not a new science *per se*, but a more structured way of applying scientific discoveries to patient care. In this article, some of the most recent advances in this discipline are presented.

Introducción

Imagina que estás en un laberinto oscuro y tienes dos opciones: intentar salir corriendo a ciegas, esperando tener suerte, o encender una linterna que revele las paredes y, con el tiempo, la puerta de salida. Durante décadas, la lucha contra enfermedades complejas como el cáncer se pareció mucho a la primera opción. Los médicos aplicaban, como única opción, tratamientos generalizados –como la quimioterapia tradicional– que atacaban tanto las células malignas –las cuales se duplican rápidamente– como las sanas, con serios efectos secundarios.

Hoy la historia es distinta gracias a una aliada silenciosa pero implacable: la ciencia básica. Cuando una persona científica –un especialista en biología expe-

rimental, por ejemplo— pasa años estudiando el comportamiento de una proteína empleando tubitos, geles, células en platos de Petri, está, en realidad, fabricando las baterías que darán energía a esa linterna.

El puente que conecta esos descubrimientos abstractos de laboratorio con el tratamiento que recibe un paciente en el hospital se conoce como *medicina traslacional*.

Del laboratorio a la cama del paciente: el poder de la medicina traslacional

La medicina traslacional debe entenderse como una disciplina que, desde su origen, busca aplicar el conocimiento en la práctica clínica. No consiste en hacer ciencia básica primero y luego buscar su aplicación. La investigación más eficaz en medicina es aquella que lleva rápidamente sus avances a la persona paciente para resolver su problema. Para lograr esto, es crucial que, desde las primeras etapas, la investigación tenga claro este objetivo, ya que así se pueden identificar posibles problemas y anticipar la utilización de modelos adecuados para

aplicar los descubrimientos con prontitud. Además, es importante destacar que la comunicación en este proceso debe ser bidireccional (**Figura 1**): lo observado en la clínica debe regresar al laboratorio, lo que permite realizar ajustes que mejoren los tratamientos, los métodos de diagnóstico temprano o la precisión de los pronósticos. Otra característica de la medicina traslacional es que se nutre de distintas visiones; es decir, es interdisciplinaria, no es una ciencia aislada.

En los últimos años, gracias a los avances en genómica —es decir, en el estudio de los genes y sus implicaciones biológicas— y en medicina molecular, este puente ha convertido al cáncer, que antes constituía una sentencia casi inevitable, en un problema de ingeniería biológica que estamos empezando a resolver.

La revolución genómica: enfoquémonos en las moléculas

Históricamente, el cáncer se clasificaba y trataba según el órgano en el que aparecía: cáncer de pulmón, de mama, de colon. Actualmente, las pla-

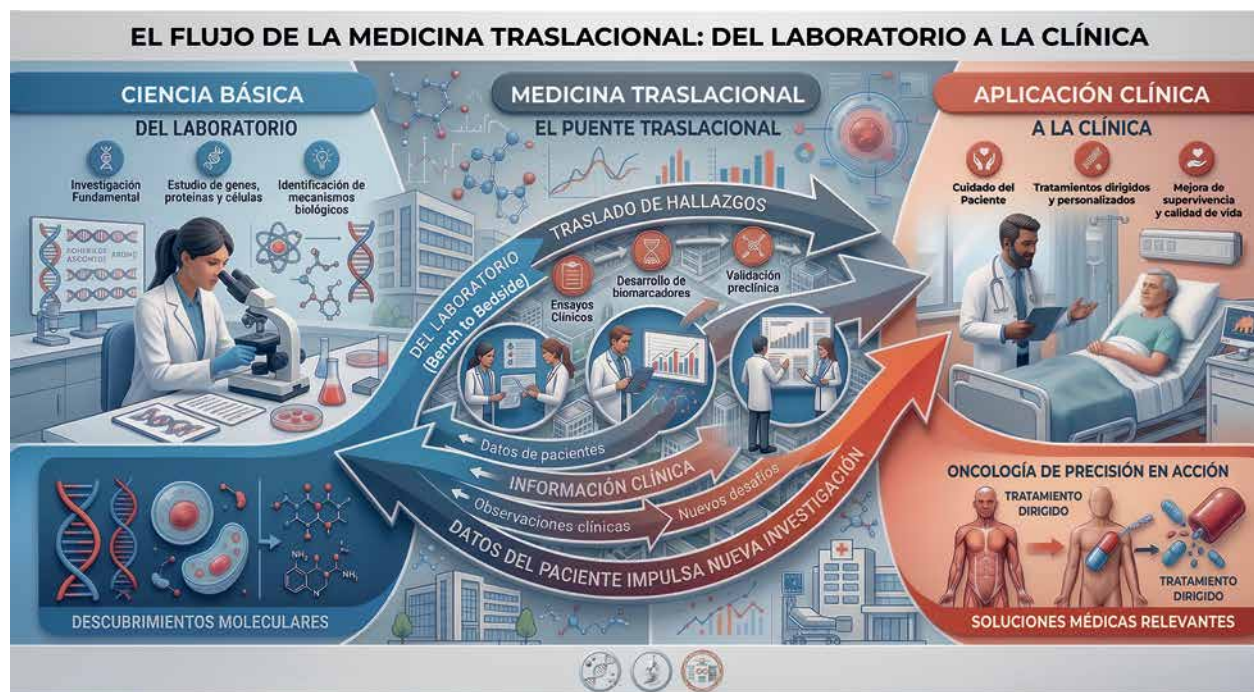


Figura 1. El flujo de la medicina traslacional: del laboratorio a la clínica y su retorno a la investigación básica. Imagen: Luis E. Gómez Quiroz y Joaquín González, con la asistencia de inteligencia artificial.



KRAS

Gen que codifica la proteína homóloga del oncogén viral del sarcoma de rata de Kirsten. Un oncogén codifica una proteína que confiere ventajas a la célula cancerosa, como la proliferación o la resistencia a la muerte celular.

taformas de secuenciación de última generación (NGS, *next-generation sequencing*) pueden leer el orden preciso de nucleótidos del genoma completo de un tumor en sólo unas horas y a una fracción del costo que representaba hace diez años. La secuenciación del ADN o del ARN (su intermediario molecular antes de convertirse en una proteína funcional) nos ha revelado que dos tumores en el mismo órgano pueden ser completamente diferentes entre sí. Gracias a la secuenciación, sabemos que un cáncer de colon y uno de vesícula biliar pueden compartir una huella o un perfil molecular muy similares, lo que permite emplear terapias igualmente similares.

Actualmente, secuenciamos el ADN o el ARN de los tumores para identificar sus vulnerabilidades y fortalezas. Ya no dirigimos el enfoque terapéutico al órgano, sino a la mutación o a los genes descontrolados. Por otro lado, la medicina contemporánea también busca anticiparse a la enfermedad y personalizar el tratamiento según la huella molecular específica de cada paciente.

A modo de ejemplo, destacamos algunos avances de la medicina molecular para un diagnóstico oportuno y una terapia de precisión.

CRISPR

Del inglés *clustered regularly interspaced short palindromic repeats*. Secuencias palindrómicas cortas, es decir, que se leen igual en un sentido o en el otro. Estas secuencias se repiten y se agrupan regularmente.

CRISPR/Cas9: reescribiendo el código genético

Si hay una tecnología que encabeza esta revolución, es la edición genética mediante CRISPR/Cas9.

Nacida como un sistema de defensa bacteriano, hoy funciona como unas tijeras moleculares que editan el ADN con altísima precisión, ayudando a la investigación y a la búsqueda de mejores tratamientos para enfermedades.

Los últimos avances en esta tecnología van más allá de cortar el ADN: ahora incluyen edición de alta calidad y alta especificidad. En la práctica, esto está abriendo la puerta a curas definitivas para enfermedades monogénicas —es decir, que se deben a fallos en un solo gen, como la anemia falciforme o la distrofia muscular— y permitiendo desactivar oncogenes específicos —genes que favorecen el cáncer cuando se alteran, como **KRAS**, que regula la duplicación celular anómala— en tumores antes considerados intratables.

En la Universidad Autónoma Metropolitana, en el área de medicina experimental y traslacional, se utiliza la tecnología CRISPR /Cas9 para inhibir una enzima implicada en el ciclo de moléculas llamadas folatos. Estas moléculas regulan diversos procesos esenciales para la resistencia a morir de la célula cancerosa, lo que ofrece ventajas para el tratamiento del cáncer de hígado, especialmente en los casos en que presenta exceso de grasa (esteatosis). Los resultados en organismos vivos han sido muy positivos; aunque todavía en fase preclínica, la investigación ha sido diseñada desde el principio con la intención de llegar a pacientes lo antes posible.

Terapias dirigidas

En lugar de bombardear todo el cuerpo, como lo hacen la radio o la quimioterapia, las y los científicos han identificado los receptores específicos que las células cancerosas utilizan para multiplicarse sin control. Esto se basa en medicamentos que actúan como “llaves maestras” y bloquean las moléculas que confieren ventajas al tumor. Por ejemplo, en ciertos tipos de cáncer de pulmón, estos medicamentos logran reducir específicamente los tumores, con efectos secundarios mínimos en comparación con la quimioterapia, que también afecta a las células sanas. La persona se toma una pastilla en casa en lugar de pasar horas conectada a una infusión intravenosa en el hospital.

Inmunoterapia y células CAR-T: reprogramando nuestras defensas

El cáncer es hábil para adaptarse cuando es atacado y para evitar que el sistema inmunitario lo detecte. La ciencia básica ha revelado cómo funciona este mecanismo de camuflaje, conocido como “puntos de control inmunitario”. El progreso en este campo de investigación consiste en inhibidores de PD-1/PD-L1, que eliminan esa capa de invisibilidad, lo que permite que nuestro sistema inmunitario destruya el tumor.

Por otro lado, la terapia conocida como células **CAR-T** lleva la personalización al extremo: se extraen del propio paciente linfocitos T (glóbulos blancos del sistema inmune), se envían al laboratorio, donde un científico los modifica mediante ingeniería genética para que expresen un receptor específico contra el cáncer, y luego se regresan al paciente. Es literalmente un ejército de células personalizadas y programadas para cazar el tumor. Ya es el tratamiento estándar para varias leucemias y linfomas que antes se consideraban incurables.

Biopsias líquidas: rastrear el cáncer en una gota de sangre

Las biopsias líquidas representan un avance en el tratamiento temprano, ya que ofrecen una alterna-

tiva menos invasiva y más precisa que las biopsias de tejido tradicionales, que son dolorosas y, a veces, peligrosas. La base de esta técnica es que las células tumorales, al morir, liberan fragmentos de ADN en la sangre u otros fluidos. Con un simple análisis de sangre, es posible detectar un cáncer meses antes de que sea visible en radiografías o tomografías, además de monitorear en tiempo real si el tumor está mutando y desarrollando resistencia al tratamiento, lo que permite al profesional médico ajustar la estrategia de inmediato.

Desafíos para el futuro próximo

A pesar de estos éxitos rotundos, la medicina traslacional se enfrenta a su propio cuello de botella. El principal reto actual no es la falta de ideas en el laboratorio, sino la accesibilidad y la resistencia tumoral.

El cáncer está en constante evolución; cuando se le bloquea una vía, suele encontrar otra para seguir creciendo. Por ello, la ciencia experimental actual se concentra en descifrar los mecanismos de resistencia antes de que aparezcan, diseñando cócteles de medicamentos que cerquen el tumor por todos los frentes.

Asimismo, democratizar el acceso a la secuenciación genómica y a terapias avanzadas, como las células CAR-T, sigue siendo una prioridad global, ya

CAR-T

Del inglés *chimeric antigen receptor T-cell*. Linfocito T modificado con una proteína (receptor) artificial, creado en el laboratorio (quimérico), que reconoce células cancerosas.



que sus costos de producción siguen siendo elevados. La ciencia también busca, de alguna forma, bajar los costos.

■ **Conclusión: la ciencia básica no es un lujo, es el inicio del tratamiento**

■ Sin la ciencia básica, la medicina se estancaría. No podemos tratar lo que no entendemos. Para diseñar un medicamento eficaz, primero necesitamos saber exactamente qué le va mal a la célula. Aquí es donde la revolución molecular ha cambiado las reglas del juego.

Muchas veces se considera que la investigación científica básica es sólo un ejercicio académico alejado de la realidad; sin embargo, esto no es cierto. Cada terapia que hoy salva vidas en un hospital empezó como una pregunta de investigación en el laboratorio, motivada por la curiosidad de un científico.

La medicina traslacional ha demostrado que la brecha entre un experimento en un plato de Petri

y la curación de un paciente es sólo una cuestión de tiempo, inversión y colaboración que permitan un cruce óptimo del puente traslacional.

Gracias a esta alianza, ya no avanzamos a ciegas en el laberinto. Ahora contamos con una luz encendida y el mapa genético en la mano, con lo que estamos aprendiendo a ganar la batalla.

Jaqueline Quevedo Ocampo

Universidad Autónoma Metropolitana Iztapalapa.
cbs2223803096@xanum.uam.mx

Maciel Juárez Ángeles

Universidad Autónoma Metropolitana Iztapalapa.
macieljr16@gmail.com

Luis E. Gómez Quiroz

Universidad Autónoma Metropolitana Iztapalapa.
legq@xanum.uam.mx

Lecturas recomendadas

Ayuso, C. (2024), "Retos actuales de la medicina genómica", *Anales de la Real Academia Nacional de Medicina de España*, 141(2):142-145. Disponible en: https://analesranm.es/wp-content/uploads/2024/numero_141_02/pdfs/ar14102_rev05.pdf, consultado el 30 de agosto de 2026.

Lagunas Rangel, F. A. (2019), "Sistema CRISPR/Cas", *Ciencia*, 70(4):1-5. Disponible en: https://www.revistaciencia.amc.edu.mx/online/X2_70_4_1200_CRISPR_L.pdf, consultado el 30 de agosto de 2026.

Perez-Velilla, M. A., P. Toffoletti y L. D. Garlissi (2025), "La medicina traslacional, nueva competencia del siglo XXI, y su relación con la biofísica médica", *Gaceta Médica de México*, 161(2):210-220. Disponible en: <https://www.scielo.org.mx/pdf/gmm/v161n2/2696-1288-gmm-161-2-219.pdf>, consultado el 30 de agosto de 2026.



¿Qué más pone en riesgo el corazón de los mexicanos?

El descubrimiento de nuevos factores de riesgo cardiovascular

Resumen

Las enfermedades del corazón siguen siendo la principal causa de muerte en México. Aunque el colesterol elevado, la hipertensión arterial y la diabetes son factores de riesgo conocidos, en los últimos años, diversas investigaciones han demostrado que en la salud cardiovascular también influye la inflamación persistente, la microbiota intestinal y distintas moléculas que circulan en el torrente sanguíneo. Investigaciones realizadas en la cohorte Tlalpan 2020 han permitido identificar nuevos marcadores de riesgo cardiovascular, hallazgos que sientan las bases para desarrollar estrategias de prevención y tratamiento adaptadas a las características de nuestra población.

Abstract

Cardiovascular diseases remain the leading cause of death in Mexico. Although high cholesterol, hypertension, and diabetes are well-established risk factors, in recent years, evidence has shown that cardiovascular health is also influenced by persistent inflammation, the gut microbiota, and a variety of molecules circulating in the bloodstream. Research from Tlalpan 2020 cohort has identified emerging cardiovascular risk markers, findings that lay the foundations for developing prevention and treatment strategies tailored to the Mexican population.

Introducción

Las enfermedades cardiovasculares son la principal causa de muerte en México. Este grupo de padecimientos, que incluye el infarto del miocardio y la enfermedad vascular cerebral, ocasiona cerca de 190 000 defunciones anuales y representa uno de los mayores retos para nuestro sistema de salud. En la mayoría

de los casos, su origen es la aterosclerosis, un proceso donde el colesterol, las células inflamatorias y otras sustancias presentes en la sangre se acumulan en la pared de las arterias formando placas que reducen progresivamente el flujo sanguíneo. Este proceso permanece silencioso hasta que una de estas placas se rompe y desencadena un evento potencialmente mortal. Por ello, la prevención cardiovascular depende, en gran medida, de identificar a las personas con mayor riesgo antes de que aparezcan las primeras manifestaciones.

Tradicionalmente, la evaluación del riesgo cardiovascular se ha basado en factores como la obesidad, la hipertensión arterial, la diabetes, las alteraciones del colesterol, el tabaquismo y el sedentarismo. Sin embargo, México enfrenta un panorama especialmente complejo: tres de cada cuatro adultos viven con sobrepeso u obesidad, alrededor de la mitad presenta hipertensión y uno de cada seis tiene diabetes. El dato más alarmante es que más de la mitad de la población reúne los criterios del síndrome cardiometabólico. Esto significa que no padecen una alteración aislada, sino la coincidencia simultánea de grasa abdominal, presión elevada y desajustes en la glucosa y el colesterol, todo ello impulsado por la resistencia a la insulina.

Este escenario plantea una pregunta importante: si estos factores de riesgo son tan frecuentes, ¿por qué algunas personas desarrollan enfermedad cardiovascular a edades tempranas mientras que otras permanecen sanas pese a compartir un perfil de riesgo similar? La respuesta parece encontrarse, al menos en parte, en otros procesos biológicos que hasta hace poco habían recibido poca atención. En los últimos años ha surgido un interés por identificar nuevos **biomarcadores cardiovasculares**, es decir, moléculas presentes en la sangre que reflejan la predisposición genética, la inflamación, las alteraciones del metabolismo o la interacción entre la microbiota intestinal y el organismo.

La mayor parte del conocimiento sobre estos biomarcadores proviene de estudios realizados en Europa, Norteamérica y Asia. Sin embargo, las diferencias genéticas, ambientales, culturales y dietéticas entre estas poblaciones y la mexicana hacen que sus resultados no siempre puedan aplicarse de manera directa. Por ello, conocer cuáles son los valores habituales de estos marcadores en nuestra población y entender su relación con el riesgo cardiovascular constituye un paso fundamental para desarrollar estrategias de prevención más precisas y adaptadas a las necesidades de los mexicanos.

Biomarcadores cardiovasculares
Sustancias biológicas que se encuentran y miden en la sangre para evaluar el estado de salud del corazón y los vasos sanguíneos.



■ El proyecto Tlalpan 2020

■ Con este propósito nació el proyecto Tlalpan 2020, un **estudio de cohorte** realizado en el Instituto Nacional de Cardiología Ignacio Chávez. Su objetivo original fue identificar los factores asociados con la aparición de hipertensión arterial en adultos mexicanos sanos. A diferencia de las investigaciones que incluyen personas con enfermedad cardiovascular ya establecida, este tipo de estudio permite seguir a individuos sanos durante varios años y observar qué cambios ocurren antes de que aparezca la enfermedad.

El estudio comenzó en 2014 con el reclutamiento de cerca de 4 000 mujeres y hombres de entre 20 y 50 años, residentes de la Ciudad de México, sin antecedentes de hipertensión, diabetes ni enfermedad cardiovascular. Además de documentar los factores de riesgo tradicionales, el proyecto incorporó el análisis de nuevos biomarcadores capaces de revelar procesos biológicos que no pueden detectarse mediante las evaluaciones clínicas habituales.

Entre estos biomarcadores destacan tres con mecanismos biológicos muy distintos. El primero es la lipoproteína(a) o Lp(a), una variante de la lipoproteína de baja densidad (LDL) cuya concentración depende casi por completo de la herencia genética. A diferencia del colesterol convencional, la alimentación o el ejercicio tienen poca influencia sobre sus niveles. El segundo biomarcador es el urato sérico. Aunque antes se le consideró únicamente responsable de la gota, hoy se sabe que también puede reflejar alteraciones metabólicas relacionadas con la resistencia a la insulina y el daño de los vasos sanguíneos. El tercero es el óxido de trimetilamina (TMAO), una molécula que ilustra la estrecha relación entre la alimentación, las bacterias que habitan nuestro intestino y la salud cardiovascular. El TMAO se produce cuando las bacterias del intestino metabolizan nutrientes presentes en alimentos como las carnes rojas y los huevos; posteriormente, el hígado transforma esos compuestos en TMAO, que pasa a la sangre. Las concentraciones elevadas de esta molécula se asocian con un mayor riesgo de aterosclerosis, trombosis y enfermedades cardiovasculares.

■ Principales hallazgos de Tlalpan 2020

■ Una de las principales contribuciones del proyecto Tlalpan 2020 ha sido generar evidencia sobre estos biomarcadores cardiovasculares en la población mexicana. Aunque estas moléculas han sido estudiadas en Europa, Norteamérica y Asia, se desconocía cuál era su comportamiento en México.

La Lp(a) fue uno de los biomarcadores con resultados más relevantes. Observamos que las mujeres presentaron concentraciones más elevadas que los hombres y que aproximadamente uno de cada siete adultos sanos tenía niveles considerados de alto riesgo cardiovascular. Además, quienes presentaban concentraciones elevadas de Lp(a) también mostraban mayores niveles de colesterol LDL, una combinación que favorece el desarrollo de aterosclerosis y que identifica a un grupo de personas que podría beneficiarse de estrategias preventivas intensivas.

Los hallazgos relacionados con el urato sérico también fueron reveladores. La hiperuricemia estuvo presente en 16.8% de la población, con una frecuencia considerablemente mayor en los hombres (28.4%) que en las mujeres (10%). Además, los factores asociados con el aumento del urato fueron diferentes en ambos sexos. En los hombres predominó la influencia de la función renal, el perfil de lípidos, los antecedentes familiares de gota y diabetes, así como el consumo de alimentos ricos en fructosa, carnes procesadas y bebidas azucaradas. En las mujeres, en cambio, el urato sérico mostró una asociación más estrecha con alteraciones cardiometabólicas, antecedentes familiares de trastornos metabólicos y factores relacionados con el estilo de vida, como el tabaquismo pasivo y la calidad del sueño. Estos resultados sugieren que el urato sérico constituye un indicador sensible del estado metabólico y podría contribuir a identificar personas con riesgo cardiometabólico incluso antes de la aparición de hipertensión o diabetes.

El tercer biomarcador fue el TMAO. A diferencia de lo descrito en otras regiones del mundo, encontramos que muy pocos participantes (1%) presentaban concentraciones asociadas con alto riesgo cardiovascular y que no existían diferencias importantes entre mujeres y hombres. Las concentraciones altas

◀ **Estudio de cohorte**
Tipo de investigación que evalúa a un grupo de personas sanas a lo largo del tiempo para determinar cómo la dieta, el estilo de vida o los niveles de un biomarcador influyen en la aparición de una enfermedad.

de TMAO se asociaron con niveles elevados de triglicéridos. Estos resultados indican que la población mexicana presenta niveles de TMAO inferiores a los observados en poblaciones afrodescendientes y europeas, asemejándose más a las poblaciones asiáticas, probablemente como consecuencia de diferencias en la dieta, la composición de la microbiota intestinal y otros factores ambientales.

En conjunto, estos hallazgos muestran que el riesgo cardiovascular no depende de un solo mecanismo biológico. La Lp(a) refleja principalmente la contribución de la herencia genética; el urato sérico integra información sobre el estado metabólico y los hábitos de vida; y el TMAO revela la participación de la microbiota intestinal y la alimentación. Analizados de manera complementaria, estos biomarcadores ofrecen una visión más completa de la enfermedad cardiovascular y ayudan a entender por qué algunas personas desarrollan enfermedad cardiovascular aun cuando los factores de riesgo tradicionales no parecen suficientes para explicarlo.

■ **Incidencia social**

■ Las enfermedades cardiovasculares continúan siendo la principal causa de muerte en México. Frente a este panorama, la mayor aportación del proyecto Tlalpan 2020 ha sido generar conocimiento que permita actuar antes de que aparezca la enfermedad. Conocer cuáles son los niveles habituales de biomarcadores cardiovasculares en la población mexicana representa un paso fundamental para interpretar correctamente estas pruebas y evitar depender exclusivamente de valores obtenidos en poblaciones con características genéticas, ambientales y dietéticas diferentes a las nuestras.

Los resultados también muestran que el riesgo cardiovascular no es igual para todas las personas. Mientras algunas presentan una mayor predisposición hereditaria, como ocurre con la Lp(a), otras desarrollan alteraciones relacionadas con el metabo-

lismo o con la interacción entre la alimentación y la microbiota intestinal.

Más allá de sus aportaciones científicas, Tlalpan 2020 demuestra la importancia de realizar investigación en nuestra propia población. La evidencia generada en México fortalece la toma de decisiones en salud pública, contribuye al desarrollo de guías clínicas adaptadas a nuestra realidad y acerca la posibilidad de ofrecer una prevención cardiovascular cada vez más precisa y efectiva.

■ **Conclusiones**

■ Durante décadas, la prevención cardiovascular se ha centrado en controlar la hipertensión, la diabetes, la obesidad, las alteraciones del colesterol y el tabaquismo. Aunque estos factores continúan siendo fundamentales, hoy sabemos que no explican por sí solos la complejidad biológica de las enfermedades cardiovasculares.

Los hallazgos del proyecto Tlalpan 2020 muestran que biomarcadores como la Lp(a), el urato sérico y el TMAO aportan información complementaria sobre distintos mecanismos involucrados, desde la predisposición genética hasta las alteraciones metabólicas y la influencia de la microbiota intestinal. Al mismo tiempo, ponen de manifiesto que estos biomarcadores deben interpretarse utilizando valores obtenidos en la población en que serán aplicados.

Más allá de describir nuevos factores de riesgo, el proyecto Tlalpan 2020 demuestra que generar conocimiento en nuestro propio contexto es indispensable para comprender mejor las enfermedades cardiovasculares y diseñar estrategias de prevención que respondan a las necesidades reales de nuestro país.

Luis Manuel Amezcua Guerra

Universidad Autónoma Metropolitana, Xochimilco.

lamezcua@correo.xoc.uam.mx

Arturo Simoni-Nieves



Inmunoterapia: la nueva esperanza contra el cáncer alimentado por la obesidad

Resumen

La obesidad no sólo aumenta el riesgo de desarrollar cáncer, sino que también crea un entorno que dificulta su tratamiento. Los anticuerpos *biespecíficos*, una innovadora terapia inmunológica, están demostrando ser una herramienta prometedora para combatir tumores hepáticos, pulmonares y de ovario, incluso en pacientes con obesidad. Este artículo explora cómo funcionan estas moléculas “inteligentes” y por qué representan una esperanza real para quienes enfrentan este doble desafío.

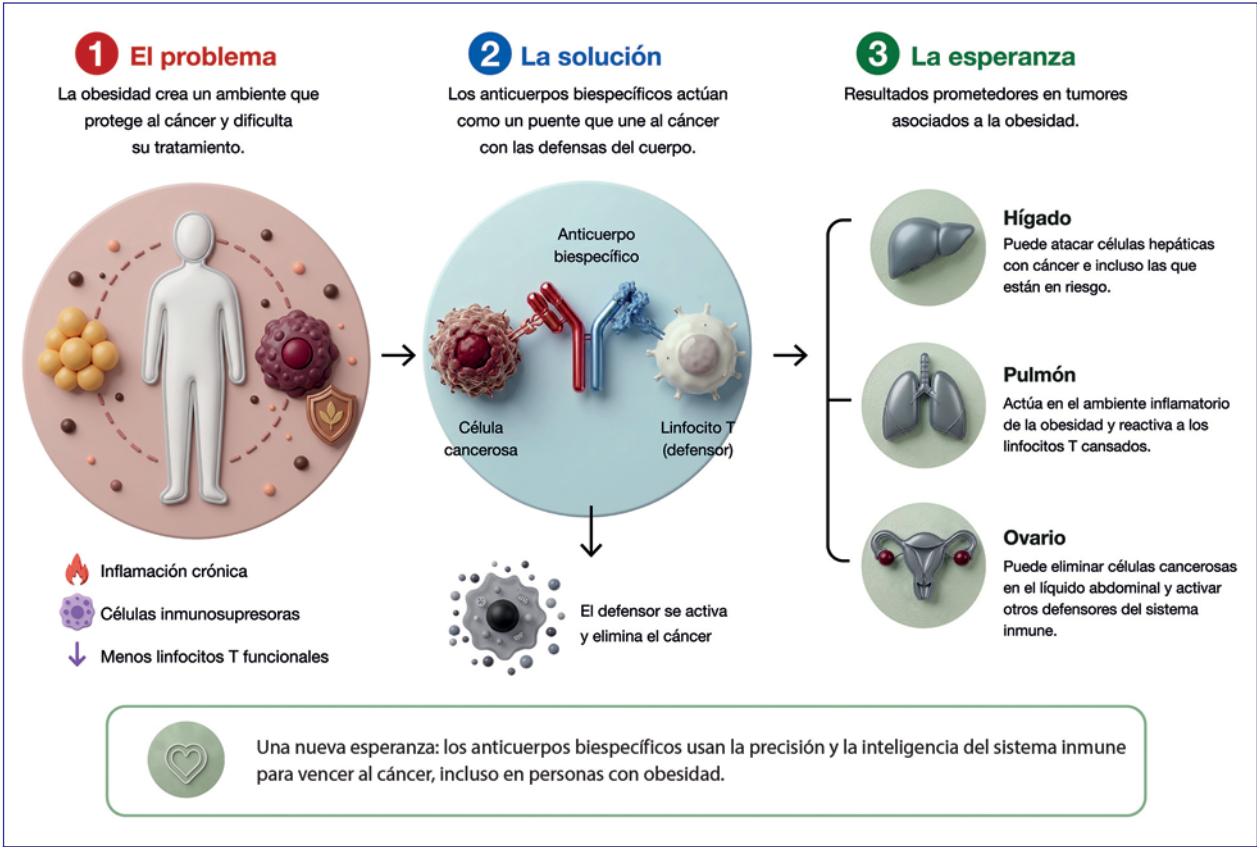
Abstract

Obesity not only increases the risk of developing cancer but also creates an environment that complicates treatment. *Bispecific* antibodies, an innovative immunotherapy, are proving to be a promising tool to combat liver, lung, and ovarian tumors, even in patients with obesity. This article explores how these “smart” molecules work and why they represent real hope for those facing this dual challenge.

La obesidad se ha convertido en un problema de salud que va mucho más allá del peso. Quienes la padecen no sólo enfrentan riesgos cardiovasculares o metabólicos, sino que también tienen más probabilidades de desarrollar ciertos tipos de cáncer. Y cuando el cáncer llega, la obesidad complica aún más las cosas. Los tumores de hígado, pulmón y ovario son especialmente sensibles a este entorno desfavorable. Pero ¿por qué la obesidad hace más difícil tratar el cáncer? La respuesta está en el **microambiente tumoral**. El exceso de grasa en el cuerpo genera inflamación constante, como si hubiera un incendio que nunca se apaga (**Figura 1**). Esta inflamación altera las defensas naturales del organismo y, en lugar de atacar al cáncer, las protege y les da un ambiente ideal para crecer. Es como si la grasa construyera un escudo alrededor de las células cancerosas.

Microambiente tumoral

El “vecindario” que rodea a un tumor, que incluye células, vasos sanguíneos y tejidos que pueden ayudar o dificultar el crecimiento del cáncer.



Anticuerpo bispecífico
Molécula artificial con dos brazos: uno se agarra a la célula cancerosa y el otro activa una célula defensora del cuerpo para que destruya el tumor.

Linfocito T
Tipo de célula del sistema inmune que combate infecciones y tumores.

Figura 1. Representación esquemática del efecto de la obesidad sobre el microambiente tumoral y del mecanismo de acción de los anticuerpos bispecíficos. La obesidad favorece un entorno inmunosupresor que limita la respuesta antitumoral. Los anticuerpos bispecíficos actúan como un puente entre las células tumorales y los linfocitos T promoviendo su activación y la eliminación de las células cancerosas. Se ilustran ejemplos de aplicaciones potenciales en tumores de hígado, pulmón y ovario. Imagen: Arturo Simoni y Joaquín González Vázquez, con apoyo de inteligencia artificial.

Frente a este problema, la ciencia ha creado una herramienta revolucionaria: los **anticuerpos bispecíficos**. Para entenderlos, imaginemos un puente con dos brazos. Uno de esos brazos reconoce y se agarra a la célula cancerosa, el otro brazo engancha a un “soldado” del sistema inmune, llamado **linfocito T**, y lo activa para que destruya el tumor. Es como si el anticuerpo tomara de la mano al canceroso y al defensor, y los obligara a enfrentarse. Esta estrategia es muy inteligente por varias razones. Primero, no necesita que la célula tumoral muestre una “identificación” que los cánceres suelen esconder para engañar al sistema inmune. Segundo, puede activar a los defensores, aunque sean pocos, algo muy útil porque dentro de los tumores suele haber muy pocos linfocitos T disponibles. Tercero, ataca puntos muy específicos del cáncer, como si tuviera una mira láser que sólo apunta a lo malo sin dañar lo sano.

En el cáncer de pulmón, especialmente en el tipo más común, la ciencia ha hecho un descubrimiento muy interesante. Uno de los problemas para curar este tipo de cáncer es que, con el tiempo, el tumor se vuelve resistente a los medicamentos. Es como si las células cancerosas aprendieran a esquivar los tratamientos. Los equipos de investigación descubrieron que una proteína llamada **AXL** actúa como un “escudo” que protege a las células cancerosas. Cuando un medicamento muy efectivo, llamado **Osimertinib**, ataca al cáncer, las células que sobreviven usan esa proteína **AXL** para hacerse fuertes y volver a crecer. Los investigadores decidieron entonces atacar por dos frentes: por un lado, usaron el **Osimertinib** para frenar el crecimiento del cáncer; por otro lado, diseñaron un anticuerpo bispecífico –es decir, un puente con dos brazos– que ataca a dos proteínas a la vez: una llamada **EGFR**, que es el blanco del medi-

camento, y la proteína AXL, que es el escudo protector del cáncer. Es como si, además de usar un cañón contra el enemigo, le quitáramos su escudo para que no pueda defenderse. Los resultados fueron sorprendentes. En experimentos con ratones con cáncer de pulmón, el tratamiento combinado logró que los tumores desaparecieran y no volvieran a aparecer durante mucho tiempo. En algunos casos, los animales se mantuvieron sin cáncer durante más de seis meses después de terminar el tratamiento. Esto es muy importante porque, normalmente, el cáncer de pulmón suele regresar después de un tiempo.

Las investigaciones compararon dos formas de bloquear la proteína AXL. Una consistía en usar un medicamento tradicional que inhibe su función; la otra usaba el anticuerpo biespecífico. Descubrieron que el anticuerpo era mucho más efectivo porque no sólo bloqueaba la proteína, sino que la “eliminaba” de la superficie de las células cancerosas. Además, el anticuerpo ayudaba a que el sistema inmune reconociera y atacara mejor el tumor. Otra ventaja clave es que los medicamentos tradicionales pueden ser más tóxicos para el cuerpo, mientras que los anticuerpos son más específicos y causan menos efectos secundarios. Esto es especialmente importante en pacientes

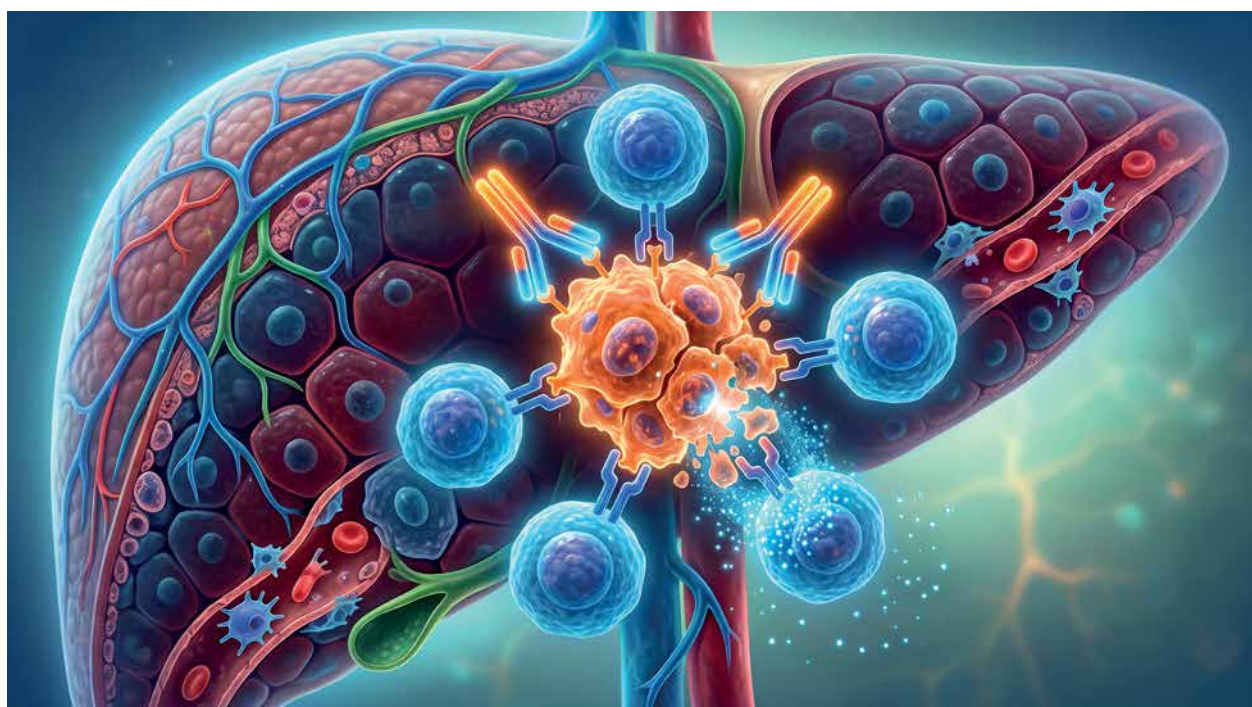
con obesidad, donde el cuerpo ya está inflamado y cualquier tratamiento agresivo puede ser más difícil de tolerar.

En el cáncer de hígado, que está aumentando mucho debido a la obesidad y al **hígado graso**, los anticuerpos biespecíficos también están mostrando resultados prometedores. Se están probando anticuerpos que reconocen dos proteínas diferentes al mismo tiempo en las células tumorales del hígado, lo que aumenta la precisión y reduce la posibilidad de que el cáncer se vuelva resistente. Además, se están diseñando versiones de estos anticuerpos que duren más tiempo en el cuerpo, para que los pacientes necesiten menos dosis.

En el cáncer de ovario, los primeros ensayos con estos anticuerpos dieron resultados sorprendentes. En un estudio, una paciente con cáncer de ovario muy avanzado tenía líquido acumulado en el abdomen, algo muy común y doloroso. Después de recibir el tratamiento con anticuerpos biespecíficos directamente en esa zona, las células cancerosas desaparecieron del líquido y la paciente estuvo seis meses sin necesitar que le drenaran el abdomen nuevamente. Esto fue posible porque estos anticuerpos pueden reconocer proteínas que abundan en las células de

Hígado graso

Acumulación excesiva de grasa en las células del hígado, muy relacionada con la obesidad y que puede llevar a inflamación y daño hepático.



cáncer de ovario y, además, activan no sólo a los linfocitos T, sino también a otros soldados del sistema inmune, como los macrófagos, que trabajan en equipo para eliminar el tumor.

La obesidad no es sólo un factor que aumenta el riesgo de cáncer, también cambia la forma en que los tratamientos funcionan. Las células de grasa producen sustancias que protegen a los tumores y dificultan que los medicamentos lleguen a ellos. Incluso pueden atrapar algunos fármacos y evitar que lleguen a su destino. Pero los anticuerpos biespecíficos están diseñados para ser más pequeños y ágiles que otros tratamientos, por lo que pueden penetrar mejor en los tejidos, incluso en aquellos rodeados de grasa. Además, al activar los linfocitos T justo donde está el tumor, evitan muchas de las trampas que la obesidad les tiende.

Las investigaciones no se detienen aquí. En el Laboratorio de Fisiología Celular y Medicina Tradicional del Departamento de Ciencias de la Salud de la Universidad Autónoma Metropolitana Unidad Iztapalapa, ya se están empleando anticuerpos biespecíficos que no sólo atacan al cáncer, sino que también bloquean las señales inflamatorias que produce la grasa. Es decir, son moléculas con dos funciones: eliminar el tumor y, al mismo tiempo, apagar el incendio inflamatorio que la obesidad mantiene encendido. Estos diseños de próxima generación podrían ser especialmente útiles para pacientes que enfrentan ambos problemas.

Los anticuerpos biespecíficos representan una de las estrategias más innovadoras en la lucha contra el cáncer en pacientes con obesidad. Al reconectar el sistema de defensa del cuerpo y atacar directamente los tumores de hígado, pulmón y ovario, ofrecen esperanza donde otros tratamientos han fallado. Aún

hay desafíos por resolver, pero los resultados iniciales son muy alentadores. La ciencia avanza hacia terapias cada vez más personalizadas, capaces de adaptarse a la realidad de cada paciente, especialmente de aquellos que enfrentan el doble reto de la obesidad y el cáncer.

Arturo Simoni-Nieves

Universidad Autónoma Metropolitana, Iztapalapa.

snar@xanum.uam.mx

Lecturas recomendadas

- Asociación Española Contra el Cáncer (s. f.), "Cáncer de hígado", *Asociación Española Contra el Cáncer* [en línea]. Disponible en: <https://www.contraelcancer.es/es/todo-sobre-cancer/tipos-cancer/cancer-higado>, consultado el 30 de agosto de 2026.
- Gallardo Rincón, D., G. C. Alamilla García, R. A. Salcedo Hernández, A. Bahena González, R. M. Álvarez Gómez *et al.* (2020), "Oncoguía de cáncer de ovario 2020", *Latin American Journal of Clinical Sciences and Medical Technology* [en línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.34141/LJCS6107311>.
- Mayo Clinic (2026), "Tratamiento con anticuerpos biespecíficos", *Mayo Clinic* [en línea]. Disponible en: <https://www.mayoclinic.org/es/tests-procedures/bispecific-antibody-therapy/about/pac-20594103>, consultado el 30 de agosto de 2026.
- OMS (2025), "Obesidad y sobrepeso", *Organización Mundial de la Salud* [en línea]. Disponible en: <https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/obesity-and-overweight>, consultado el 30 de agosto de 2026.
- Remon, J. (2022), "La inmunoterapia del cáncer", *Sociedad Española de Oncología Médica* [en línea]. Disponible en: <https://www.seom.org/100317-informacion-al-publico-guia-de-tratamientos/inmunoterapia-del-cancer>, consultado el 30 de agosto de 2026.

José Eduardo González Reyes

Desde las redes

¿Leeuwenhoek llegó a México?

La historia de la microscopía en sus etapas más tempranas suele contarse casi exclusivamente como un fenómeno europeo, centrado en los Países Bajos, Inglaterra, Francia e Italia.

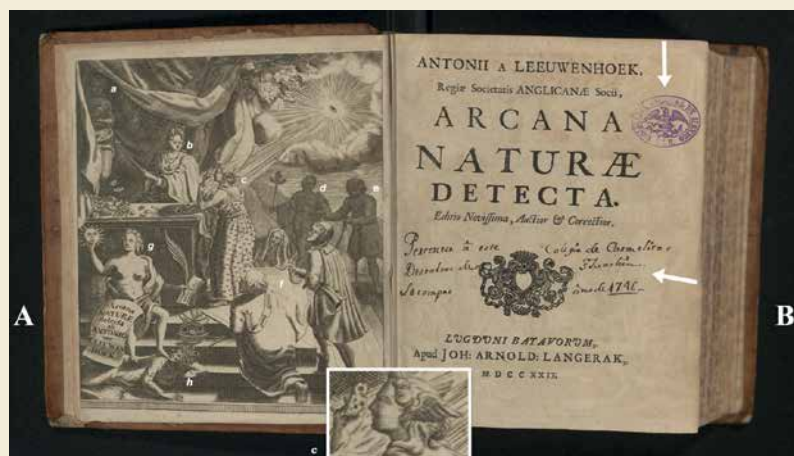
Antoni van Leeuwenhoek (1632-1723) fue el primero en observar organismos unicelulares. Entre 1673 y 1723 envió 189 cartas con sus observaciones a la Royal Society, de las cuales 114 se convirtieron en 117 artículos publicados en *Philosophical Transactions*; además, publicó por su cuenta 153 cartas en holandés y latín. Con una selección de estas correspondencias compiló un texto en latín llamado *Arcana Naturae Detecta*, que en español podría traducirse como *Secretos de la naturaleza al descubierto*.

¿Qué pasaba fuera de Europa mientras tanto? ¿Estos libros fueron leídos en América Latina?

Un grupo de investigadores mexicanos liderados por Parsifal Islas-Morales encontró la respuesta, casi por accidente, en la Biblioteca Nacional de México. Encontraron un ejemplar poco común de la segunda edición de *Arcana Naturae Detecta*, editado en 1722, el cual incluye una inscripción manuscrita que confirma que fue adquirido en 1746 para el Colegio de Artes Liberales de los Carmelitas Descalzos de San Joaquín, en la Ciudad de México.

Esto significa que el libro llegó a México apenas 24 años después de su publicación en Europa, en una época en que las noticias tardaban de dos a tres meses en cruzar el Atlántico, y un libro podía tardar hasta un año adicional por los trámites de la Inquisición.

El ejemplar conserva, además de la inscripción, una marca de fuego que permite confirmar su pertenencia al convento carmelita, así como características de encuadernación que sugieren que fue preparado



El ejemplar mexicano de *Arcana Naturae Detecta* en la colección de libros raros de la Biblioteca Nacional de México. Se alcanza a leer una nota escrita a mano: "Pertenece a este Colegio de Carmelitas Descalzos de San Joaquín. Comprado en el año 1746". Crédito: P. Islas-Morales.

para un cliente de alto nivel económico. Hasta ahora, se trata del ejemplar más antiguo localizado en el continente que conserva este tipo de marcas históricas, pues tras revisar los catálogos de 22 bibliotecas nacionales de América Latina, sólo se encontró otro ejemplar original de esta obra, en Chile.

Este hallazgo cuestiona la idea de que la ciencia en la Nueva España era una simple extensión pasiva de la ciencia europea. Por el contrario, sugiere que los eruditos novohispanos participaban activamente en las redes internacionales de circulación del conocimiento adquiriendo obras de vanguardia casi al mismo tiempo que sus colegas europeos.

Más información

P. F. Islas-Morales *et al.* (2026), "Leeuwenhoek in Mexico: new paths in the global circulation of scientific knowledge", *Notes and Records*, The Royal Society. Disponible en: <https://doi.org/10.1098/rsnr.2026.0030>.

¿Por qué El Niño se está volviendo más intenso?

Este año se ha hablado del actual episodio de El Niño, que apunta a romper récords históricos y que sería el tercer evento fuerte en solamente 11 años, algo que no se había registrado antes. El Niño es un fenómeno climático natural en el que las aguas de superficie del océano Pacífico central y oriental sufren un calentamiento anómalo, lo que altera las pautas meteorológicas en todo el mundo y suele ocurrir normalmente cada dos a siete años.

¿El cambio climático está intensificando este fenómeno? Responder esto no ha sido sencillo. Los modelos computacionales actuales tienen dificultades para representar la compleja interacción entre vientos y corrientes que produce este fenómeno, y antes del siglo xx prácticamente no existen mediciones confiables de temperatura en las zonas más remotas del océano Pacífico.

Para superar este vacío, un grupo de investigación recurrió a los corales, organismos cuyo crecimiento mes a mes permite reconstruir con precisión la temperatura superficial del mar en el pasado.

A diferencia de estudios previos centrados en el Pacífico central, el equipo se enfocó en el Pacífico oriental, cerca de las islas Galápagos, una zona clave pero poco estudiada por lo inhóspita que resulta para el crecimiento de corales. Tras años de trabajo, lo-

graron reunir miles de muestras que permiten conocer las condiciones mil años antes de la Revolución Industrial.

El análisis mostró que, entre 1990 y 2010, la amplitud promedio de la oscilación entre condiciones frías y cálidas del fenómeno aumentó 36.5 % respecto al milenio anterior a 1850, y 16 % respecto al periodo 1851-1982. Este incremento se debe, sobre todo, a que los eventos fuertes de El Niño se han vuelto más frecuentes, de manera paralela al aumento de la temperatura global. Los datos del Pacífico central muestran una tendencia similar, aunque menos marcada.

Aunque persiste la incertidumbre sobre cómo se comportará este patrón en el futuro, los autores señalan que la coincidencia entre esta reconstrucción, las observaciones recientes y los modelos climáticos refuerza la idea de que el calentamiento global sí está modificando la intensidad de El Niño, con implicaciones preocupantes en cuanto a eventos climáticos extremos.

Más información

J. E. Cole *et al.* (2026), "Recent strengthening of eastern Pacific ENSO in the last millennium paleorecord", *Science*. Disponible en: <https://doi.org/10.1126/science.ady2660>.



Inundación durante El Niño en Santa Rita de Babahoyo en 1980. Crédito: Wikimedia.

El telescopio Roman ya busca los secretos del universo

El pasado 30 de agosto, la NASA lanzó con éxito el Telescopio Espacial Nancy Grace Roman, su nuevo observatorio insignia, a bordo de un cohete de SpaceX desde el Centro Espacial Kennedy, en Florida. El proyecto, con un costo de 4 300 millones de dólares, lleva el nombre de Nancy Grace Roman, la primera astrónoma en jefe de la agencia, quien fue pieza clave en misiones como el telescopio Hubble.

Roman se suma a otros dos observatorios dedicados al mapeo del cielo: el Observatorio Vera C. Rubin, inaugurado en 2025 en Chile, y Euclid, un telescopio espacial lanzado por la Agencia Espacial Europea en 2023. La principal ventaja de Roman es su campo de visión, que es aproximadamente 100 veces mayor que el del Hubble, gracias a una cámara infrarroja de 300 megapíxeles, la más grande jamás construida: un mes de sus observaciones de la Vía Láctea le tomaría un siglo al Hubble realizarlas.

Entre sus objetivos, el telescopio busca profundizar en la naturaleza de la energía oscura, la fuerza detrás de la expansión acelerada del universo, mediante el rastreo de miles de supernovas distantes, así como cartografiar alrededor de 20 000 millones de estrellas de la Vía Láctea, incluidas zonas antes ocultas por el polvo galáctico.

Sin embargo, quienes más esperan este lanzamiento son los especialistas en exoplanetas. Se calcula que Roman podría detectar hasta 40 veces más planetas fuera del Sistema Solar de los que se han catalogado hasta ahora. La mayoría de estos hallazgos vendrá del método de tránsito, al monitorear el brillo de cientos de millones de estrellas cada 12 minutos. Si el brillo de alguna disminuye, es altamente probable que se trate del paso de un planeta orbitando la estrella. Se espera que, con este método, Roman pueda detectar cerca de 100 000 exoplanetas.

Otra técnica para detectar planetas es la microlente gravitacional que aportará cerca de 1 000 detecciones adicionales, entre ellas mundos más parecidos



El telescopio espacial Nancy Grace Roman resolverá interrogantes fundamentales en los campos de la energía oscura, los exoplanetas y la astrofísica. Crédito: NASA.

a los del propio Sistema Solar, como análogos de Marte o de la Tierra, que suelen escapar al método de tránsito.

El telescopio también incorpora un coronógrafo con espejos deformables capaz de bloquear el resplandor de una estrella para fotografiar directamente los planetas que la orbitan, una tecnología que servirá como modelo de pruebas para el Observatorio de Mundos Habitables, la siguiente gran misión de la NASA, enfocada en buscar señales de vida fuera del Sistema Solar.

Tras pasar por distintos nombres y rediseños, el proyecto fue renombrado Roman en 2020 y estuvo en riesgo de cancelación en 2025, hasta que el Congreso de Estados Unidos lo reinstauró. Finalmente, despegó nueve meses antes de lo previsto y por debajo del presupuesto estimado.

Más información

D. Castelvechi (2026), "List-off! NASA launches Roman Space Telescope to tackle dark-energy mysteries", *Nature*. Disponible en: <https://doi.org/10.1038/d41586-026-02727-7>.

Noticias de la Academia Mexicana de Ciencias



**Falleció Rosanela Álvarez Ruiz,
editora de la revista *Ciencia***

El Comité Editorial y el equipo de producción de la revista *Ciencia* de la Academia Mexicana de Ciencias lamentan profundamente el fallecimiento de su editora Rosanela Álvarez Ruiz.

Aunque solía aclarar que no era científica, dedicó buena parte de su vida a acercar el conocimiento a nuevos públicos. Fue autora de libros infantiles y editora de una enorme cantidad de libros de diferentes géneros. Desde 2003 contribuyó con su extraordinaria capacidad y calidez a la formación de cada número de esta revista. Su huella permanece en sus páginas y en quienes tuvimos el privilegio de trabajar a su lado.

Descanse en paz.



Fotografía Arturo Orta / DGOC, UNAM

La Academia Mexicana de Ciencias inicia su LXVII Año Académico y renueva su Consejo Directivo

La Academia Mexicana de Ciencias (AMC) inició formalmente su LXVII Año Académico con la toma de posesión de su nuevo Consejo Directivo para el trienio 2026-2029. En una ceremonia solemne celebrada en el Auditorio Julián Adem del Instituto de Ciencias de la Atmósfera y Cambio Climático de la UNAM, Telma Gloria Castro Romero asumió la presidencia, sucediendo a José Seade Kuri. El consejo está conformado por Rafael Bojalil Parra como vicepresidente, Alejandro de Las Peñas Nava como tesorero y Javier Miranda Martín del Campo como secretario electo, así como por María Regina Martínez Casas, secretaria designada.

Al asumir el cargo, Castro Romero presentó una agenda enfocada en la sostenibilidad institucional, la descentralización y la defensa de la evidencia empírica. “Defender el pensamiento crítico, la evidencia y la humanidad intelectual frente a lo desconocido es también una responsabilidad de las instituciones científicas”, destacó la nueva presidenta, quien detalló que buscará ampliar la presencia nacional de la membresía y consolidar la capacidad de la AMC para generar propuestas independientes frente a los desafíos del país.

Durante el evento, diversas figuras del ámbito académico destacaron el rol del conocimiento como motor de desarrollo. El presidente saliente, José Seade, recordó que México necesita de la ciencia para comprender sus problemas y construir un futuro con justicia. Por su parte, Rosaura Ruiz Gutiérrez, secretaria de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación, propuso repensar el papel de la ciencia y urgir a modernizar programas de impacto social, como la enseñanza matemática desde la

educación básica, paso fundamental para formar especialistas en áreas de vanguardia.

Los rectores de la UNAM y la UAM, Leonardo Lomelí y Gustavo Pacheco, respectivamente, coincidieron en que el progreso científico debe asumirse como una prioridad permanente de Estado para combatir la desinformación y transformar el conocimiento para el bienestar social. Ambas instituciones reafirmaron su compromiso como aliadas de la AMC.

Ciencia se integra al Sistema Nacional de Publicaciones Científicas y Humanísticas 2026

Ciencia, el órgano oficial de difusión y divulgación de la AMC, ha sido formalmente integrada al padrón del Sistema Nacional de Publicaciones Científicas y Humanísticas (SNPCyH) 2026 impulsado por la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI).

Fundada el 1 de marzo de 1940 en la Ciudad de México por el científico español exiliado Ignacio Bolívar Urrutia, bajo el nombre de *Ciencia. Revista Hispano-Americana de Ciencia Pura y Aplicada*, la publicación nació del esfuerzo conjunto entre investigadores mexicanos y españoles para crear un puente de comunicación y estimular el desarrollo científico nacional. En 1979, *Ciencia* se unió formalmente a la entonces Academia de la Investigación Científica, la cual asumió por completo su edición y control operativo.

La revista ha sido galardonada en tres ocasiones con el premio al arte editorial de la CANIEM. Desde 2021, la revista migró a un formato completamente digital, abierto y gratuito, y recibe en promedio cerca de un millón de visitas anuales.

Este ingreso al SNPCyH avala el mantenimiento de los más altos estándares de calidad e integridad académica de nuestras páginas, tras superar una rigurosa evaluación a cargo de más de 300 especialistas del Sistema Nacional de Investigado-



Gustavo Pacheco López, José Seade Kuri, Rosaura Ruiz Gutiérrez, Leonardo Lomelí Vanegas, Telma Gloria Castro Romero, Michel Grutter de la Mora. Fotografía: Eduardo González / AMC.



ras e Investigadores y de representantes de Latindex, Redalyc y SciELO.

La convocatoria de este año marca un hito en la política científica de nuestro país, ya que somos parte de las 513 publicaciones reconocidas de un total de 637 postuladas, una cifra histórica para el ecosistema editorial mexicano.

Extendemos nuestro profundo agradecimiento a las y los autores, revisores y a todo el equipo editorial por mantener vivo y en constante evolución este proyecto que comenzó hace más de 80 años.

Los resultados oficiales del padrón 2026 pueden consultarse en el siguiente enlace: <https://secihti.mx/snpcyh/>.

CITA

(Ciencia, Innovación, Tecnología y Academia)

La AMC y el Centro de Ciencias de la Complejidad (C3) de la UNAM coordinan cita (Ciencia, Innovación, Tecnología y Academia), espacio mensual en el que se reúnen miembros de distintas comunidades de la ciencia, la tecnología, la innovación, la comunicación de la ciencia y el público no especializado para intercambiar perspectivas sobre temas científicos y tecnológicos relevantes y coyunturales.

Los encuentros del programa de CITA son coordinados por Julia Tagüña Parga, Coordinadora de Comunicación del C3, investigadora emérita del Instituto de Energías Renovables de la UNAM y miembro de la AMC. El formato es presencial y también se transmite por los canales de YouTube de la AMC y del C3.

Las conferencias más recientes son:

- 30 de junio de 2026
"Academias, ciencia y tecnología para el desarrollo de México"
<https://www.youtube.com/live/fwE2zinJCsl>
En la que participó un panel de especialistas para comentar sobre el tema. Participaron Raúl Carrillo Esper, presidente de la Academia Nacional de Medicina; Alberto Lepe Zúñiga, presidente de la Academia de Ingeniería de México; José Seade, presidente de la Academia Mexicana de Ciencias, y Gabriela Dutrénit, de la Universidad Autónoma Metropolitana y de la AMC, con la moderación de José Franco, del Instituto de Astronomía de la UNAM y expresidente de la AMC, y Julia Tagüña, coordinadora de CITA.
- 25 de agosto de 2026
"Inteligencia artificial: sorpresas, predicciones y desafíos"
<https://www.youtube.com/live/ZSR68T1vS2U>
En la que participó un panel de especialistas para comentar sobre el tema. Participaron Sarah Abel, del Instituto de

TIENES UNA CITA
CITIA • INNOVACIÓN • TECNOLOGÍA • ACADEMIA

EN EL C3 CON LA ACADEMIA MEXICANA DE CIENCIAS

Academias:
Ciencia y tecnología para el desarrollo de México

Participan:

- RAÚL CARRILLO ESPER
Presidente Academia Nacional de Medicina
- ALBERTO LEPE ZÚÑIGA
Presidente de la Academia de Ingeniería México
- JOSÉ SEADE
Presidente de la Academia Mexicana de Ciencias
- GABRIELA DUTRÉNIT
Universidad Autónoma Metropolitana y AMC

Moderan:

- JOSÉ FRANCO
Instituto de Astronomía UNAM, ex presidente de la AMC
- JULIA TAGÜÑA
Instituto de Investigaciones en Energía y C3

Martes 30 de junio | 12 horas | Auditorio del C3

Evento presencial con transmisión por YouTube del @c3.unam y @AMCciencias
Informes: comunicacion@c3.unam.mx

TIENES UNA CITA
CITIA • INNOVACIÓN • TECNOLOGÍA • ACADEMIA

EN EL C3 CON LA ACADEMIA MEXICANA DE CIENCIAS

Inteligencia Artificial:
sorpresas, predicciones y desafíos

Participan:

- SARAH ABEL
Instituto de Investigaciones Filosóficas, UNAM
- MARIA ELENA MEDINA MORA
Facultad de Psicología, UNAM y El Colegio Nacional
- PEDRO SALAZAR
Instituto de Investigaciones Jurídicas, UNAM

Moderan:

- HUMBERTO CARRILLO
Facultad de Ciencias y C3, UNAM
- JULIA TAGÜÑA
Instituto de Investigaciones en Energía y C3, UNAM

Martes 25 de agosto • 12 horas • Auditorio del C3

Evento presencial con transmisión por YouTube del @c3.unam y @AMCciencias
Informes: comunicacion@c3.unam.mx

Investigaciones Filosóficas de la UNAM; María Elena Medina Mora, de la Facultad de Psicología de la UNAM y El Colegio Nacional, y Pedro Salazar, del Instituto de Investigaciones Jurídicas de la UNAM, bajo la moderación de Humberto Carrillo, de la Facultad de Ciencias y el C3 de la UNAM, y Julia Tagüeña, coordinadora de CITA.

Charlas con autores de la revista *Ciencia de la AMC*

Continúan las pláticas que, a través de las redes sociales de la revista *Ciencia*, dictan diversos autores que han contribuido en diferentes números de la misma. La charla más reciente es:

- 16 de junio de 2026
"Evaluación de políticas públicas: el caso de la educación"
Claudia A. Santizo Rodall
Universidad Autónoma Metropolitana.
https://www.youtube.com/live/-iCy_2v7T6A



Webinar "Tu mundo con ciencia"

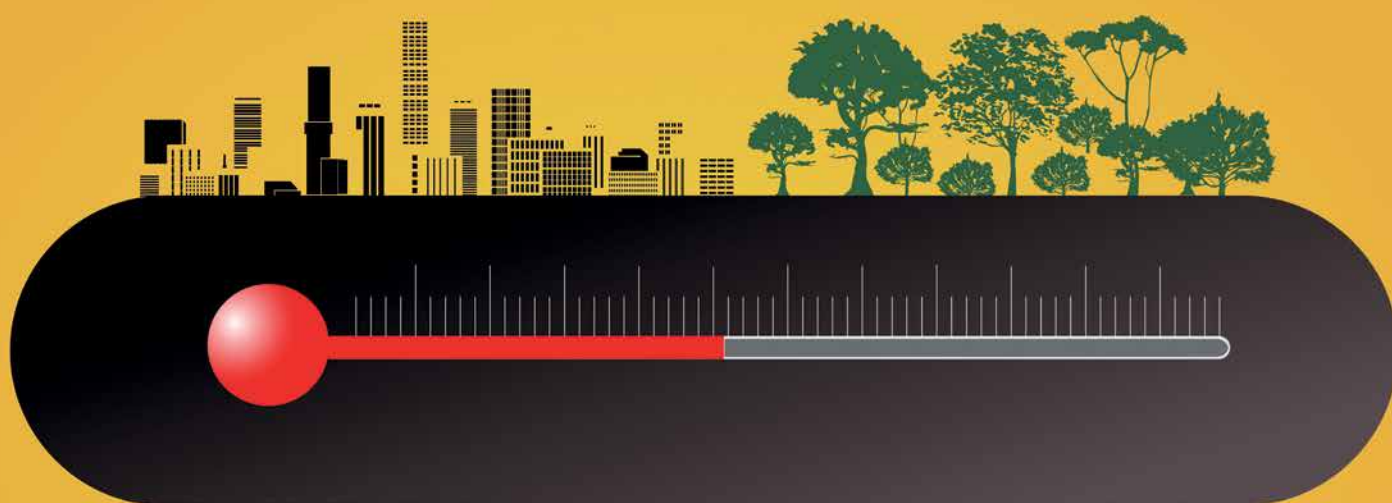
Continúa el ciclo de conferencias "Tu mundo con ciencia", impartido por exbecarias ganadoras de las Becas para Mujeres en la Ciencia L'Oréal-Unesco-AMC. Las pláticas se llevan a cabo el segundo jueves de cada mes y son transmitidas por los canales de las redes sociales de la AMC. Las conferencias están dirigidas a jóvenes de nivel bachillerato, para fomentar vocaciones científicas. En el mes de agosto de 2025 inició su quinta temporada. La conferencia más reciente es:

- 20 de agosto de 2026
"Astrocitos: los héroes invisibles del cerebro"
Mónica López Hidalgo
ENES Juriquilla, UNAM
<https://www.youtube.com/live/mAt5SMoMDuE>



En nuestro próximo número de
enero-marzo de 2027

CAMBIO AMBIENTAL GLOBAL Y SUSTENTABILIDAD



Casa abierta al tiempo

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA METROPOLITANA

