



ciencia

Revista de la Academia Mexicana de Ciencias

Novedades científicas

Los cactus: modelos únicos para la ciencia

Armonía a escala nanométrica

¿Cómo influye tu microbiota en la ansiedad?

Los viajes al espacio, un reto para el cuerpo humano

Acciones para el control de bacterias resistentes a los antibióticos

Evaluación de la calidad del tequila

Tales de Mileto: uno de los siete sabios de Grecia



Desde la UAM

- De moléculas a megafábricas. ¿Cómo se diseñan las transformaciones químicas que mueven el mundo?
- ¿Pueden los productos naturales contribuir al envejecimiento saludable? El caso del ácido vanílico
- ¿Van a desaparecer los libros? Cambio, resistencia y futuros posibles del mundo editorial
- La evaluación de políticas públicas: el caso de la educación



CONSEJO DIRECTIVO

agosto 2023 – agosto 2026

Presidente

José Antonio Seade Kuri

Vicepresidenta

Telma Gloria Castro Romero

Tesorera

Gloria Soberón Chávez

Secretarios

Elva Guadalupe Escobar Briones

Sergio López Ayllón

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

Desde el Comité Editorial
Juan Pedro Laclette

3

Novedades científicas

Los cactus: modelos únicos para la ciencia <i>Brenda A. López-Ruiz y Ulises Rosas</i>	6
Los viajes al espacio, un reto para el cuerpo humano <i>Sara Nahián Martínez Mosso, María Pía Mendoza Fonseca y Daniel García Martínez</i>	14
¿Cómo influye tu microbiota en la ansiedad? <i>Rodrigo Marroquín Quintanilla, Diana Sofía Bernal Vega y Alberto Camacho Morales</i>	20
Acciones para el control de bacterias resistentes a los antibióticos <i>Víctor Humberto Bustamante Santillán y Víctor Manuel Chávez Jacobo</i>	28
Metástasis: células cancerosas que no respetan fronteras <i>Miguel Ángel Sarabia Sánchez, Eduardo Alvarado Ortiz y Martha Robles Flores</i>	34
Los microARN: reguladores y controladores de funciones biológicas <i>Brandon Bautista-Becerril, Ruth Kenia Marcial Valdez y Ramcés Falfán-Valencia</i>	42
El misterioso mundo de los glicóARN <i>Christopher Hernández-Rodríguez, Brenda I. Dodge Velázquez y Roberta Salinas-Marín</i>	50
Cómete los tacos, ¡pero con salsa! <i>Vanesa Gutiérrez-Chávez, Berenice Palacios-González y Consuelo Lomas-Soria</i>	58
El mundo nanoscópico de los virus a través de la luz <i>Daniel Martínez Flores, Karla Yarentzi Contreras de la Torre y Luis Alfonso Vaca Domínguez</i>	66
Armonía a escala nanométrica <i>Cristian Felipe Cruz García y Luis Rodríguez Fernández</i>	74
La memoria episódica es más que un cúmulo de recuerdos <i>Selene Cansino</i>	82
¿Todo es medible? La métrica de las cosas <i>José Emilio Quiroz Ibarra y Jorge Ángel González Ordiano</i>	88
Evaluación de la calidad del tequila <i>Rocío Fonseca-Aguñaga, Walter M. Warren Vega y Luis A. Romero Cano</i>	94
Aprovechamiento de efluentes vinícolas para generar nuevos productos <i>Carlos Eduardo Guzmán Martínez y Claudia Gutiérrez-Antonio</i>	100
El desarrollo orientado al transporte (DOT) y su aplicación en México <i>Dorian Antonio Bautista-Hernández</i>	108
Tales de Mileto: uno de los siete sabios de Grecia <i>José Luis Álvarez García</i>	116

Desde la UAM

Presentación <i>Gustavo Pacheco López</i>	124
De moléculas a megafábricas. ¿Cómo se diseñan las transformaciones químicas que mueven el mundo? <i>Carlos O. Castillo Araiza, José Guillermo Rivera de la Cruz y José F. Durán Pérez</i>	126
¿Pueden los productos naturales contribuir al envejecimiento saludable? El caso del ácido vanílico <i>Silvestre Alavez, Ixchel Osorio Paz y Xareni Raquel Valle Jiménez</i>	130
¿Van a desaparecer los libros? Cambio, resistencia y futuros posibles del mundo editorial <i>Gerardo Kloss Fernández del Castillo</i>	135
La evaluación de políticas públicas: el caso de la educación <i>Claudia A. Santizo Rodall y Laura Flamand Gómez</i>	140

Desde las redes

Multivitamínicos contra el envejecimiento	145
Una avalancha astronómica	147
La IA como coautora fantasma de la ciencia <i>José Eduardo González Reyes</i>	149

Noticias de la AMC

150



Portada: Pixabay.



Contraportada: Pixabay.

ciencia, revista de la Academia Mexicana de Ciencias, volumen 77, número 2, correspondiente a abril-junio 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 Gallegos. 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
abril-junio 2026 volumen 77 número 2

Director fundador

Ignacio Bolívar Urrutia (1850-1944)

Director

Juan Pedro Laclette

Comité editorial

Raúl Antonio Aguilar Roblero
Dalila Aldana Aranda
Raymundo Cea Olivares
Gabriela Dutrént Bielous
Alonso Fernández Guasti
Gerardo Gamba Ayala
Adolfo Guzmán Arenas
Miguel Ángel Pérez de la Mora
Carlos Prieto de Castro
Sergio Sánchez Esquivel
Gina Zabludovsky Kuper

Editora

Rosanela Álvarez Ruiz

Corrección y enlace con autores

Leticia García Urriza

Social Media

José Eduardo González Reyes

Diseño y formación

Intidrinero, S.A. de C.V.

Ilustraciones

Ana Viniegra, pp. 7, 15, 21, 29, 59, 83, 89, 95, 101, 119
Pixabay, pp. 3, 13, 61, 63, 75, 97, 106, 107, 109, 132, 139, 142
Freepik, p. 80
Firefly (IA generativa de Adobe), pp. 16, 23, 24, 26, 32, 35, 43, 51, 55, 56, 67, 69, 71, 72, 77

Red

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



@CienciaAMC



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

En el presente número de la revista *Ciencia*, dedicado a Novedades científicas, hacemos entrega de una veintena de textos, que seguramente serán del interés de nuestros lectores. La primera característica de este número es su multidisciplina ya que incluye textos de biología, medicina y psicología, física, ingeniería y tecnologías, así como ciencias sociales e historia. Hemos procurado ordenarlos de acuerdo con una cierta afinidad temática, pero el lector puede consultarlos en un orden distinto.

El texto que da una hermosa portada al número presenta las cactáceas como plantas emblemáticas de México y como modelos científicos excepcionales por sus adaptaciones evolutivas a los ambientes áridos. Destaca cuatro rasgos clave: succulencia para almacenar agua, fotosíntesis CAM que abre estomas de noche para ahorrar agua, espinas derivadas de hojas modificadas y meristemas particulares que permiten formar cactus gigantes y raíces muy ramificadas.

Finalmente, se propone la *Mammillaria san-angelensis* como especie modelo para investigar la genética, raíces y microbioma de las cactáceas. Enseguida viene un artículo que nos explica que el cuerpo humano, diseñado para vivir en la Tierra, experimenta múltiples cambios al exponerse a microgravedad y a la radiación espacial durante los viajes espaciales. En el espacio disminuyen la densidad ósea, la masa muscular, el tamaño y fuerza del corazón, el volumen sanguíneo y se altera la respiración y el equilibrio, además de alteraciones psicológicas derivadas del aislamiento y el estrés prolongado. Aunque muchos cambios son reversibles al regresar a la Tierra, se describe que el plan para llegar y eventualmente colonizar Marte debe superar retos médicos y tecnológicos antes de que se puedan lograr estancias humanas prolongadas en el espacio.

Luego pasamos a aprender que, en los últimos años, se ha identificado al eje intestino-cerebro como



un actor clave, que conecta los sistemas nervioso, endocrino e inmune con la microbiota intestinal. Una microbiota equilibrada favorece la producción de neurotransmisores, mientras que su desequilibrio puede promover inflamación y mayor riesgo de ansiedad. Las terapias como el trasplante de microbiota fecal son prometedoras, pero aún se requieren más estudios para confirmar su eficacia clínica. A continuación, se describe un tema de gran pertinencia médica: la resistencia bacteriana a los antibióticos, que es una grave amenaza mundial que pone en riesgo el tratamiento de infecciones y procedimientos médicos, con millones de muertes asociadas y proyecciones alarmantes hacia 2050. Esta problemática ha sido causada por el uso excesivo e inadecuado de antibióticos en humanos, animales y agricultura. Para enfrentarla, la Organización Mundial de la Salud y distintos países, incluido México, intentan regular el uso de los antibióticos existentes y fomentar el desarrollo de nuevos antimicrobianos. Para continuar con un tema médico, el siguiente artículo explica que la metástasis –principal causa de muerte por cáncer– ocurre cuando células del tumor primario se desprenden y viajan por sangre o linfa para colonizar otros órganos. Introduce el concepto de organotropismo para explicar el hecho de que ciertos órganos ofrecen microambientes más adecuados para que prosperen células metastásicas. Concluye que el gran reto científico y clínico es detectar y eliminar selectivamente células metastásicas ocultas para prevenir recurrencias y mejorar la supervivencia.

Ahora nos introducimos en el mundo de la información genética. Durante muchos años, gran parte del material genético fue considerado “basura”, hasta que se descubrieron los microARN (miARN), que regulan la expresión génica y cuyo hallazgo mereció un Premio Nobel de Medicina. Este sistema de regulación fina es esencial tanto en el desarrollo embrionario como en el mantenimiento del equilibrio celular en la vida adulta. Actualmente se investigan los miARN como biomarcadores y blancos terapéuticos, lo que abre nuevas posibilidades para el diagnóstico y la medicina personalizada. Sobre la misma línea surgen los glicoARN, que son moléculas de ARN modificadas con carbohidratos que han establecido un

punto entre la biología molecular y la glicobiología. Estudios recientes muestran que varios tipos de ARN no codificante pueden glicosilarse y localizarse en la membrana celular para involucrarse en procesos de comunicación celular y respuesta inmune, incluyendo inflamación, adhesión celular y evasión tumoral. Los glicoARN se han convertido en un tema de frontera en la investigación biomédica.

La obesidad es una enfermedad compleja en la que intervienen factores genéticos, metabólicos y la microbiota intestinal. En el siguiente artículo del número nos enteramos de una interesante y sabrosa propuesta para comer alimentos con chile, ya que éste contiene compuestos bioactivos, como la capsaicina, que pueden modular la microbiota y favorecer el gasto energético y la oxidación de grasas. Su incorporación en una dieta equilibrada podría contribuir a la prevención de la obesidad. A continuación, nos adentramos a las técnicas microscópicas de superresolución, como la forma de superar el límite de difracción de la luz. La técnica STORM permite reconstruir imágenes de altísima resolución para localizar fluoróforos “molécula por molécula”, revelando la organización de proteínas virales. Esta técnica aplicada en baculovirus abre nuevas oportunidades para mejorar herramientas biotecnológicas.

En el siguiente artículo aprenderemos que la irradiación iónica de superficies sólidas puede generar nanopatrones (ondas, rayas, panales) a escala nanométrica. Este proceso ocurre cuando iones energéticos transfieren energía a los átomos del material. Los patrones resultantes pueden observarse mediante microscopios electrónicos de barrido y de fuerza atómica y tienen aplicaciones prometedoras en celdas solares, implantes médicos, puntos cuánticos y sensores avanzados dentro de la nanotecnología.

Seguramente que nuestros lectores interesados en las neurociencias serán atraídos por el siguiente texto que explica la memoria episódica como un sistema que almacena nuestros recuerdos personales y nos permite tener identidad y continuidad en el tiempo. Anatómicamente, depende principalmente del hipocampo y de una red que incluye cortezas del lóbulo temporal medial y la corteza prefrontal, encargadas de integrar y recuperar el contexto de las experien-

cias. Aunque su deterioro es parte del envejecimiento normal, puede mitigarse mediante el ejercicio mental y el uso frecuente de nuestros recuerdos.

A continuación, nos adentramos en el tema de las métricas de índole diversa, como medidas cuantitativas que permiten evaluar, comparar y mejorar sistemas en distintos ámbitos, desde personas hasta organizaciones y tecnología. Es fundamental privilegiar datos cuantitativos, documentarlos adecuadamente y almacenarlos de forma sistemática para su análisis histórico y pronóstico. En la era digital, las métricas se han convertido en herramientas esenciales para la toma de decisiones, la mejora continua y la competitividad. Y qué mejor campo para aplicar el tema de las métricas que la evaluación de la calidad del tequila, nuestra bebida emblemática. El siguiente artículo propone el desarrollo de un banco isotópico como herramienta científica para garantizar la autenticidad del tequila y proteger su Denominación de Origen. Es posible verificar si los azúcares que se utilizan en su elaboración provienen del *Agave tequilana* y trazar el envejecimiento del tequila. Esta interesante estrategia puede fortalecer los controles de calidad que realiza el Consejo Regulador del Tequila en nuestro país.

En el texto que sigue podemos aprender que por cada litro de vino producido en una bodega se generan grandes volúmenes de efluentes, ricos en azúcares, etanol y compuestos orgánicos que pueden dañar el ambiente si no se tratan adecuadamente. Además de describir el proceso de elaboración del vino, los autores plantean que sus desechos pueden revalorizarse mediante tecnologías químicas, biológicas, bioquímicas o termoquímicas para obtener productos de valor agregado. Destaca el concepto de biorrefinería, que integra varios procesos para producir simultáneamente biocombustibles, bioenergía y materiales útiles sin competir con alimentos. También para mejorar las condiciones de vida, el siguiente texto explica que el Desarrollo Orientado al Transporte (DOT) busca integrar la planeación del uso de suelo urbano con sistemas de transporte público para fomentar ciudades más densas, accesibles y menos dependientes del automóvil. Destaca que el DOT puede impulsar crecimiento económico, capturar plusvalías y reducir desigualdades si se planifica adecuadamente. Concluye que

México requiere reformas institucionales, resultado de un debate público sólido para implementar estrategias de DOT adaptadas a un contexto urbano.

Concluimos la sección de Novedades científicas con un artículo que nos narra que en el siglo VI a. n. e., en las colonias jonias surgió una nueva forma racional de explicar la naturaleza, más allá de las interpretaciones mitológicas tradicionales. Tales de Mileto fue una figura central de este cambio, al proponer que el agua era el principio fundamental (*arché*) de todas las cosas. Se le atribuye la predicción del eclipse solar del 585 a. n. e. y la formulación de proposiciones geométricas abstractas que influyeron en la matemática posterior. Tales de Mileto impulsó un pensamiento basado en demostraciones racionales. Su legado marca el inicio de la filosofía y de la ciencia occidentales.

Continúa la sección Desde la UAM, que es la generosa institución que patrocina el presente número de nuestra revista. ¿Quién mejor que el propio Rector de la Universidad Autónoma Metropolitana para hacer la presentación de cuatro textos, los cuales dan cuenta de los “Premios a la Investigación” con base en reportes de investigaciones originales publicados entre 2023 y 2024? Los premios incluyen cuatro categorías: ciencias básicas e ingeniería, ciencias biológicas y de la salud, ciencias y artes para el diseño, y ciencias sociales y humanidades. Les recomiendo leer la presentación que nos hace el Prof. Dr. Gustavo Pacheco López de los cuatro textos de esta sección.

En nuestra sección Desde las redes se reúnen tres interesantes notas: la primera, sobre suplementos vitamínicos que podrían retrasar el envejecimiento; la segunda sobre las asombrosas imágenes astronómicas del cielo que el Observatorio Vera C. Rubin, ubicado en el Cerro Pachón de Chile, ha capturado recientemente; y la tercera acerca del papel de la IA como coautora fantasma de un buen número de textos científicos.

Para concluir, en la sección de Noticias de la AMC, informamos sobre el sensible fallecimiento del doctor Raúl Ávila, distinguido académico y miembro prominente del Comité Editorial de nuestra revista.

JUAN PEDRO LACLETTE

Brenda A. López-Ruiz y Ulises Rosas

Los cactus: modelos únicos para la ciencia

Las cactáceas son plantas únicas que dominan los ambientes áridos y semiáridos de México. Pueden presentar desde una forma globosa hasta la de un imponente cactus columnar. Estas plantas han impactado la vida social, cultural y económica de nuestro país, y para la ciencia son modelos excepcionales de investigación, pues presentan características evolutivas inigualables: desde sus mecanismos de conservación de agua y fotosíntesis, hasta su sorprendente longevidad y resiliencia. En este texto explicaremos cómo los cactus pueden ser una oportunidad para ampliar nuestros conocimientos en diversas áreas de las ciencias biológicas.

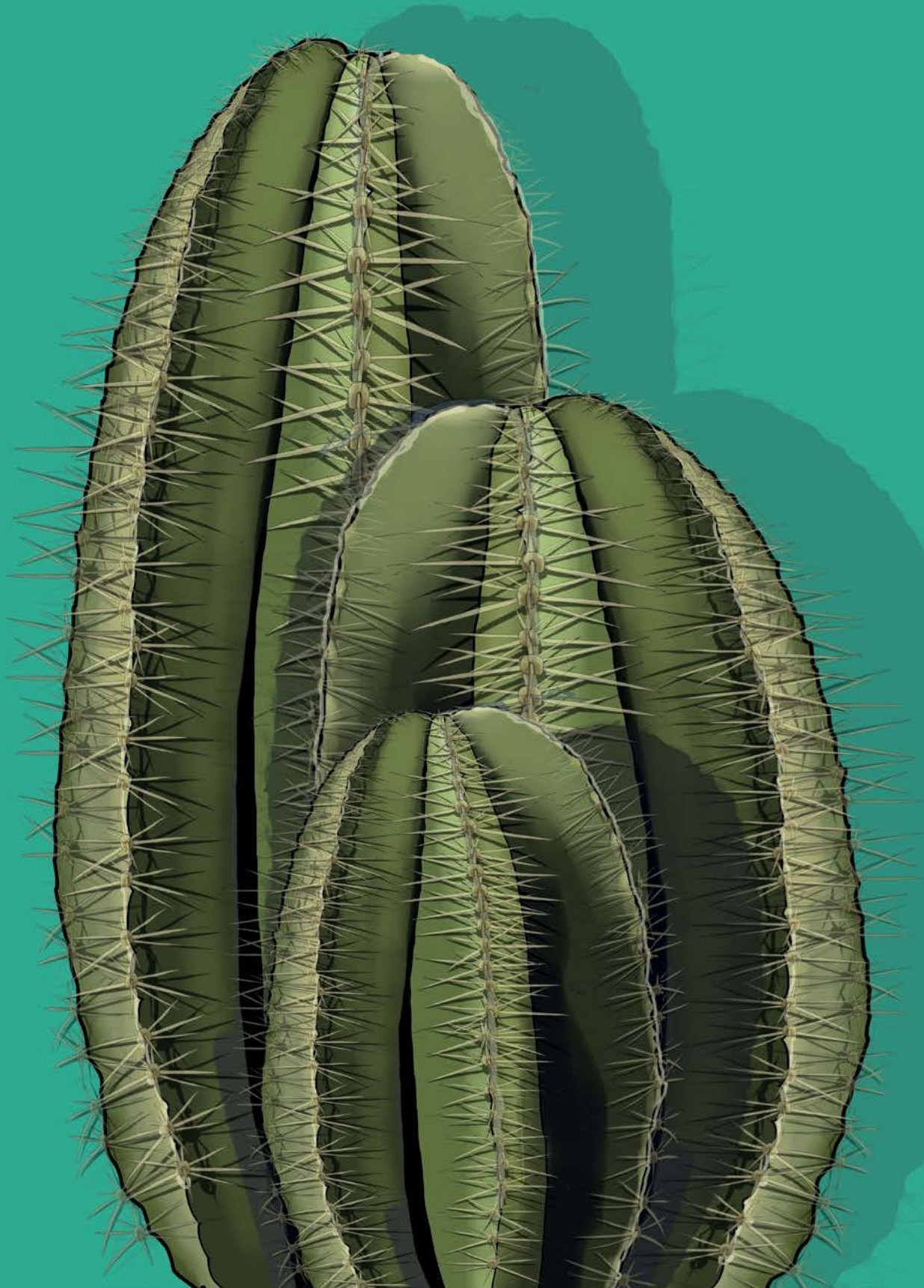
¿Cómo estudiar la evolución y el desarrollo en los cactus?

La evolución es un tema apasionante. Estudiarla nos ha permitido entender cómo pasamos desde organismos formados por una sola célula hasta la gran diversidad de organismos que existen actualmente. Si unimos *evo*, de “evolution”, y *devo*, de “development”, tenemos el término *evo-devo*, un campo de la biología que se encarga de entender los mecanismos que dirigen el desarrollo de los organismos y cómo estos mecanismos traen consigo cambios evolutivos en los rasgos observables de un ser vivo. En español se le conoce como biología evolutiva del desarrollo y trata de entender cómo surgen las estructuras y patrones novedosos; es decir, aquellas características que emergen en una especie como resultado de la evolución. Estas novedades pueden proporcionar ventajas adaptativas que les permiten sobrevivir y reproducirse en su entorno.

Los primeros estudios de *evo-devo* se enfocaron en indagar cómo crecen y se desarrollan los animales con cuerpos simétricos, como las moscas. Los científicos querían entender cómo se organizaban las partes delantera y trasera de estos animales y descubrieron que hay genes que se encargan de esta polaridad a través de los llamados genes *homeóticos* —como los genes **Hox**—, los cuales son genes maestros que participan en el desarrollo de las partes del cuerpo. Cuando comparamos diferentes especies de animales, estos genes Hox son muy parecidos, y son requeridos para construir cualquier animal: los encontramos en una mosca, en un ratón o en

Genes Hox

Secuencias de ADN que dan las instrucciones para que se formen las partes o segmentos de los animales, como la parte delantera, la trasera, la cabeza o la cola. Estos genes se han conservado en todos los animales y su duplicación ha originado la gran diversidad que existe.



el ser humano. En la evolución del desarrollo, sin embargo, estos genes se duplicaron, dando lugar a la creación de los diferentes patrones en los animales.

Para los estudios de *evo-devo*, en el caso de las plantas se ha utilizado a la especie modelo *Arabidopsis thaliana* (una planta que pertenece a la misma familia del brócoli y la col), con el fin de entender cómo se desarrolla la hoja, la raíz o la flor. Con el *evo-devo* se busca entender cómo las vías de desarrollo de un órgano se han usado y reusado para formar diferentes patrones corporales en las demás plantas. Un aspecto importante es que *Arabidopsis thaliana* no presenta adaptaciones a climas como los áridos y semiáridos, que sí poseen los miembros de la familia Cactaceae (**Figura 1**). Aquí vamos a abordar cuatro adaptaciones evolutivas de los cactus: la capacidad de almacenar agua, su singular tipo de fotosíntesis, la presencia de espinas y sus excepcionales **células troncales o meristemáticas**, que originan plantas enormes y raíces adaptadas a ambientes extremos.

- **Sobreviviendo en el desierto: adaptaciones para la conservación de agua**
- Los cactus han evolucionado para resistir climas extremadamente calurosos y áridos. Esto se debe al desa-

rollo de tallos suculentos que les permiten maximizar la absorción y retención de agua en tiempos de sequía prolongada. El término *suculencia* se refiere aquí a la capacidad de los tejidos como hojas, tallo o raíces de almacenar agua incrementando su volumen. Además de la resistencia a la aridez, la suculencia se asocia con la tolerancia a la salinidad, ya que está ligada con la dilución de sales tóxicas en los tejidos.

Los cactus presentan una amplia variedad de formas anatómicas para almacenar agua, como los tallos ramificados y aplanados en los nopales, formas globosas o de barril como en los *Echinocactus grusonii*, también llamado “asiento de suegra”, y los impresionantes cactus columnares, como el *Pachycereus weberi* o el *P. pringlei*, llamado comúnmente cardón gigante (**Figura 2**).

- **La fotosíntesis tipo CAM, una fascinante adaptación**
- La mayoría de las plantas son autótrofas, es decir, transforman mediante la fotosíntesis el dióxido de carbono (CO₂) del ambiente y la luz solar en su alimento en forma de azúcares. Durante el día, el CO₂ entra a través de los estomas, los cuales son pequeños poros que regulan el intercambio de gases en la planta. Sin embargo, cuando el agua es limitada, como

Células troncales o meristemáticas
Células pequeñas y totipotentes que se dividen activamente para generar el crecimiento de tallos, flores y raíces.

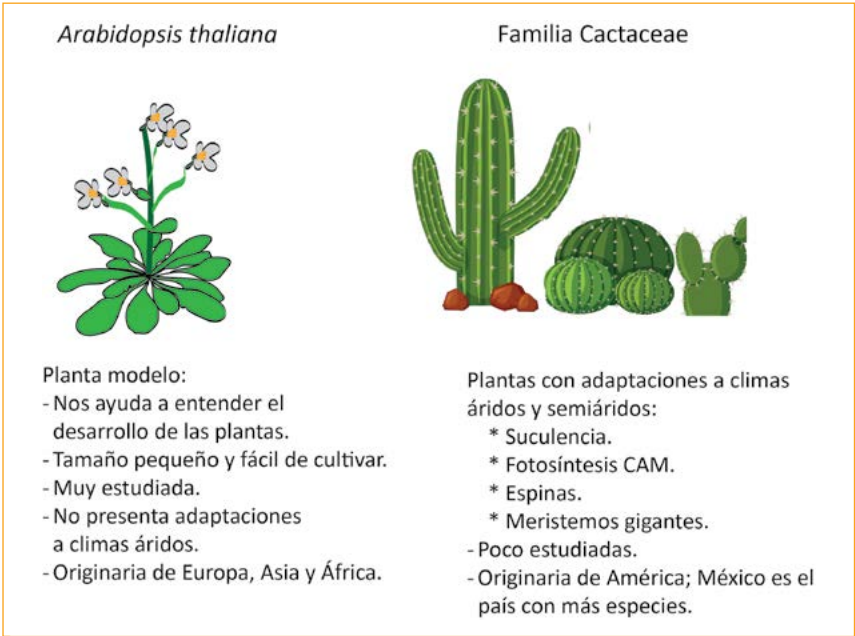


Figura 1. Características de *Arabidopsis thaliana*, la planta modelo más estudiada en la ciencia, y de los miembros de la familia Cactaceae, que se caracterizan por presentar adaptaciones a climas áridos.



Figura 2. Formas anatómicas de algunos miembros de la familia Cactaceae: tallos ramificados y aplanados en opuntias o nopales **(A)**; formas globosas en mammillarias **(B)**; de barril en *Echinocactus grusonii* **(C)**, y columnares en *Pachycereus weberi* **(D)**.

en la temporada de sequía, los estomas se cierran para evitar su pérdida. Esto podría ser un problema, ya que el cierre de los estomas, además de prevenir la evaporación del agua, también hace que el CO_2 no entre, provocando que la planta no pueda llevar a cabo la fotosíntesis. Para solucionar esto, las cactá-

ceas y otras plantas desarrollaron una solución muy interesante: sus estomas se abren durante la noche cuando la temperatura es menor y la humedad es mayor **(Figura 3)**. Es así como durante la noche las cactáceas captan el CO_2 y lo almacenan temporalmente en una sustancia llamada ácido málico en sus

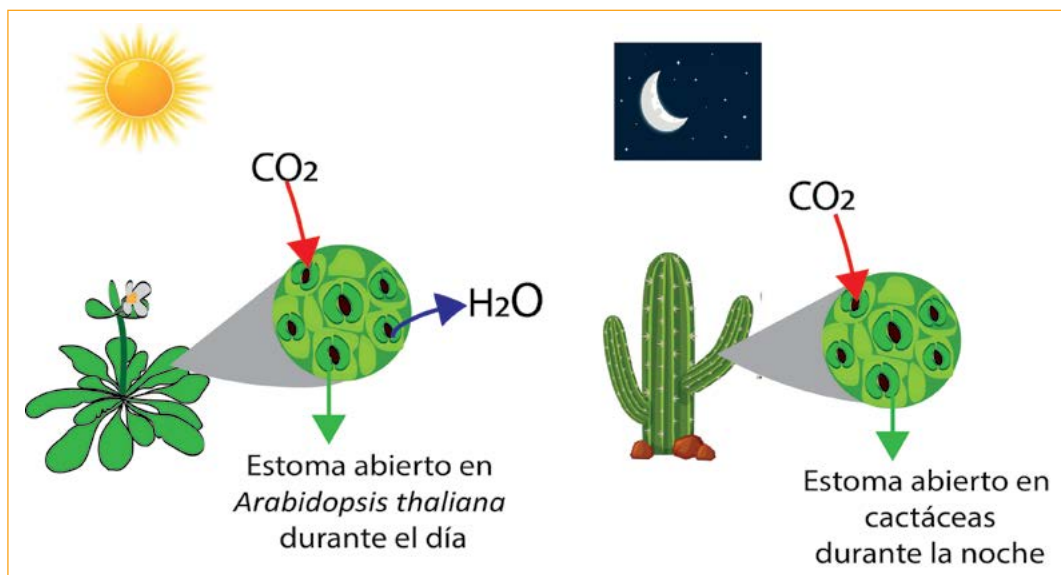


Figura 3. Durante el día, ciertas plantas, como *Arabidopsis thaliana*, mantienen los estomas abiertos para capturar el CO_2 y llevar a cabo la fotosíntesis; sin embargo, esto hace que también pierdan agua debido a la evapotranspiración, que es mínima debido al ambiente favorable donde viven. En el caso de las cactáceas, abren sus estomas en la noche para capturar el CO_2 y posteriormente realizar la fotosíntesis. Esta estrategia les permite no perder agua durante el día.

Células totipotentes
Las células presentes en las zonas meristemáticas de las plantas y que pueden generar cualquier tipo de órgano.

tejidos. Durante el día, cierran sus estomas para evitar la pérdida de agua y liberan el CO_2 almacenado para llevar a cabo la fotosíntesis, lo que les permite ser más eficientes en la utilización del agua. Este tipo de fotosíntesis se conoce como metabolismo ácido de las crasuláceas (CAM, por las siglas en inglés: *crassulacean acid metabolism*).

Los científicos han encontrado una relación entre succulencia y la fotosíntesis tipo CAM que han denominado como síndrome de la succulencia, lo que les ayuda a optimizar el uso del agua en zonas áridas gracias a una combinación de ambos rasgos: almacén del vital líquido en los tejidos succulentos y la apertura de estomas en la noche. La mayoría de las plantas con el tipo de fotosíntesis CAM son succulentas, ya que la succulencia puede incrementar el tejido destinado a realizar la fotosíntesis y, a la vez, favorece que el CO_2 no se escape de la planta.

■ ■ ■ Construyendo un gigante con raíces extensas

■ Todos los tejidos u órganos de cualquier ser vivo provienen de células troncales o meristemáticas que se dividen y diferencian en células especializadas. En el caso de las plantas, esas células troncales se conocen como meristemáticas. En los meristemas las

células totipotentes proliferan para producir todos los órganos y tejidos de la planta. De forma general, hay dos meristemas principales en las plantas: el meristemo apical del tallo o SAM (por las siglas en inglés: *shoot apical meristem*) y el meristemo apical de la raíz o RAM (del inglés: *root apical meristem*). El SAM origina todos los tejidos aéreos, como las hojas, las flores y el tallo, mientras que el RAM forma las raíces, que pueden ser una raíz principal o raíces laterales, las cuales derivan de la principal.

Los cactus de gran tamaño, como el *Echinocactus platyacanthus*—conocido como “biznaga burra” y que llega a medir más de medio metro de ancho—, tienen un SAM de casi dos milímetros y medio de diámetro; es decir, es posible verlo a simple vista. Esto constituye una novedad dentro de las plantas, ya que la mayoría de los SAM miden de 0.1 a 0.3 mm y para verlos es necesario usar un microscopio. En la planta adulta de *Arabidopsis thaliana*, el SAM es de apenas 0.07 mm; es decir, 35 veces más pequeño que el de *Echinocactus platyacanthus*. ¿Y por qué los SAM de este cactus y de otros requieren ser tan grandes? Pues se piensa que es para crear plantas enormes que puedan ser barriles de agua y resistir condiciones adversas como las sequías prolongadas (Figura 4).

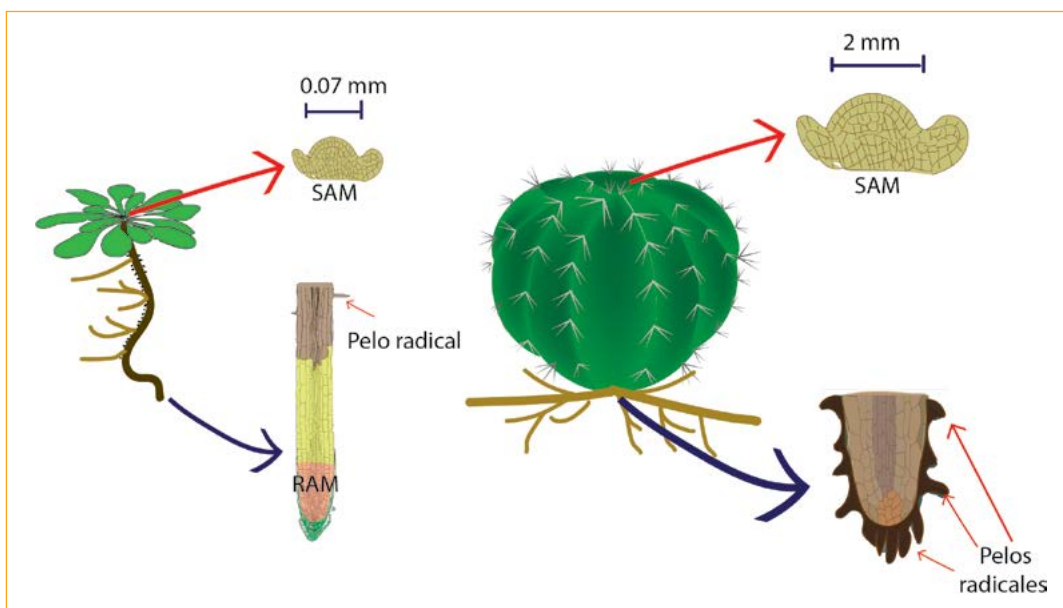


Figura 4. Comparación entre los meristemas de *Arabidopsis thaliana* y *Echinocactus platyacanthus*. *Arabidopsis thaliana* tiene un meristemo apical aéreo (SAM) más pequeño, comparado con el de *Echinocactus platyacanthus*. La raíz de *Arabidopsis thaliana* continúa creciendo de forma indeterminada y está dividida en zonas. En la imagen se observa en la zona de color rosa la zona proliferativa o RAM; la zona amarilla es donde las células se alargan y en la parte café las células maduran y forman los pelos radicales. En la raíz primaria de *Echinocactus platyacanthus* las células se diferencian de forma muy rápida y desarrollan pelos en la punta de la raíz, lo que significa que se perdió la zona proliferativa. Este proceso ayuda a que las raíces crezcan principalmente de forma horizontal mediante raíces laterales (indicadas en café claro).

En el caso de las raíces, éstas funcionan para dar anclaje a la superficie y para absorber agua y nutrientes provenientes del suelo. Con la raíz principal de los cactus sucede un fenómeno muy interesante. En la mayoría de las cactáceas se ha encontrado que aproximadamente dos días después de que germinan las semillas, las células proliferativas del RAM se agotan; es decir, dejan de dividirse y comienzan a diferenciarse formando pelos radicales, algo que comúnmente sólo sucede en la parte más alejada del RAM (Figura 4). Además, conforme se agota el RAM de la raíz principal comienzan a aparecer raíces laterales. Se ha sugerido que este proceso es una adaptación que promueve la formación de raíces muy ramificadas con mayor capacidad para absorber nutrientes y agua, permitiendo que las plántulas de cactáceas puedan sobrevivir en ambientes con periodos cortos de humedad (Figura 4).

las cactáceas al medio ambiente (Figura 5). Las espinas no sólo son funcionales como armadura natural contra depredadores, sino que también les sirven a los investigadores como una forma de identificación de cactáceas. Se dice que la presencia de espinas es una característica primitiva presente en la mayoría de los miembros de la familia Cactaceae; aunque en algunas especies ha desaparecido. Se cree que las espinas son hojas modificadas que han perdido su capacidad de realizar fotosíntesis para convertirse en agujas o cerdas. Las espinas derivan de la areola, la estructura única que caracteriza a las cactáceas y se trata de una estructura afelpada donde se originan las flores, pelos y espinas. Entre las funciones de las espinas está la protección contra los depredadores que intenten comerse a los cactus, también funcionan como una protección contra los rayos ultravioleta, para coleccionar agua y como una forma de dispersión.

Espinación estratégica

La diversidad de formas, tamaños y colores de las espinas es un ejemplo de la increíble adaptación de

¿Qué hacemos en el laboratorio?

En nuestro laboratorio nos hemos propuesto usar a *Mammillaria san-angelensis* como especie modelo



Figura 5. Diversidad de espinas en doce especies de cactus; es de notar la disposición, color y número de ellas.

para estudiar las bases genéticas de la arquitectura de la raíz, el microbioma asociado a la raíz y el meristemo apical aéreo de las cactáceas. Esta especie es nativa de la Reserva Ecológica del Pedregal de San Ángel y presenta un ciclo de vida relativamente corto; es de fácil reproducción y recientemente comenzamos a secuenciar su genoma, lo que permite buscar los genes involucrados en las novedades evolutivas descritas en este artículo.

Mammillaria san-angelensis podría convertirse en un modelo equivalente a *Arabidopsis thaliana*, pero en cactáceas, con el que pueda comprenderse cómo la evolución ha generado programas de desarrollo que se traducen en la increíble diversidad de cactáceas que vemos en nuestro país.

Brenda Anabel López Ruiz

Jardín Botánico del Instituto de Biología de la UNAM.

brenda.lopez@st.ib.unam.mx

Ulises Rosas

Jardín Botánico del Instituto de Biología de la UNAM.

urosas@ib.unam.mx

Lecturas recomendadas

López Ruiz, B. A. (2020), "Origen y evolución de los cactus", *Contactos: Revista de Educación en Ciencias e Ingeniería*, 118:57-62. Disponible en: <https://contactos.ibt.uam.mx/index.php/contactos/article/view/86/69>, consultado el 27 de enero de 2026.

Schwertner-Charão, L., J. Treviño-Carreón y R. Delgado Martínez (2023), "Las fascinantes adaptaciones de las cactáceas y su historia evolutiva", *Ciencia/ergo-sum: Revista Científica Multidisciplinaria de Perspectiva de la Universidad Autónoma del Estado de México*, 30(2):1-6. Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=10474861006>, consultado el 27 de enero de 2026.

Zavaro Pérez, C. y F. Maniago (2023), ¿Por qué tienen espinas los cactus?, *Herreriana*, 5(2):25-31. Disponible en: <https://doi.org/10.29057/h.v5i2.9888>, consultado el 27 de enero de 2026.



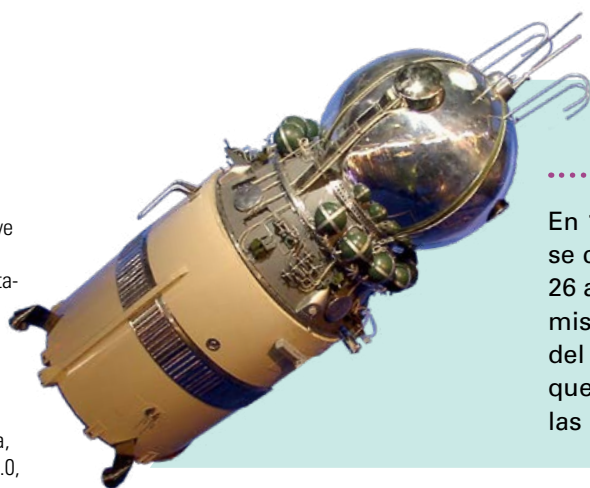
Sara Nahíán Martínez Mosso, María Pía Mendoza Fonseca y Daniel García Martínez

Los viajes al espacio, un reto para el cuerpo humano

Alguna vez te has preguntado qué le pasaría a tu cuerpo si viajaras al espacio. Aquí te contamos los cambios que tendrían lugar en tu corazón, pulmones y otros órganos al salir del planeta Tierra, así como en qué punto nos encontramos hoy en cuanto a la posible colonización de Marte.

El espacio: un reto para tu cuerpo

Desde que Yuri Gagarin, en 1961, se convirtió en la primera persona en viajar al espacio a bordo de un cohete que le dio una vuelta completa a la Tierra, nuestra curiosidad ha crecido al punto de que hemos enviado cientos de misiones para explorar el universo desconocido. Aunque esto es muy interesante, llevar a las personas al espacio no es una tarea fácil, ya que el cuerpo humano está diseñado para habitar la Tierra y cuando se encuentra en condiciones fuera de ella, le toma tiempo adaptarse.



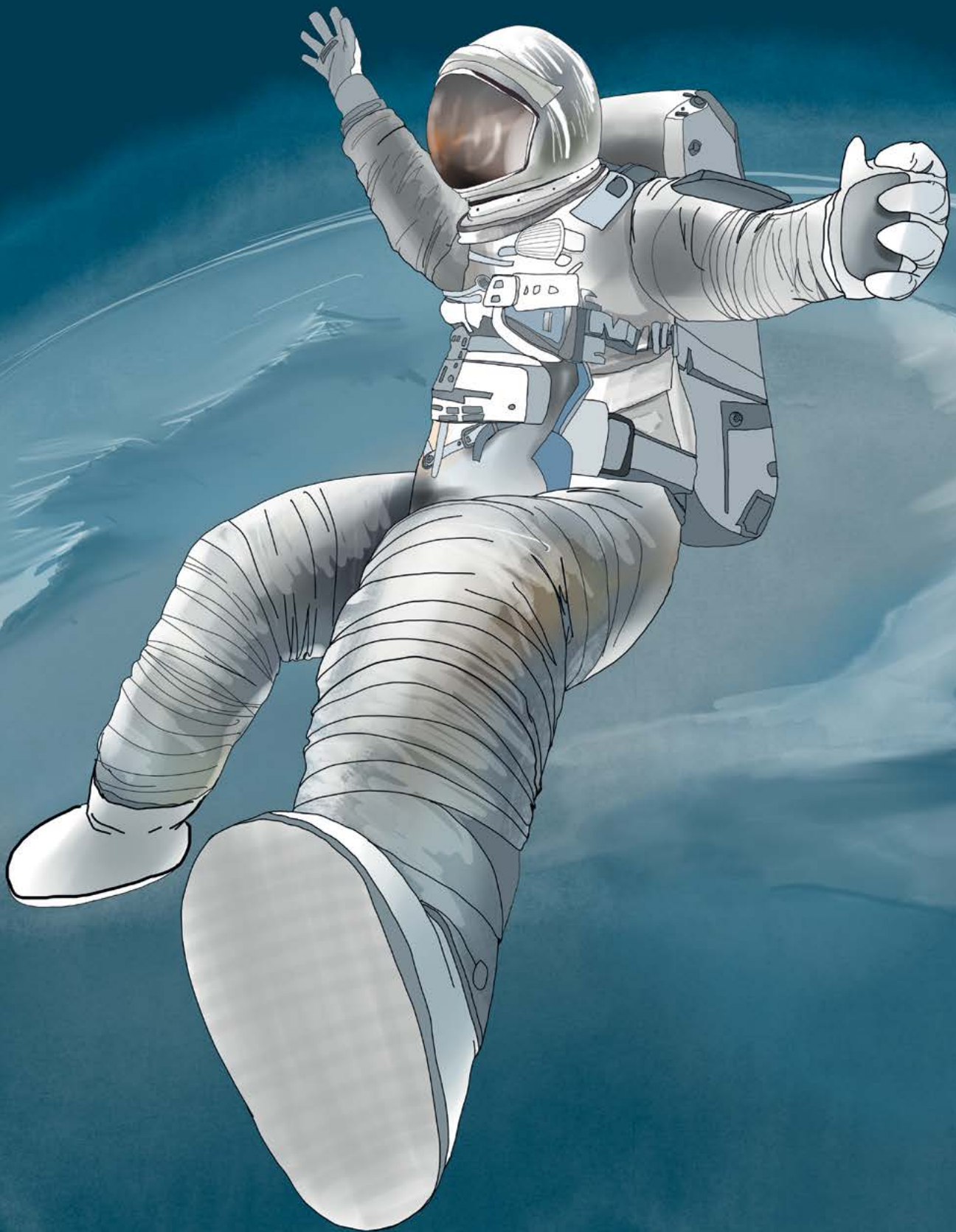
Modelo de la nave espacial Vostok. Foto tomada y editada por Benutzer: HPH en la exposición "Rusia en el espacio" (Aeropuerto de Frankfurt, Alemania, 2002). CC BY-SA 3.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=176728>

Dato curioso

En 1963, a bordo de la nave Vostok 6, Valentina Tereshkova se convirtió en la primera mujer en ir al espacio. Con sólo 26 años, logró orbitar la Tierra 48 veces en casi 3 días. Esta misión fue un paso muy importante para la investigación del espacio, y para las mujeres, ya que Valentina demostró que la investigación científica es un ámbito abierto a todas las personas.

Retos en el espacio

Existe una fuerza llamada gravedad que marca la forma en que se ven atraídos dos cuerpos a cierta distancia. Gracias a ella nos mantenemos unidos al suelo y no



salimos lanzados al espacio a pesar de que la Tierra gira alrededor de su eje a una velocidad de 107 280 km por hora (¡esto es 283 veces más rápido que un coche de carreras de Fórmula 1!). En una misión espacial, la nave y todo lo que hay en su interior siguen siendo atraídos por la fuerza de gravedad de la Tierra, a pesar de alejarse de ella. No obstante, al haber ausencia de un suelo fijo que ponga fin a esta caída libre constante, los pasajeros y objetos experimentan lo que conocemos como microgravedad, que da la impresión de que los objetos no tienen peso. Aunque esto parezca magia, es ciencia. En estas condiciones, la Administración Nacional de Aeronáutica y el Espacio (NASA) ha descubierto que el cuerpo humano pierde de 1 a 1.5 % de los componentes de los huesos.

El problema no es sólo la microgravedad, otro reto al que nos enfrentamos es la energía en forma de ondas que lanzan algunos cuerpos, que conocemos como radiación. Estas ondas y partículas están presentes en nuestra vida diaria sobre la Tierra, donde recibimos rayos X, rayos gamma y radiación cósmica proveniente del espacio –el Sol, por ejemplo, al ser una estrella, es capaz de liberar este tipo de energía–. En la Tierra, gran parte de esta radiación no nos afecta gracias a una capa invisible que se llama atmósfera, la cual nos protege. En el espacio, sin embargo, perdemos este escudo y puede dañar a nuestro cuerpo (NASA, 2022).

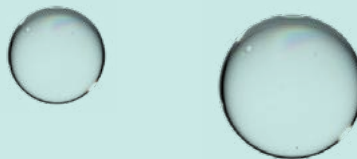
La microgravedad causa alteraciones en el cuerpo y la radiación ionizante puede causar efectos biológicos, dependiendo de la cantidad recibida. En la **Figura 1** aparecen algunos de los principales cambios que experimenta el organismo, de los cuales hablaremos a continuación.

Retos para el cuerpo humano

Sistema cardiovascular

Normalmente, la sangre sigue un recorrido que inicia en el corazón enviando sangre que contiene oxígeno y nutrientes al cuerpo a través de las arterias. Una vez que pasa por todos los órganos, se recolecta en las venas, que regresan al corazón para después llevarla a los pulmones, oxigenarla y realizar

Dato curioso



Recordarás que se mencionó que no existe una fuerza de gravedad significativa en el espacio, razón por la que los líquidos ya no se mantienen tan fácilmente en los contenedores. En el cuerpo humano pasa lo mismo, a través de un proceso lento sale el líquido desde los vasos al resto del cuerpo. Uno de los efectos que tiene esta salida de líquido es un estado en el que se hincha la cara de las personas, conocido como *síndrome de pata de gallina*.

el mismo recorrido. El corazón, venas y arterias forman parte del sistema cardiovascular.

En la Tierra, el corazón, al ser un órgano muy fuerte conformado de músculo, está preparado para vencer la fuerza de gravedad que jalaría la sangre a los pies durante este recorrido. En un inicio el trabajo del corazón aumenta hasta por 8 días; después de esto, debido a que en el espacio hay poca gravedad, finalmente empieza a latir con menor intensidad. Durante ese tiempo, la manera en que el cuerpo intenta adaptarse es disminuyendo la cantidad de músculo en el corazón (hasta en un 8 %), así como la cantidad de glóbulos rojos y de sangre (en un 15 %).

Aparato respiratorio

El aparato respiratorio se encarga de meter aire por un sistema de conductos que inician en la nariz, continúa en la tráquea, bronquios, bronquiolos y finalmente llega a los alvéolos. En esta última parte del aparato se lleva a cabo el intercambio gaseoso; dicho de otra manera, entra el oxígeno a los vasos y sale el dióxido de carbono siguiendo el mismo recorrido.

Este sistema es muy fácil de afectar con la modificación de las presiones a las que se está expuesto en distintas condiciones; por ejemplo, la presión del

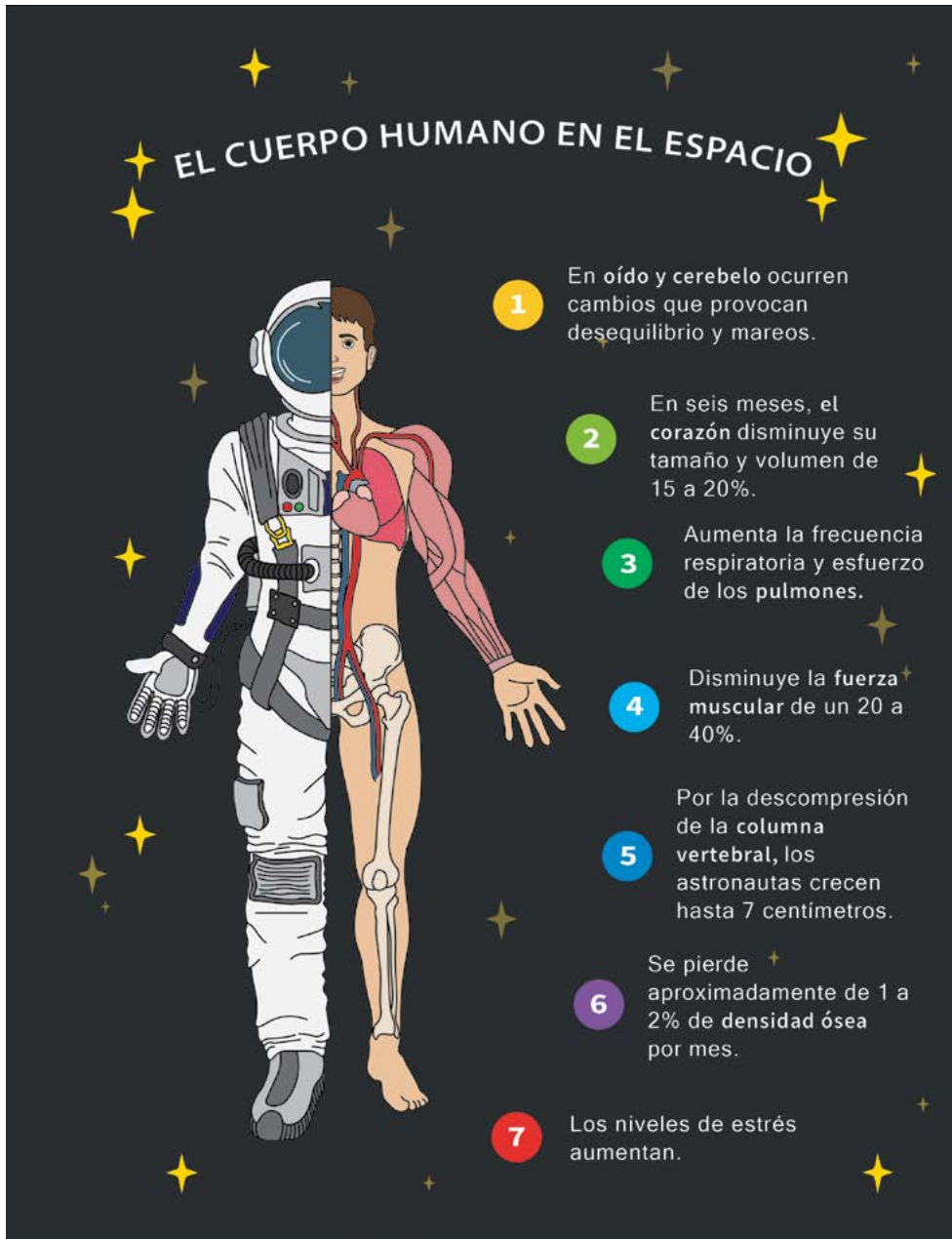


Figura 1. Adaptación del cuerpo humano al espacio. En la imagen se muestra una infografía en la que se hace énfasis en las alteraciones más importantes observadas en órganos y funciones vitales. Crédito: Sara Nahián Martínez Mosso.

aire que se experimenta en la playa es muy diferente a la que se experimenta en el monte Everest.

Los factores a tomar en cuenta para este cambio son la presión atmosférica y la concentración de oxígeno. La primera está constituida por la fuerza que ejercen en conjunto las capas de gases sobre la superficie terrestre; mientras que la segunda, la concentración de oxígeno, se determina midiendo la cantidad de partículas de este gas que hay en de-

terminado volumen. Ambas tienen una relación directa. Entre mayor sea la presión atmosférica, mayor será la cantidad de partículas de gas que habrá a esa altura; es decir, se concentran. A medida que aumenta la altitud en la Tierra, la presión atmosférica es menor, por lo que los gases que respiramos empiezan a dispersarse, haciendo que el cuerpo aumente la frecuencia respiratoria para compensar la menor entrada de oxígeno.

Sin embargo, estos principios sólo se aplican en la Tierra; en el espacio la presión es prácticamente cero debido a la ausencia de atmósfera. En una nave espacial la presión total en el interior es más baja que la de la Tierra, no porque esté a una mayor altura, sino porque mediante equipos especializados los ingenieros disminuyen esta presión total para evitar una diferencia grande entre la presión dentro de la nave y la que hay en el espacio, lo que representa un cambio en el entorno del astronauta.

En el caso de la concentración de oxígeno, ésta se encuentra regulada dentro de la nave para facilitar su disponibilidad para los pulmones; no obstante, el organismo sufre cambios en la adaptación de la respiración para ajustarse al entorno del espacio. Así, a un astronauta que tenía una capacidad atlética, al momento en que llega al espacio, se le dificulta realizar las mismas actividades que en la Tierra; además de que, para poder mantenerse en un buen estado físico –capacidad pulmonar y cardiovascular incluidas–, necesita ejercitarse diariamente.

Sistema musculoesquelético

Ya hablamos de que la gravedad es una fuerza que empuja nuestro cuerpo hacia el piso. Cuando esta fuerza deja de ser igual de fuerte en el espacio, los huesos no necesitan cargar todo el peso de nuestro cuerpo y se acostumbran muy rápido al peso ligero, haciendo que los huesos y músculos dejen de ser tan fuertes como antes. Los huesos comienzan a tener hoyos grandes –no perceptibles a simple vista–, a lo que le llamamos disminución de densidad ósea. La buena noticia es que una vez que los astronautas regresan de su misión, los huesos recuperan la mayor parte de lo que habían perdido y se hacen más pequeños los huecos hasta que logran “rellenarlos” otra vez.

Algo muy parecido pasa con los músculos esqueléticos, que son los que podemos mover de manera voluntaria; es decir, cuando nosotros queramos. Cuando dejan de recibir esta fuerza de gravedad, ya no soportan todo el peso del cuerpo como lo hacen estando en nuestro planeta, por eso las estructuras microscópicas que forman nuestros músculos se hacen más pequeñas y pierden fuerza. Para mantenerlos lo suficientemente fuertes para soportar la gravedad

de la Tierra al regreso, los astronautas tienen un gimnasio en la Estación Espacial Internacional, donde máquinas adaptadas les permiten hacer ejercicio. A pesar de eso, los músculos se hacen pequeños, pero pueden recuperar su tamaño después de algunos meses en el gimnasio en la Tierra.

Sistema nervioso y desafíos psicológicos

En este momento nuestra columna vertebral está cuidando a muchos nervios que vienen del cerebro para poder movernos, sentir cuando tocamos algo y hacer posibles muchas otras funciones. Al llegar al espacio, cada una de las vértebras que antes se mantenía una encima de otra debido al peso se separan y de cierta manera flotan individualmente, logrando que durante los primeros 10 días de misión los astronautas crezcan hasta 7 cm respecto a su estatura en la Tierra. Aunque esto suena increíble, también hace que los nervios se estiren más de lo normal, lo que afecta nuestra postura, movimiento y equilibrio. Este último también se ve afectado, pues el oído y una parte del sistema nervioso llamada cerebelo –que ayudan a que no nos caigamos– tienen cambios importantes en el espacio. Por ello es muy común que en los primeros días los astronautas se sientan mareados, no tengan ganas de comer y puedan llegar a vomitar. La buena noticia es que la mayoría suelen sentirse como nuevos dos días después de llegar al espacio.

Por otro lado, aunque ir al espacio puede causar mucha emoción, muchos de estos astronautas pasan meses en la Estación Espacial Internacional y se pueden llegar a sentir aislados y solos, a pesar de convivir con otros astronautas. Puede ser difícil estar lejos de casa, de la familia, los amigos y todos los demás humanos, animales y condiciones que hay en la Tierra, lo cual genera mucho estrés en el cuerpo. Cuando estamos estresados, nuestro cuerpo forma una sustancia llamada cortisol para ayudarnos a enfrentar el estrés, pero después de un tiempo puede llegar a afectar gravemente la salud y provocar enfermedades.

El futuro de los viajes espaciales

Probablemente hayas escuchado que uno de los grandes objetivos espaciales es la colonización de

Marte. Sin embargo, aquí surge la pregunta de cómo vamos a lograrlo. Lo primero que es necesario saber es que existen tres tipos de misiones definidas por la NASA para llegar a Marte.

El primer tipo son los viajes a sitios cercanos a nuestro planeta o “dependientes de la Tierra”. Éste es probablemente el tipo de misión del que más has escuchado. Se trata principalmente de expediciones en la Estación Espacial Internacional que se encuentra orbitando la atmósfera terrestre y tienen como objetivo conocer cómo se ve afectado el cuerpo humano en el espacio, tanto en lo referente al comportamiento como a la salud. También comprende el estudio de formas de comunicación, pruebas de materiales y la investigación sobre ambientes similares a los esperados en Marte.

El segundo tipo de misión implica probar el terreno. A diferencia de las primeras misiones realizadas en la cercanía de la atmósfera terrestre, éstas buscan adentrarse en el espacio profundo y tienen como meta verificar la posibilidad de regresar a la Tierra, o bien lograr una estación espacial a la que se pueda acceder con facilidad optimizando el procedimiento de envío de provisiones.

Por último, las misiones independientes de la Tierra con el propósito de vivir en Marte se inician en las proximidades del planeta rojo y sus lunas, para que una vez que todo esté listo se pueda llegar a la superficie de Marte. Citando a la NASA en su *Journey to Mars*, “No vamos para visitarla, vamos para quedarnos” (NASA, 2015), lo que implica vivir, trabajar y transitar en un hábitat que pueda mantener la vida humana por años y permitir la recolección de recursos.

Sin embargo, hasta el momento no ha sido posible realizar expediciones humanas a Marte debido a su duración. Al pasar meses en el espacio, el cuerpo humano recibe de manera constante radiación ionizante que daña el material genético de las células, provocando daños irreversibles a largo plazo.

Conclusión

Después de todo lo comentado, podemos darnos cuenta de que nuestro cuerpo, al no estar adaptado a las condiciones fuera de la Tierra, sufre muchos

cambios; pero esto no debe desanimarnos, pues el espacio es un lugar que no conocemos y que espera por nosotros. La NASA estableció un plan con el que ya está decidido que la humanidad llegará a Marte, lo único que falta son las herramientas para conseguirlo. Lo más interesante de todo esto no es sólo lo que se va a aprender una vez que lleguemos, sino que también en el camino surgirán infinitud de retos cuyo entendimiento y resolución nos harán capaces de mejorar la manera en la que vivimos.

Es verdad que queda un largo camino por recorrer, pero ya hemos salido y vuelto del espacio, hemos pisado la Luna y conseguido mantener estaciones en el espacio que podemos habitar. Finalmente, la intención de este artículo es lograr que te apasiones por la ciencia y, quién sabe, tal vez seas la primera persona en llegar a Marte, ¿empezamos el viaje?

Sara Nahián Martínez Mosso

Universidad Autónoma de Querétaro.
smartinez118@alumnos.uaq.mx

María Pía Mendoza Fonseca

Universidad Autónoma de Querétaro.
mmendoza122@alumnos.uaq.mx

Daniel García Martínez

Universidad Autónoma de Querétaro.
dgarcia148@alumnos.uaq.mx

Lecturas recomendadas

Jackson, A., M. Grocott y A. Cumpstey (2021), “Cuidados clínicos en entornos extremos: fisiología a gran altitud y en el espacio”, en M. A. Gropper (ed.), *Mi-ller. Anestesia*, 9.^a ed., Barcelona, Elsevier, pp. 2313-2336.

NASA (2015), *Journey to Mars*, Washington, National Aeronautics and Space Administration. Disponible en: https://www.nasa.gov/wp-content/uploads/2017/11/journey-to-mars-next-steps-20151008_508.pdf?emrc=e76990, consultado el 9 de febrero de 2026.

NASA (2022), “¿Qué le pasa al cuerpo humano en el espacio?”, Explora/NASA [en línea]. Disponible en: <https://ciencia.nasa.gov/sistema-solar/el-cuerpo-humano-en-el-espacio/>, consultado el 9 de febrero de 2026.

Rodrigo Marroquín Quintanilla, Diana Sofía Bernal Vega y Alberto Camacho Morales

¿Cómo influye tu microbiota en la ansiedad?

La ansiedad es una respuesta emocional que se caracteriza por sentimientos de preocupación, miedo, nerviosismo o inquietud. Puede deberse a una reacción normal al estrés o a situaciones que percibimos como amenazantes; nos ayuda a hacer frente a posibles peligros. Sin embargo, cuando la ansiedad se vuelve excesiva, persistente o interfiere con nuestra vida diaria, puede convertirse en un problema de salud.

Factores que contribuyen al desarrollo de la ansiedad

Los seres humanos experimentamos gran cantidad de emociones a lo largo de nuestra vida. La ansiedad representa un estado emocional complejo que se manifiesta como respuesta biológica adaptativa y que permite la supervivencia. Sin embargo, la ansiedad no controlada ante estímulos no amenazantes puede convertirse en una patología. Las causas del desarrollo de la ansiedad patológica son complejas, pero se sabe que hay factores genéticos, neurobiológicos, psicológicos y ambientales que pueden inducir su desarrollo (Garakani y cols., 2011; Gottschalk y Domschke, 2017). A continuación comentaremos algunos de los factores más importantes que contribuyen al desarrollo de ansiedad (**Figura 1**).

Investigaciones científicas han documentado que los trastornos de ansiedad suelen tener su origen en alteraciones de diversos sistemas de neurotransmisores, en particular los que afectan a la serotonina, la norepinefrina, la dopamina y el ácido gamma-aminobutírico. Se cree que los desequilibrios en estos neurotransmisores pueden provocar alteraciones significativas del estado de ánimo, niveles alterados de excitación y mayores respuestas a situaciones estresantes. En otras palabras, un individuo con ansiedad presenta cambios en el sistema de neurotransmisores que modifican la manera en que percibe el mundo que le rodea, alterando con ello su capacidad de responder positivamente a situaciones “comunes”, que se vuelven difíciles de enfrentar y resolver.

Un segundo factor involucrado en el desarrollo de la ansiedad tiene que ver con cambios en la activación de diversas estructuras cerebrales. La amígdala, por ejemplo, es una región del cerebro crucial para procesar las emociones y el mie-



Microglía

Células inmunitarias residentes del cerebro; representa aproximadamente el 10 % de las células cerebrales, con origen en la médula ósea. Actúan como “centinelas” dentro del sistema nervioso central, lo que las capacita para la respuesta, limpieza de desechos, reparación de daños y regulación del desarrollo neuronal.

Eje hipotalámico-hipofisario-suprarrenal

Sistema neuroendocrino que regula la respuesta al estrés y la homeostasis fisiológica a través de la liberación de cortisol. La actividad del eje se inicia en el hipotálamo, con la hormona liberadora de corticotropina (CRH), estimulando la hipófisis para secretar adrenocorticotropa (ACTH), lo que activa la corteza suprarrenal para producir cortisol.

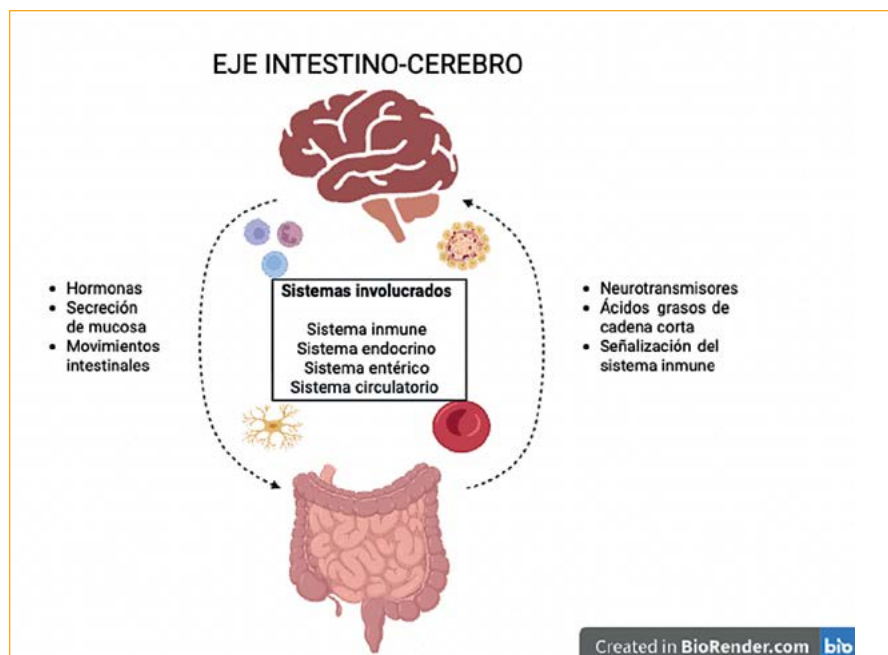


Figura 1. Factores biológicos asociados al desarrollo de trastornos de ansiedad. Creada con BioRender.com.

do, y cuando se vuelve hiperactiva, se altera su interacción con otras áreas cerebrales –como la corteza prefrontal y el hipocampo–, y las respuestas de miedo pueden intensificarse, dificultando que el individuo pueda procesar la emoción.

Un tercer factor que favorece el desarrollo de la ansiedad es el estrés. Fisiológicamente, el estrés se manifiesta por la liberación de corticoides de la corteza suprarrenal a través del **eje hipotalámico-hipofisario-suprarrenal**, y nos capacita para ser resilientes y enfrentar adversidades a lo largo de nuestra vida. En ese sentido, el estrés confiere una “ventaja” momentánea, ya que nos brinda la capacidad de estar preparados para afrontar un peligro. Sin embargo, cuando el estrés es excesivo, se presenta cotidianamente y por meses o años, se produce una sobreactivación del eje hipotalámico-hipofisario-suprarrenal, lo que conduce a niveles elevados de cortisol y otras hormonas del estrés, y puede incrementar los síntomas de ansiedad del individuo (Knezevic y cols., 2023).

La inflamación cerebral constituye el cuarto factor que contribuye al desarrollo de la ansiedad. Aunque se desconocen las causas precisas que favorecen la inflamación cerebral, se cree que se manifiesta principalmente por la producción de citocinas pro-

inflamatorias y por la activación de la **microglía** residente en el cerebro. La microglía es la célula inmune residente en el cerebro que se asemeja a los macrófagos del sistema inmune y que se encarga de procesos de “limpieza” cerebral y refinamiento de circuitos. Las investigaciones emergentes destacan que la inflamación de regiones cerebrales clave, tales como la amígdala, la corteza prefrontal y el hipocampo, pueden ser factores que contribuyen al desarrollo de la ansiedad.

De manera notable, uno de los factores más interesantes para el desarrollo de la ansiedad es la exposición temprana al estrés. Estudios epidemiológicos en diversas poblaciones han documentado que la exposición a condiciones adversas estresantes durante las primeras etapas de la vida pueden aumentar el riesgo de desarrollar trastornos de ansiedad en la etapa adulta. Existe evidencia de que experiencias traumáticas y adversas, los contaminantes, la exposición al ruido o una dieta con alto contenido energético durante las primeras etapas de la vida pueden propiciar ansiedad en la etapa adulta. Nuestro grupo de investigación es pionero en México en la identificación del efecto de la nutrición temprana en el desarrollo de ansiedad, un área de investigación que hemos denominado “neuronutrición”. En diversas

publicaciones hemos demostrado que la exposición a una dieta rica en grasa y azúcar –con alto contenido energético– durante las primeras etapas de vida promueve el desarrollo de ansiedad en la adultez.

La explicación de este evento fisiológico es que hay factores ambientales que interactúan y regulan la manera como se expresan o activan diversos genes, un proceso molecular conocido como **epigenética**. Se conoce que los cambios en la expresión de los genes pueden alterar la estructura y la función cerebral asociadas con la ansiedad. Finalmente, existe evidencia científica que propone que ciertas variaciones genéticas heredadas de nuestros abuelos o padres pueden afectar el funcionamiento de los neurotransmisores o la capacidad de respuesta de las áreas cerebrales implicadas en la regulación de la ansiedad, aumentando la susceptibilidad a los trastornos de ansiedad. Sin embargo, hacen falta más **estudios clínicos longitudinales** que confirmen dicha propuesta.

Así pues, la exposición en etapas tempranas de la vida a experiencias estresantes, a la contaminación, al ruido o a una dieta con alto contenido energético regula la expresión de genes que pueden predisponer al desarrollo de ansiedad en la etapa adulta.

Por otra parte, el desarrollo de la ansiedad puede estar también ligado a cambios en la microbiota in-

testinal y en la comunicación intestino-cerebro. La conexión entre el intestino y el cerebro representa un área de profundo interés en la investigación científica y de gran relevancia médica en la actualidad. En la siguiente sección abordaremos la contribución del eje intestino-cerebro y la microbiota intestinal en el desarrollo de la ansiedad.

■ Una conexión que no conocías entre tu intestino y tu cerebro

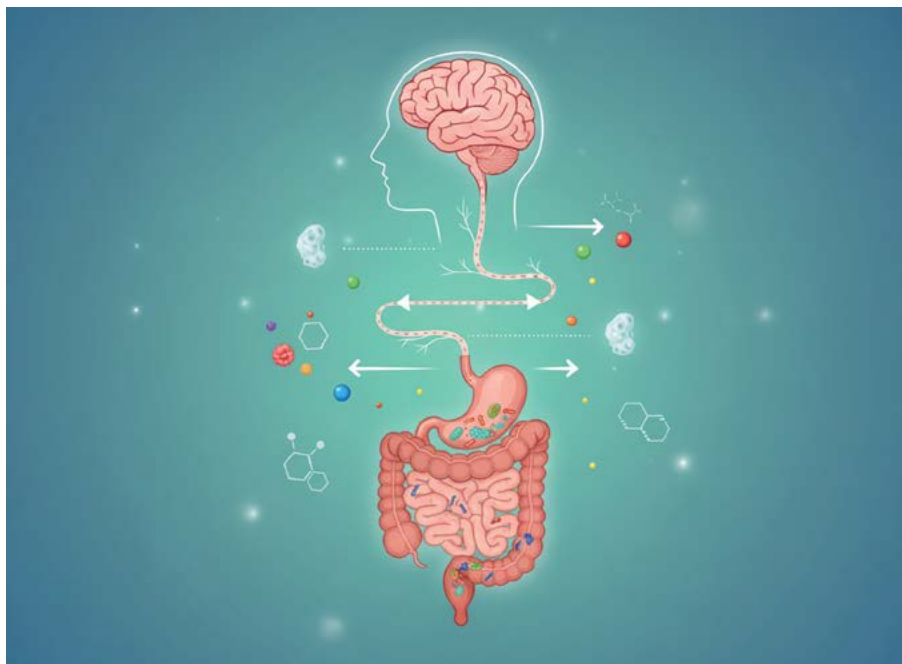
■ El concepto de eje intestino-cerebro es crucial para entender la intrincada comunicación bidireccional entre el microbioma intestinal y el cerebro. El eje intestino-cerebro es una red de comunicación bidireccional, lo cual significa que lo que ocurre en el intestino puede afectar al cerebro, y viceversa. El eje intestino-cerebro integra de manera bidireccional al sistema nervioso central, al sistema endocrino –que regula funciones corporales a través de hormonas– y al sistema inmune –encargado de defender al cuerpo contra infecciones y enfermedades–. Específicamente, en la conexión cerebro-intestino, el hipotálamo se conecta con la hipófisis y ésta con la glándula suprarrenal, localizada en la parte superior de cada riñón, regulando la sensibilidad al estrés por la liberación de cortisol. Además, se sabe que

◀ Epigenética

Mecanismos que actúan como interruptores que activan o reprimen la expresión de los genes sin alterar su secuencia original. Se originan en factores ambientales, dieta y estilo de vida, que son reversibles pero pueden heredarse.

◀ Estudios clínicos longitudinales

Se refiere a investigaciones observacionales o experimentales en donde se realizan mediciones repetidas y continuas de los mismos sujetos a lo largo de un esquema prolongado que puede durar semanas, años o décadas.





el cerebro puede regular la función del intestino a través del nervio vago e influir en la digestión de los alimentos y en cambios en la microbiota intestinal, como se verá más adelante.

La conexión intestino-cerebro también regula la función del cerebro a través de varios procesos; por ejemplo, mediante la liberación de hormonas y péptidos intestinales y con el cambio de la microbiota intestinal. La microbiota intestinal se define como la diversidad de microorganismos huéspedes del intestino, que incluyen bacterias, virus y hongos. La microbiota desempeña un papel crucial más allá de la digestión, pues influye en el sistema inmunológico, hormonal y el metabolismo.

Actualmente, es complicado determinar con exactitud la cantidad de géneros bacterianos que conforman el **microbioma** intestinal, ya que esta comunidad es altamente diversa y puede variar considerablemente entre una persona y otra, dependiendo de factores como la edad, la alimentación, el uso de antibióticos, el estado de salud y el entorno. Se estima que el microbioma intestinal humano está constituido por cientos o incluso miles de especies bac-

terianas diferentes, en donde los géneros bacterianos más comunes son *Firmicutes* (*Lactobacillus*, *Bacteroides*, *Actinobacteria* y *Proteobacteria*).

De manera específica, la microbiota intestinal desempeña un papel fascinante y significativo en nuestro bienestar emocional. Especialmente, los microbios del intestino envían señales al cerebro a través de varias vías, incluido el nervio vago, que es una autopista importante para esta comunicación intestinal. La microbiota intestinal interactúa con los nervios entéricos y el nervio vago, para transmitir rápidamente señales al cerebro y coordinar su función y las emociones. La microbiota también produce metabolitos, como los ácidos grasos de cadena corta y neurotransmisores como el glutamato, la acetilcolina, la dopamina, el ácido γ -aminobutírico (GABA), la glicina y la serotonina, que pueden ingresar al torrente sanguíneo e influir de manera indirecta en la función cerebral y en funciones del cuerpo que incluyen el movimiento, la emoción, el aprendizaje y la memoria. Se sabe que los neurotransmisores como el glutamato, el GABA, la dopamina y la serotonina producidos en la periferia no

Microbioma

Conjunto de microorganismos que incluyen bacterias, virus, hongos, arqueas y sus metabolitos que habitan dentro y fuera del cuerpo. Es esencial para la salud, pues regula funciones metabólicas e inmunitarias, digiriendo alimentos y protegiendo contra patógenos.

atravesar la barrera del cerebro. En su lugar, existe evidencia científica de que se sintetizan en el cerebro a partir de reservas locales de precursores. Investigaciones recientes revelan que las bacterias intestinales tienen genes que codifican para la síntesis de enzimas capaces de convertir sustratos en neurotransmisores o en sus precursores, que son capaces de ingresar al sistema nervioso central.

Por el contrario, la alteración del eje intestino-cerebro puede dar lugar a cambios en la conducta del individuo. Por ejemplo, en condiciones de inflamación —durante infecciones crónicas o respuestas autoinmunes—, estas señales inflamatorias pueden atravesar la barrera hematoencefálica y fomentar inflamación cerebral, lo que potencialmente lleva a trastornos del estado de ánimo. En particular, la inflamación crónica relacionada con un microbioma desequilibrado está asociada con trastornos como la depresión y la ansiedad. Además, la inflamación y el desequilibrio intestinal han sido cada vez más reconocidos como factores que contribuyen a enfermedades neurodegenerativas como el Alzheimer.

Esta conexión significa que los desequilibrios en el microbioma intestinal o en el sistema inmunológico pueden tener efectos significativos en la salud mental y cognitiva (Salvo-Romero y cols., 2020).

A continuación comentaremos la importancia y relación del eje intestino-cerebro en el desarrollo de la ansiedad.

■ ¿Cómo influye la microbiota en el desarrollo de la ansiedad?

■ Una microbiota sana y equilibrada garantiza la producción adecuada de neurotransmisores, lo que puede ayudar a mantener un estado de ánimo estable y una mejor salud emocional (Chen y cols., 2021). Por ejemplo, el intestino produce alrededor del 90 % de la serotonina del cuerpo, un neurotransmisor clave que preserva el buen estado de ánimo y una menor ansiedad (Figura 2).

Los microbios del intestino también influyen en la respuesta del organismo al estrés, regulando la producción de cortisol que, como comentamos, es

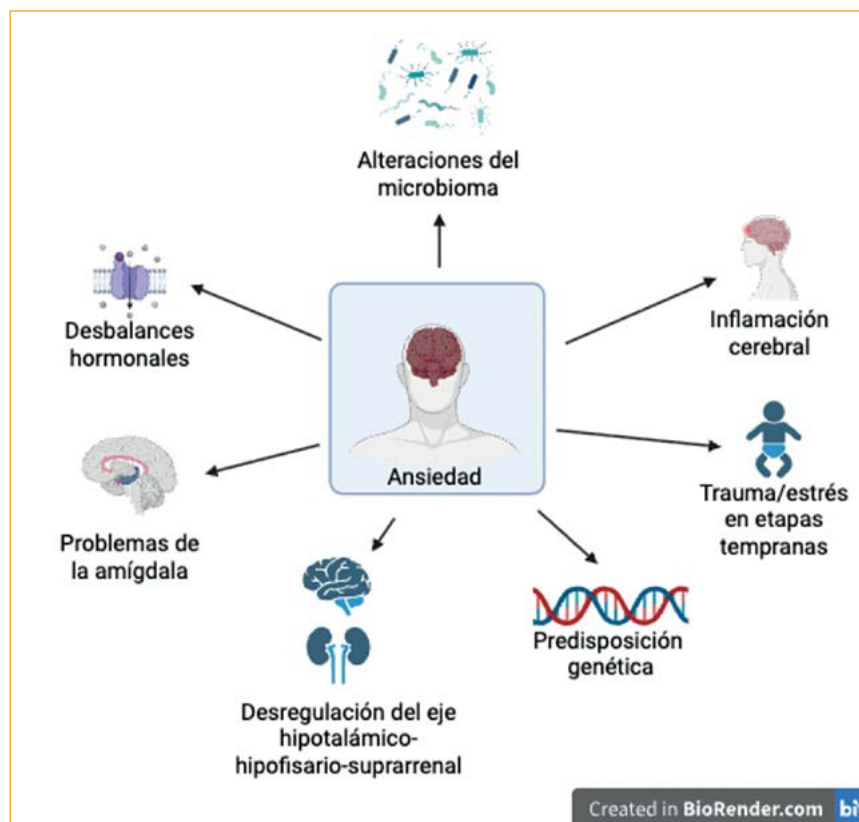


Figura 2. Representación gráfica del eje intestino-cerebro. Creada con BioRender.com.



la hormona que se libera en situaciones de estrés: a menor liberación de cortisol, menor ansiedad.

Desde el punto de vista fisiológico, la microbiota intestinal desempeña un papel crucial en preservar la función protectora de la barrera intestinal, la cual previene la entrada de sustancias dañinas al torrente sanguíneo. Cuando esta barrera se ve comprometida, existe el riesgo de que toxinas y moléculas inflamatorias alcancen la circulación sanguínea. De esta manera, se puede producir la activación de una inflamación sistémica que potencialmente invada el cerebro y contribuya al desarrollo de neuroinflamación. Esta información enfatiza que el desarrollo de inflamación cerebral es una de las causas del desarrollo de ansiedad.

Como comentamos, el sistema nervioso también puede regular la actividad del intestino y el tipo de microbiota. Investigaciones recientes han demostrado que personas que experimentan exclusión social tienen un equilibrio diferente de bacterias intestinales en comparación con las que se integran socialmente. En concreto, las personas aisladas tienden a tener niveles más altos de bacterias del género *Prevotella*, y más bajos del género *Faecalibacterium*; además, se han encontrado niveles más bajos de la relación entre *Firmicutes/Bacteroidetes*, dos grandes grupos de bacterias cuyo desbalance representa pro-

blemas que podrían influir en el incremento de los niveles de ansiedad (Xiong y cols., 2023). En otro estudio con 198 participantes, se observó que las personas con trastornos de ansiedad tenían una menor diversidad microbiana, y los individuos con trastorno de ansiedad generalizada mostraron no sólo una menor riqueza microbiana, sino también una disminución de bacterias que producen ácidos grasos de cadena corta y un incremento de *Fusobacteria* (Xiong y cols., 2023).

Estos estudios nos indican que la diversidad del microbioma intestinal suele estar relacionada con una mejor salud, por lo que una menor diversidad del microbioma podría estar asociada al desarrollo de la ansiedad.

Finalmente, ¿es posible prevenir o revertir la ansiedad mediante el cambio en la microbiota intestinal? El uso de trasplantes de microbiota fecal en el tratamiento de la ansiedad es un campo de investigación actual y emergente. En diversos reportes se ha manifestado que el trasplante de microbiota fecal decrece los niveles de *Escherichia-Shigella* en el intestino y revierte significativamente la ansiedad. Aunque estos avances prometen el uso potencial de trasplantes de microbiota fecal para favorecer la salud mental en trastornos neuropsiquiátricos, se requieren más investigaciones de largo alcance para

definir de manera precisa y selectiva protocolos de intervención que favorezcan la mejoría en la función cerebral.

■ Comentarios finales

■ El eje intestino-cerebro emerge como una pieza clave en la comprensión y manejo de la ansiedad. Sin embargo, es fundamental recordar que cada persona es única y las intervenciones deben adaptarse a las necesidades individuales. Consultar a profesionales de la salud para obtener orientación personalizada es un paso importante para abordar los trastornos de ansiedad de manera efectiva.

Rodrigo Marroquín Quintanilla

Departamento de Bioquímica y Medicina Molecular, Facultad de Medicina, Universidad Autónoma de Nuevo León.
rodrigo.marroquinqn@uanl.edu.mx

Diana Sofía Bernal Vega

Departamento de Bioquímica y Medicina Molecular, Facultad de Medicina, Universidad Autónoma de Nuevo León.
diana_sofia95@hotmail.com

Alberto Camacho Morales

Departamento de Bioquímica y Medicina Molecular, Facultad de Medicina, Universidad Autónoma de Nuevo León.
alberto.camachomr@uanl.edu.mx

Referencias específicas

- Bouras, N. N., N. R. Mack y W. J. Gao (2023), "Pre-frontal modulation of anxiety through a lens of noradrenergic signaling", *Frontiers in Systems Neuroscience*, 17:1173326. Disponible en: <https://doi.org/10.3389/fnsys.2023.1173326>.
- Chen, Y., J. Xu y Y. Chen (2021), "Regulation of neurotransmitters by the gut microbiota and effects on cognition in neurological disorders", *Nutrients*, 13(6):2099. Disponible en: <https://doi.org/10.3390/nu13062099>.
- Garakani, A., J. W. Murrough, D. S. Charney y J. D. Bremner (2009), "The Neurobiology of Anxiety Disorders", *Neurobiology of Mental Illness*, 655-690. Disponible en: https://www.researchgate.net/profile/James-Bremner/publication/313166562_Neurobiological_mechanisms_of_human_anxiety/links/6126ccf9035d5831d772549a/Neurobiological_mechanisms-of-human-anxiety.pdf, consultado el 13 de febrero de 2026.
- Gottschalk, M. G. y K. Domschke (2017), "Genetics of generalized anxiety disorder and related traits", *Dialogues in Clinical Neuroscience*, 19(2):159-168. Disponible en: <https://doi.org/10.31887/DCNS.2017.19.2/kdomschke>.
- Knezevic, E., K. Nenic, V. Milanovic y N. N. Knezevic (2023), "The role of cortisol in chronic stress, neurodegenerative diseases, and psychological disorders", *Cells*, 12(23):2726. Disponible en: <https://doi.org/10.3390/cells12232726>.
- Salvo-Romero, E., P. Stokes y M. G. Gareau (2020), "Microbiota-immune interactions: from gut to brain", *LymphoSign Journal*, 7(1):1-23. Disponible en: <https://doi.org/10.14785/lymphosign-2019-0018>.
- Xiong, R. G., J. Li, J. Cheng, D. D. Zhou, S. X. Wu y cols. (2023), "The role of gut microbiota in anxiety, depression, and other mental disorders as well as the protective effects of dietary components", *Nutrients*, 15(14):3258. Disponible en: <https://doi.org/10.3390/nu15143258>.

Víctor Humberto Bustamante Santillán y Víctor Manuel Chávez Jacobo

Acciones para el control de bacterias resistentes a los antibióticos

El gran beneficio que aportó a la medicina el descubrimiento de los antibióticos a principios del siglo pasado hoy en día está en riesgo de desaparecer debido a la generación de resistencia a estos fármacos. Enfrentamos un grave problema de salud a nivel mundial ocasionado por las bacterias resistentes a la mayoría de los antibióticos disponibles —o incluso a todos—, lo cual dificulta el tratamiento o prevención de las infecciones que producen. Son múltiples los factores que han generado esta problemática; entre ellos, el uso excesivo e inadecuado de los antibióticos y la falta de nuevos antibióticos. Por lo tanto, se requiere de la acción coordinada de diferentes sectores de la sociedad.

Las infecciones ocasionadas por bacterias resistentes a antibióticos representan una de las mayores amenazas para la salud que enfrenta la humanidad. Diferentes organizaciones, científicos y especialistas de la salud de todo el mundo han advertido sobre la gravedad que puede alcanzar esta problemática si no se atiende con prontitud. No sólo está en riesgo la posibilidad de curar las infecciones por bacterias resistentes a antibióticos, sino también la prevención de infecciones para el éxito de diferentes procedimientos médicos; por ejemplo, después de cirugías y durante el tratamiento de enfermedades progresivas como la diabetes y el cáncer. En 2019 se estimó que bacterias resistentes a antibióticos estuvieron involucradas en la muerte de hasta 4.95 millones de personas en el mundo (Antimicrobial Resistance Collaborators, 2022). Asimismo, se ha estimado que las infecciones por bacterias patógenas resistentes a antibióticos podrían causar anualmente la muerte de 10 millones de personas a nivel mundial a partir del 2050 (O'Neill, 2014). Además, se ha planteado que esta problemática podría afectar fuertemente a la economía mundial, debido a los recursos que se tendrían que invertir para el tratamiento y por la pérdida del tiempo laborable de las personas enfermas (O'Neill, 2014). Como ejemplo de la incidencia de bacterias patógenas resistentes a antibióticos en nuestro país, puede citarse un estudio reciente



que encontró que entre el 56 y el 92 % de las cepas de una bacteria llamada *Acinetobacter baumannii* –su nombre puede sonar complicado, pero es importante recordarlo, ya que es una de las principales bacterias que podemos adquirir en hospitales–, aisladas de pacientes de hospitales, presentan multirresistencia a antibióticos, lo cual significa que presentan resistencia a uno o más antibióticos de tres distintas familias (Ponce de León y cols., 2022).

En 2015, la Organización Mundial de la Salud (oms) aprobó un plan de acción mundial para el control de la problemática ocasionada por la resistencia a los antimicrobianos (oms, 2016). Además, la oms pidió a todos los países establecer un plan de acción nacional con esta misma finalidad. Para este propósito, el gobierno de México aprobó la Estrategia Nacional de Acción contra la Resistencia a los Antimicrobianos (Secretaría de Gobernación, 2018); asimismo, la Universidad Nacional Autónoma de México estableció el Plan Universitario de Control de la Resistencia Antimicrobiana (Ponce de León y cols., 2018). Tanto el plan de acción mundial de la oms como los planes nacionales de los países incluyen dos principales ejes: la reducción del uso de antibióticos a los casos estrictamente necesarios y el desarrollo de nuevos antibióticos.

La problemática por la resistencia a antibióticos ha sido ocasionada por múltiples factores, como su uso inadecuado –para tratar infecciones virales, como promotores de crecimiento de animales de granja, en

cultivos agrícolas, etc.–, las malas prácticas de higiene y la falta de desarrollo de nuevos antibióticos, entre otros (Ponce de León y cols., 2018; oms, 2018; O'Neill, 2016). Por lo tanto, para su control se requiere de la acción coordinada de diferentes sectores de la sociedad (Figura 1). A continuación se describen algunas acciones que deben seguir diferentes sectores de la sociedad para contribuir al control de la problemática de la resistencia a antibióticos.

La población general debe:

- Tomar antibióticos únicamente cuando lo indique o prescriba un médico, siguiendo estrictamente sus recomendaciones.
- Prevenir la transmisión y el contagio de enfermedades infecciosas de cualquier tipo; para lo cual es necesario cumplir con medidas sencillas, como: lavar con frecuencia las manos con agua y jabón; preparar los alimentos en condiciones higiénicas y con la suficiente cocción; evitar el contacto cercano con personas enfermas –los enfermos deben evitar contagiar a personas sanas–; usar cubrebocas –lo cual es útil únicamente para infecciones de vías respiratorias–; adoptar medidas de protección en las relaciones sexuales y mantener al día los esquemas de vacunación.

Es muy importante saber que los antibióticos únicamente curan infecciones bacterianas, no las ocasionadas por virus. Así, sólo el médico podrá decidir

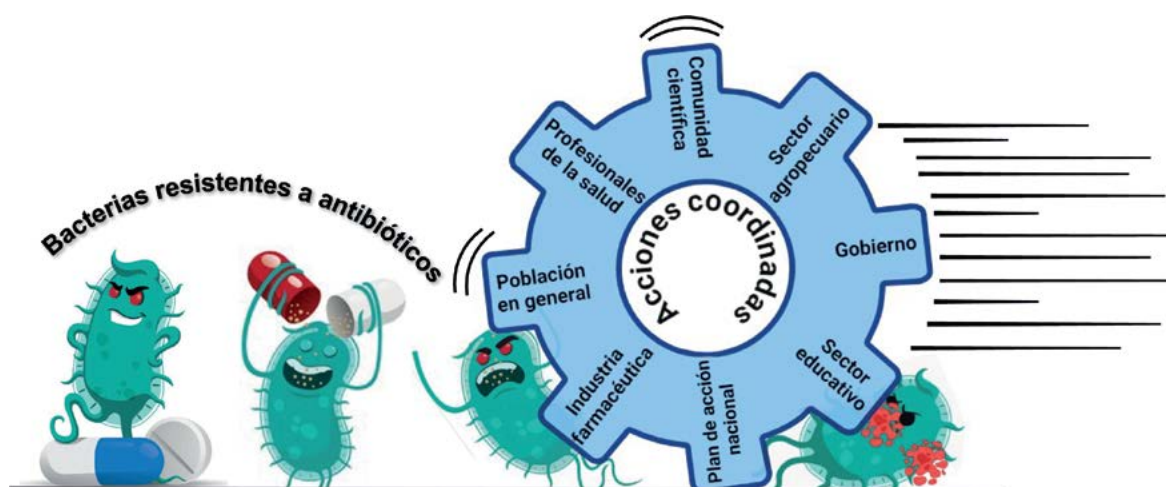


Figura 1. Acciones coordinadas de los diferentes sectores de la sociedad para el control de la problemática de salud ocasionada por bacterias resistentes a antibióticos.

si es conveniente o no tomar antibióticos, con base en el tipo de infección que se presenta, así como elegir el tipo de antibiótico más adecuado en función de los síntomas del paciente y la información que se tenga sobre la prevalencia de resistencia a antibióticos. Por otro lado, dos formas fundamentales de evitar las enfermedades son las medidas de higiene y la administración de vacunas; al igual que los antibióticos, las vacunas han salvado millones de vidas, por lo que es esencial seguir al pie de la letra los programas de vacunación.

Los profesionistas de la salud deben:

- Prescribir y dispensar antibióticos sólo cuando sean estrictamente necesarios.
- Notificar las infecciones por bacterias resistentes a antibióticos a los equipos de vigilancia.
- Informar a los pacientes sobre cómo tomar los antibióticos correctamente, sobre la resistencia a estos fármacos y el peligro de su uso indebido.
- Evitar las infecciones velando por la limpieza de manos, instrumental y del entorno.
- Informar a los pacientes sobre cómo pueden prevenirse las infecciones: vacunándose, lavándose las manos, comiendo alimentos preparados higiénicamente y bien cocidos, o cubriéndose la boca y la nariz al estornudar, usando cubrebocas y condones, etcétera.

Es necesario el desarrollo de sistemas de diagnóstico que permitan saber de manera sencilla, rápida y económica si una infección es causada por una bacteria o un virus, y en su caso determinar el tipo de bacteria patógena y los antibióticos que, de forma específica, pueden matarla. Esto permitirá que los médicos seleccionen el mejor tratamiento para curar las infecciones. En un estudio reciente se encontró que entre el 55 y el 85 % de los pacientes que ingresan a hospitales de México reciben antibióticos (Ponce de León y cols., 2022). Por otro lado, en otro estudio realizado en Estados Unidos de América, se encontró que de 40 millones de pacientes que recibieron antibióticos para el tratamiento de infecciones respiratorias, en 27 millones la prescripción de los antibióticos no era necesaria (O'Neill, 2016).

El sector agropecuario debe:

- Administrar antibióticos a los animales únicamente bajo supervisión veterinaria.
- Evitar el uso de antibióticos para estimular el crecimiento o para prevenir enfermedades en animales sanos.
- Evitar el uso de antibióticos que se prescriben a humanos en animales.
- Vacunar a los animales y utilizar alternativas a los antibióticos siempre que las haya.
- Prevenir las infecciones en las granjas mediante la mejora de la higiene y el bienestar de los animales.
- Fomentar y aplicar buenas prácticas en todos los eslabones de producción de alimentos de origen animal y vegetal.
- Evitar el uso de antibióticos en cultivos agrícolas.

De todos los antibióticos que se usan en el mundo, la mayor cantidad de ellos es administrada en animales de granja (en EUA es el 70 %), principalmente como promotores de crecimiento y para prevenir enfermedades; además, la mayoría de los antibióticos usados en animales son también usados en humanos (O'Neill, 2016). Se requiere de reglamentos y de programas de vigilancia por parte de los gobiernos para evitar o disminuir estos usos de los antibióticos. En países de Europa se ha prohibido ya el uso de los antibióticos como promotores de crecimiento y para prevenir enfermedades en animales, sin que esto haya afectado la producción de los alimentos derivados de animales (O'Neill, 2016; Pokharel y cols., 2020). Por otro lado, se ha demostrado que la reducción del uso de antibióticos en animales disminuye la presencia de bacterias resistentes a antibióticos en ellos (Pokharel y cols., 2020).

Un ejemplo que muestra la transmisión de la resistencia bacteriana a antibióticos de animales a humanos es el de la resistencia a colistina. Este antibiótico se usa en humanos como último recurso para el tratamiento de infecciones por bacterias resistentes a otros antibióticos, dado los efectos secundarios que produce; sin embargo, en un estudio reciente se demostró que el uso rutinario en China de colistina

en animales de granja ha favorecido la dispersión por el mundo de bacterias patógenas resistentes a este antibiótico (Wang y cols., 2020). Lo anterior también evidencia la necesidad de coordinación de todos los países para establecer las medidas necesarias para contrarrestar el problema de la resistencia a antibióticos.

El gobierno, el sector de la salud y la comunidad científica y académica deben:

- Informar sobre el impacto de la resistencia a antibióticos.
- Reforzar las políticas, los programas y la aplicación de las medidas de prevención y control de las infecciones, como la vacunación, el acceso a agua potable y a servicios de higiene.
- Reglamentar y vigilar el uso de antibióticos en humanos, animales y en la agricultura; así como reglamentar y vigilar el desecho adecuado de los antibióticos.
- Establecer una red de vigilancia de la incidencia de bacterias resistentes a antibióticos en humanos, animales y en el ambiente.
- Incentivar a la industria farmacéutica para que invierta en la investigación y desarrollo de nuevos antimicrobianos, vacunas, sistemas de diagnóstico, promotores de crecimiento de animales, etcétera.

- Generar redes de científicos que trabajen en proyectos de investigación y desarrollo de nuevos antimicrobianos, nuevas estrategias antimicrobianas, vacunas, sistemas de diagnóstico, promotores de crecimiento de animales, etc.; financiar estos proyectos de investigación y apoyar la vinculación de los científicos con la industria farmacéutica.
- Implementar materias sobre la resistencia a antibióticos en los planes de estudios profesionales relacionados, así como introducir este tema en los planes de estudio de educación básica.
- Poner en práctica un plan nacional para hacer frente a la problemática de la resistencia a los antibióticos.

Por su naturaleza, eventualmente las bacterias pueden adquirir resistencia a cualquier tipo de compuesto antimicrobiano, debido a que mutan y se transmiten genes de resistencia entre ellas. Así pues, se requiere de programas continuos de información y concientización sobre la resistencia a los antibióticos, así como una regulación estricta y vigilancia permanente en el uso y desecho adecuado de los antibióticos.

En definitiva, es necesario un cambio radical en la manera en que se han venido usando los antibióticos. En México, el Sistema Nacional de Gestión de Residuos de Envases y Medicamentos (SINGREM) se encarga de la recolección y eliminación adecuada



de medicamentos caducos o sobrantes, así como de los envases de éstos; existen contenedores SINGREM de recolección de antibióticos y sus envases en diferentes farmacias y centros comerciales del país (puede consultarse esta información en <http://www.singrem.org.mx>). Por otro lado, es fundamental el apoyo permanente del gobierno, del sector salud, de instancias financiadoras y de instituciones académicas a los proyectos de investigación enfocados en la vigilancia de la resistencia a los antibióticos, en el desarrollo de nuevos antibióticos y de nuevas estrategias antimicrobianas, de vacunas, de sistemas de diagnóstico, de promotores de crecimiento de animales, etc. La inversión en esta área debe estar específicamente contemplada en los presupuestos del gobierno como parte del plan de acción nacional para el caso.

Todos podemos contribuir para frenar la grave problemática de salud ocasionada por la resistencia a los

antibióticos siguiendo las recomendaciones descritas en este artículo. Debemos considerar a los antibióticos como recursos no renovables, si no los usamos adecuadamente dejan de funcionar en un tiempo corto. Está en nosotros el prolongar la vida útil de los antibióticos existentes y de los que se desarrollen en el futuro.

Víctor Humberto Bustamante Santillán

Departamento de Microbiología Molecular del Instituto de Biotecnología de la UNAM.
victor.bustamante@ibt.unam.mx

Víctor Manuel Chávez Jacobo

Departamento de Microbiología Molecular del Instituto de Biotecnología de la UNAM.
victor_mch@hotmail.com

Referencias

- Antimicrobial Resistance Collaborators (2022), "Global burden of bacterial antimicrobial resistance in 2019: a systematic analysis", *The Lancet*, 399(10325):629-655. Disponible en: <[https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(21\)02724-0](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(21)02724-0)>.
- OMS (2016), *Plan de acción mundial sobre la resistencia a los antimicrobianos*, Organización Mundial de la Salud [en línea]. Disponible en: <<https://www.who.int/es/publications/i/item/9789241509763>>, consultado el 12 de febrero de 2026.
- OMS (2018), *Resistencia a los antibióticos*, Organización Mundial de la Salud [en línea]. Disponible en: <<https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/resistencia-a-los-antibioticos>>, consultado el 12 de febrero de 2026.
- O'Neill, J. (2014), "Antimicrobial resistance: tackling a crisis for the health and wealth of nations", *Review on Antimicrobial Resistance*. Disponible en: <<https://amr-review.org/Publications.html>>, consultado el 12 de febrero de 2026.
- O'Neill, J. (2016), "Tackling drug-resistant infections globally: final report and recommendations", *The Review on Antimicrobial Resistance*. Disponible en: <<https://amr-review.org/Publications.html>>, consultado el 12 de febrero de 2026.
- Pokharel, S., P. Shrestha y B. Adhikari (2020), "Antimicrobial use in food animals and human health: time to implement 'One Health' approach", *Antimicrobial Resistance and Infection Control*, 9(1):1-5. Disponible en: <<https://doi.org/10.1186/s13756-020-00847-x>>.
- Ponce de León, S. et al. (2018), *Plan universitario de control de la resistencia antimicrobiana*, Programa Universitario de Investigación en Salud, Universidad Nacional Autónoma de México. Disponible en: <http://www.puis.unam.mx/slider_docs/plan-ucradigital.pdf>, consultado el 12 de febrero de 2026.
- Ponce de León, S. et al. (2022), *Resistencia antimicrobiana, 2017 a 2020. Reporte de los hospitales de la Red PUCRA: Resistencia antimicrobiana y consumo de antibióticos*. México, Universidad Nacional Autónoma de México, Plan Universitario de Control de la Resistencia Antimicrobiana (PUCRA). Disponible en: <<http://www.puis.unam.mx/divulgacion/docs/reportePUCRA17a20.pdf>>, consultado el 12 de febrero de 2026.
- Secretaría de Gobernación (2018), "Acuerdo por el que se declara la obligatoriedad de la estrategia nacional de acción contra la resistencia a los antimicrobianos, *Diario Oficial de la Federación*. Disponible en: <http://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5525043&fecha=05/06/2018>, consultado el 12 de febrero de 2026.
- Wang, Y. et al. (2020), "Changes in colistin resistance and mcr-1 abundance in *Escherichia coli* of animal and human origins following the ban of colistin-positive additives in China: an epidemiological comparative study", *The Lancet. Infectious Disease*, 20(10):1161-1171. Disponible en: <[https://doi.org/10.1016/S1473-3099\(20\)30149-3](https://doi.org/10.1016/S1473-3099(20)30149-3)>.

Miguel Ángel Sarabia Sánchez, Eduardo Alvarado Ortiz y Martha Robles Flores

Metástasis: células cancerosas que no respetan fronteras

La metástasis es la principal causa de muerte por cáncer e implica la salida de las células cancerosas del lugar de origen para colonizar otros sitios del cuerpo. Los investigadores buscamos entender cómo sucede esto, para así afrontar este reto. Conozcamos algunos de los hallazgos científicos que pueden ayudar a descifrar este fenómeno.

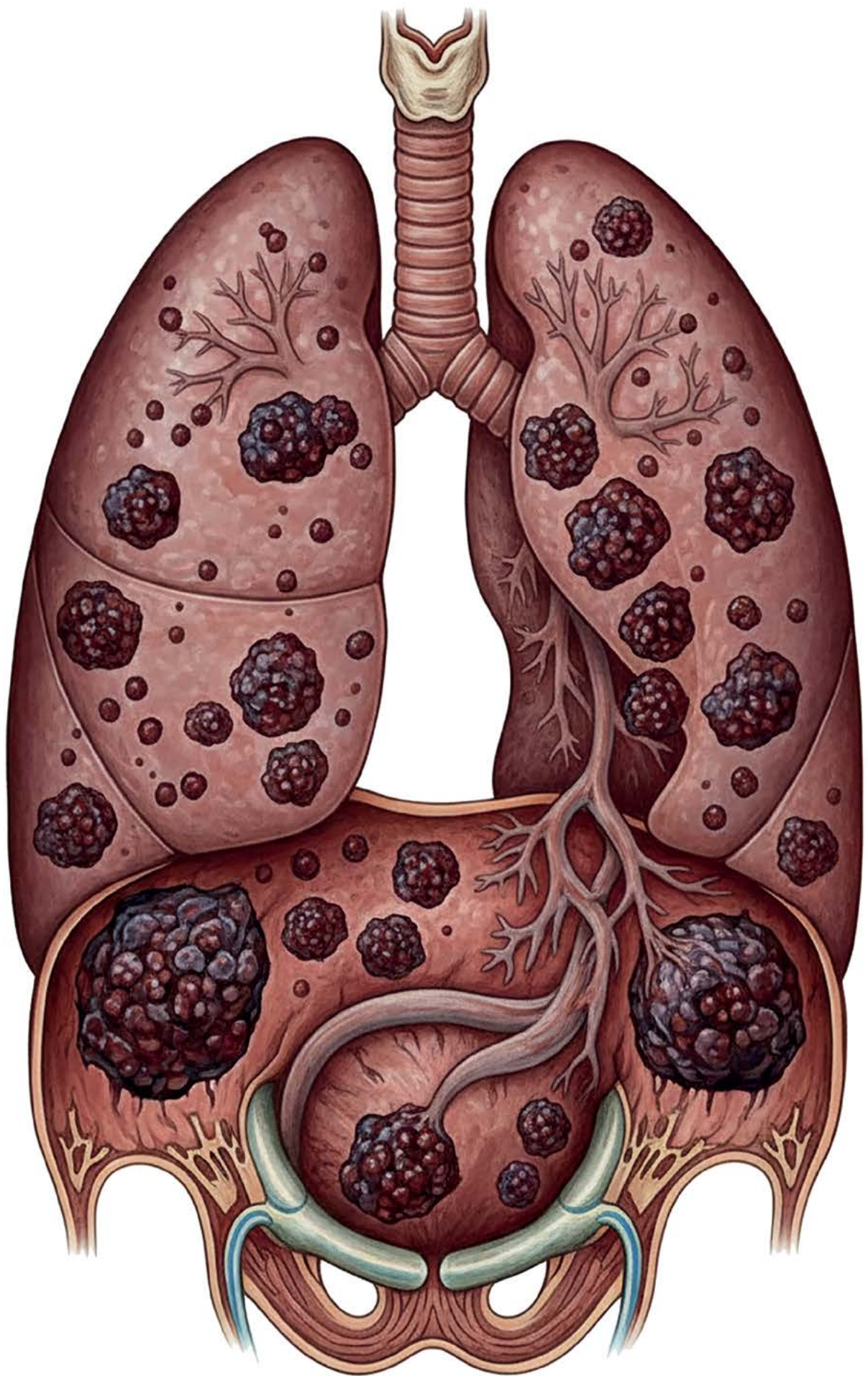
Introducción

Nuestro cuerpo es un terreno fértil en el que células cancerosas pueden potencialmente surgir y crecer. Al progresar la enfermedad, algunas células cancerosas logran alejarse del tejido inicial en que surgieron (tumor primario) y comienzan a invadir zonas cercanas al tumor. Incluso algunas células cancerosas pueden llegar a viajar más lejos, a través de los nódulos linfáticos o la sangre. A este viaje de las células cancerosas a lo largo del cuerpo para formar tumores en otros sitios se le da el nombre de *metástasis*.

Charles Darwin estableció que los organismos más aptos se adaptan al ambiente y así logran sobrevivir y reproducirse, un postulado que desafortunadamente también se aplica en el caso de una enfermedad como el cáncer. La progresión del cáncer —que en ocasiones incluye el viaje de las células cancerosas con la metástasis— dependerá del lugar en el que se localiza, al cual se le denomina **microambiente**. En este sentido, las células cancerosas deben enfrentar desafíos a los que algunas logran adaptarse y los superan, pero otras no. Esta selección toma tiempo y explica la asociación que existe entre la metástasis y un cáncer avanzado. De hecho, desde el enfoque terapéutico, es mayor el desafío en pacientes durante etapas tardías debido principalmente a la metástasis; pero, ¿por qué? Esta dispersión de las células cancerosas en el cuerpo es como un costal de semillas que se rompe en el campo. Se pueden recoger las semillas visibles a los ojos, pero, ¿qué ocurre con aquellas que pasan desapercibidas? Si la semilla que permanece cayó en tierra fértil, germinará y crecerá. De manera similar, las terapias convencionales buscan eliminar todas las células cancerosas, pero al dispersarse por el cuerpo, resulta difícil asegurar que no quedará ninguna semilla. Si las células cancerosas encuentran

Microambiente

Conjunto de células, moléculas y estructuras tridimensionales que forman un espacio dinámico de interacción.



Dormancia o quiescencia
Estado de inactividad prolongada y reversible en el ciclo de vida de la célula cancerosa, donde permanecen vivas, no senescentes, pero dejan de dividirse.

“tierra fértil”, permanecerán en **dormancia o quiescencia**, un proceso en el que las células permanecen vivas, inactivas y no se multiplican, hasta que, en un momento dado, reanudan nuevamente el crecimiento de un tumor. Este fenómeno explica la recaída de pacientes con cáncer en sitios anatómicos distintos adonde se originó, incluso varios años después.

■ **Un largo camino por recorrer**

■ La progresión de un tumor primario a metástasis no es espontánea. Las células cancerosas deben luchar contra las barreras que intentan eliminarlas o frenarlas, lo que las convierte en guerreras. Actualmente se reconoce que sólo una muy pequeña fracción de células cancerosas puede invadir sitios distantes. Desde la década de 1970, gracias al doctor Isaiah Fidler, sabemos que menos del 0.1 % de las células cancerosas que entran a la circulación están vivas, y aún menos de 0.01 % pueden sobrevivir y

hacer metástasis. Hablar de 0.01 % parece poco, casi insignificante; sin embargo, para un tumor formado por millones de células, representa miles y miles de células, que sí son muchas. Estas células cancerosas superan las constantes barreras físicas, nutricionales e inmunológicas que comúnmente actúan para evitar la progresión maligna. En la oncología actual esto parece obvio, pero tomó décadas comprobarlo.

Los científicos dividen esta larga travesía de la metástasis en distintas etapas, esquematizadas en la **Figura 1** y descritas en la **Tabla 1**.

Hay que tomar en cuenta que el sistema circulatorio es el principal camino por el cual una célula cancerosa viaja para llegar a sitios distantes. Actualmente se sabe que las células cancerosas liberan sustancias químicas que conducen a la formación de nuevos vasos sanguíneos a partir de los ya existentes. A este fenómeno se le conoce como *angiogénesis* y, con esto, las células cancerosas aseguran dos procesos: la construcción de un camino por donde viajar

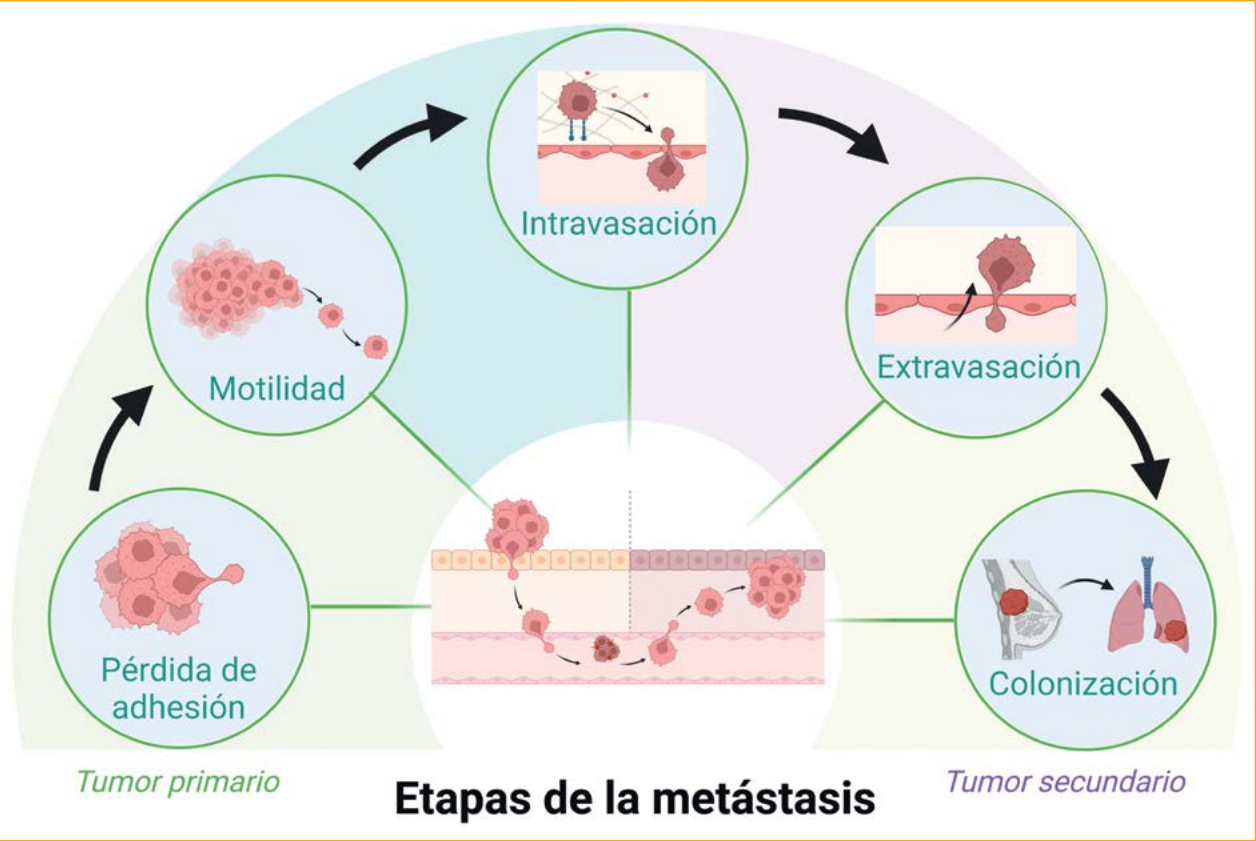


Figura 1. Etapas de la metástasis. Los pasos actualmente definidos para el desarrollo de metástasis incluyen la pérdida de adhesión celular, la adquisición de propiedades migratorias, el tránsito a los vasos sanguíneos (intravasación), la salida de los vasos sanguíneos (extravasación) y la colonización de sitios distantes.

Tabla 1. Metástasis, su travesía paso a paso.

Etapa	Características
Pérdida de adhesión	Cambios en el ADN afectan la adhesión entre las células que, al sumarse a la liberación de factores del microambiente, comprometen la interacción <i>célula-célula</i> .
Motilidad	Las células cancerosas incrementan su capacidad para desplazarse y, por tanto, de moverse a nuevos sitios anatómicos.
Intravasación	Las células cancerosas entran a la circulación. Una vez en circulación, deben sobrevivir a las condiciones adversas.
Extravasación	Las células cancerosas salen de la circulación porque logran unirse a los capilares sanguíneos y atraviesan gracias a la alta permeabilidad de estos capilares. Este proceso toma de 1-3 días.
Colonización	Una gran proporción de células cancerosas llega a nuevos sitios anatómicos, pero muy pocas conducen a la generación de un nuevo tumor. Sin embargo, aunque son escasas, permanecen y pueden estar inactivas por largos periodos de tiempo, en estado de quiescencia/dormancia, antes de formar un tumor nuevo, llamado tumor secundario.

a otros sitios y la disponibilidad de nutrientes y oxígeno para favorecer su supervivencia en los tejidos.

La mayoría de los estudios del cáncer se ha centrado en entender lo que sucede durante la generación de un tumor primario, pero sólo hasta años recientes se ha buscado comprender lo que sucede en la metástasis, y es aquí donde la investigación se ha vuelto fascinante y desafiante.

■ La unión hace la fuerza

■ Inicialmente, al conocer la metástasis, solía pensarse en una célula cancerosa única con capacidad de superar todas las adversidades; hoy se sabe, sin embargo, que no es así. Al considerar las barreras físicas, nutricionales e inmunológicas a las que las células cancerosas se enfrentan, ahora se reconoce que la unión hace la fuerza; en otras palabras, la metástasis resulta, en gran medida, gracias a la colaboración de diferentes tipos de células.

La migración colectiva permite que las funciones necesarias para lograr la metástasis sean distribuidas. Este proceso se facilita cuando un conjunto de células permanecen juntas mientras atraviesan un tejido o un órgano, donde delegan funciones específicas. Por lo tanto, nos damos cuenta de que el avance de las células cancerosas se da tanto de manera individual como grupal (**Figura 2**).

Sorprendentemente, las células cancerosas corrompen el microambiente, por lo que también viajan acompañadas de células no cancerosas que forman

parte de su tripulación, lo que les permite esconderse, beneficiarse y adaptarse. Para su llegada a un nuevo tejido, les permite incluso ser más eficientes en comparación con la llegada de una célula cancerosa metastásica única.

■ Dormancia: el caballo de Troya

■ En la mitología griega, la caída de la ciudad de Troya fue posible por un caballo gigante de madera ofrecido como aparente ofrenda a la diosa Atenea para bendecir su viaje. Dentro del caballo, sin embargo, se escondían los guerreros griegos con la intención de, una vez llegada la noche, infiltrarse. Así fue, salieron, derrotaron a los troyanos e invadieron la ciudad. Al igual que una guerra, una invasión satisfactoria de células cancerosas a sitios distantes requiere de las mejores células cancerosas guerreras. Una vez llegadas al sitio potencial de metástasis, su victoria dependerá de su capacidad de esperar, en una condición similar a un letargo o hibernación, a la que anteriormente hemos llamado dormancia/quiescencia.

Una vez invadido un tejido secundario, un riesgo para las células cancerosas es su potencial eliminación por el sistema inmune. Por ejemplo, aquellas células cancerosas que migran a lugares como el sistema nervioso o el pulmón –ambos sitios frecuentes de tumores secundarios– son eliminadas por diferentes formas de presión inmunológica. Esto porque existen “policías” celulares encargados de la protección

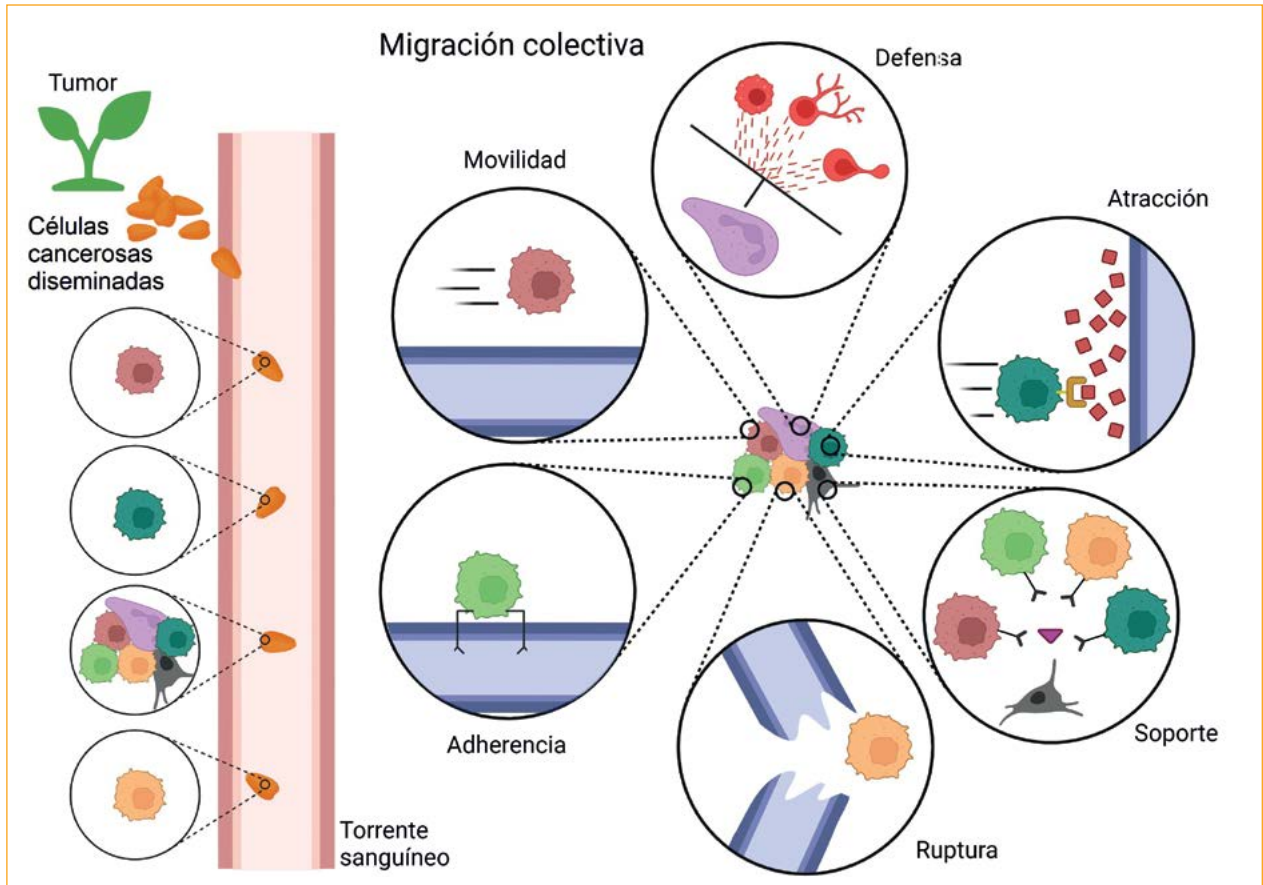


Figura 2. Migración colectiva. Las células cancerosas viajan individualmente o en conjunto. La formación de colectivos celulares muestra ser más eficiente, debido a la diversidad funcional que representan las células que los componen.

contra células cancerosas; de modo que las células inmunitarias reconocen y eliminan a estas células “dañadas”, semillas potenciales de la metástasis. Entre ellas se encuentran las células NK (*natural killers*, por sus siglas en inglés), los linfocitos T citotóxicos y los macrófagos. Gracias al uso de modelos animales, se ha podido comprobar que la eliminación de las células NK propicia el desarrollo de metástasis.

Por tal motivo, las células cancerosas se mantienen escondidas al detener su división celular mediante el proceso de quiescencia o dormancia, con el objetivo de evitar al sistema inmune. Esto, sumado a la falta de nutrientes requeridos por las células cancerosas, resultaría en una limitación importante para su desarrollo en el nuevo sitio. Un ejemplo ilustrativo lo tenemos en los osos pardos que hibernan en respuesta a condiciones ambientales hostiles. ¿Qué los hace despertar? Para los osos pardos la respuesta parece intuitiva: el ambiente y la disponibilidad de

alimentos permiten la salida de este estado de letargo. Tomando en cuenta que el sistema inmune es la principal barrera que evita el despertar de las células cancerosas “dormidas”, su despertar implica que las células inmunitarias se vean corrompidas, así como la presencia de factores que favorecen la reanudación de su crecimiento. Por ello, la entrada en dormancia/quiescencia no es un evento meramente pasivo una vez llegadas al nuevo sitio a colonizar, sino un estado obligado para un adecuado crecimiento de tumores en sitios distantes en el momento propicio (**Figura 3**).

■ **Organotropismo: buscando tierra fértil**

■ Durante la metástasis, una vez que las células cancerosas dejan atrás su tejido natal, el mundo del cuerpo humano se abre a las posibilidades de invasión. No obstante, sabemos que el destino no su-

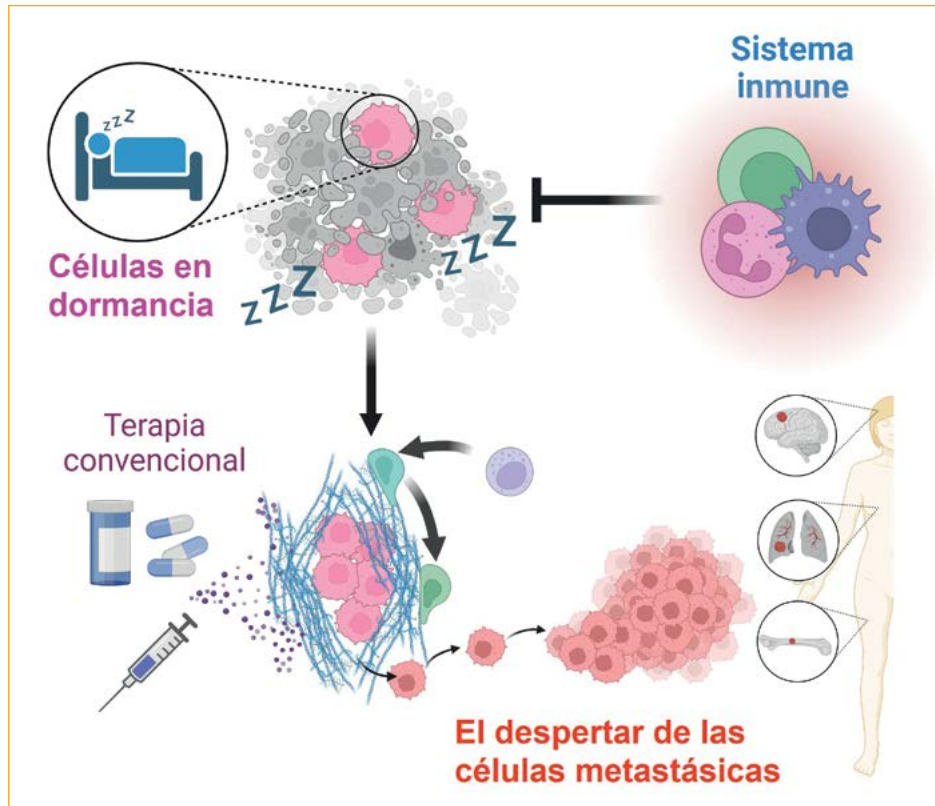


Figura 3. Mantenimiento de células dormantes. La llegada de células cancerosas a sitios distantes frecuentemente las hace blanco del sistema inmune; pero aquellas células que se mantienen “dormidas” evitan su erradicación y resultan, además, resistentes a la terapia convencional que generalmente va dirigida a eliminar a células en proliferación activa.

cede aleatoriamente, sino que existen componentes que darán una dirección al viaje que ahora emprenden las células cancerosas. A esto se le llama **organotropismo**, que puede entenderse como la atracción hacia un órgano específico, el cual requiere dos eventos. El primero es la llegada de las células cancerosas al nuevo órgano y el segundo es el microambiente del órgano que, en respuesta a esta llegada, favorece que las células cancerosas se mantengan, sobrevivan y proliferen o se multipliquen. La evidencia sugiere que incluso antes de la llegada de las células cancerosas al nuevo órgano, las células cancerosas liberan factores que pueden predisponer a un órgano para recibir células cancerosas metastásicas.

Las funciones de las células cancerosas dependen de la interacción con su entorno, y en su camino encontrarán órganos adecuados para quedarse, o inadecuados que las lleven a seguir su viaje. Si bien cada órgano ofrece un microambiente distinto, entre las mismas células cancerosas metastásicas hay carac-

terísticas diferentes que influyen en la elección del órgano. Por ejemplo, el pulmón es un sitio común de llegada, debido principalmente al ambiente rico en oxígeno y a una alta circulación sanguínea que existe en torno a él. Por lo tanto, el organotropismo consiste en una combinación casi única entre un órgano y las células cancerosas. Esto puede compararse con la siembra en el campo, donde el agricultor escoge una semilla adecuada y una tierra fértil para sembrar. Asimismo, las células cancerosas metastásicas representan diferentes semillas y los órganos sanos diferentes tierras fértiles que, en combinación, darán lugar a la formación de un nuevo tumor, fruto de la malignidad del cáncer (**Figura 4**).

Finalmente, hasta aquí se ha considerado el caso de la metástasis que ocurre en el paciente por primera vez —denominada metástasis primaria—, pero, ¿qué sucede si las células que llegan a un órgano distinto para formar un nuevo tumor abandonan ese sitio y viajan nuevamente? Lamentablemente esto también

Organotropismo
Capacidad de las células cancerosas de invadir sitios u órganos específicos.

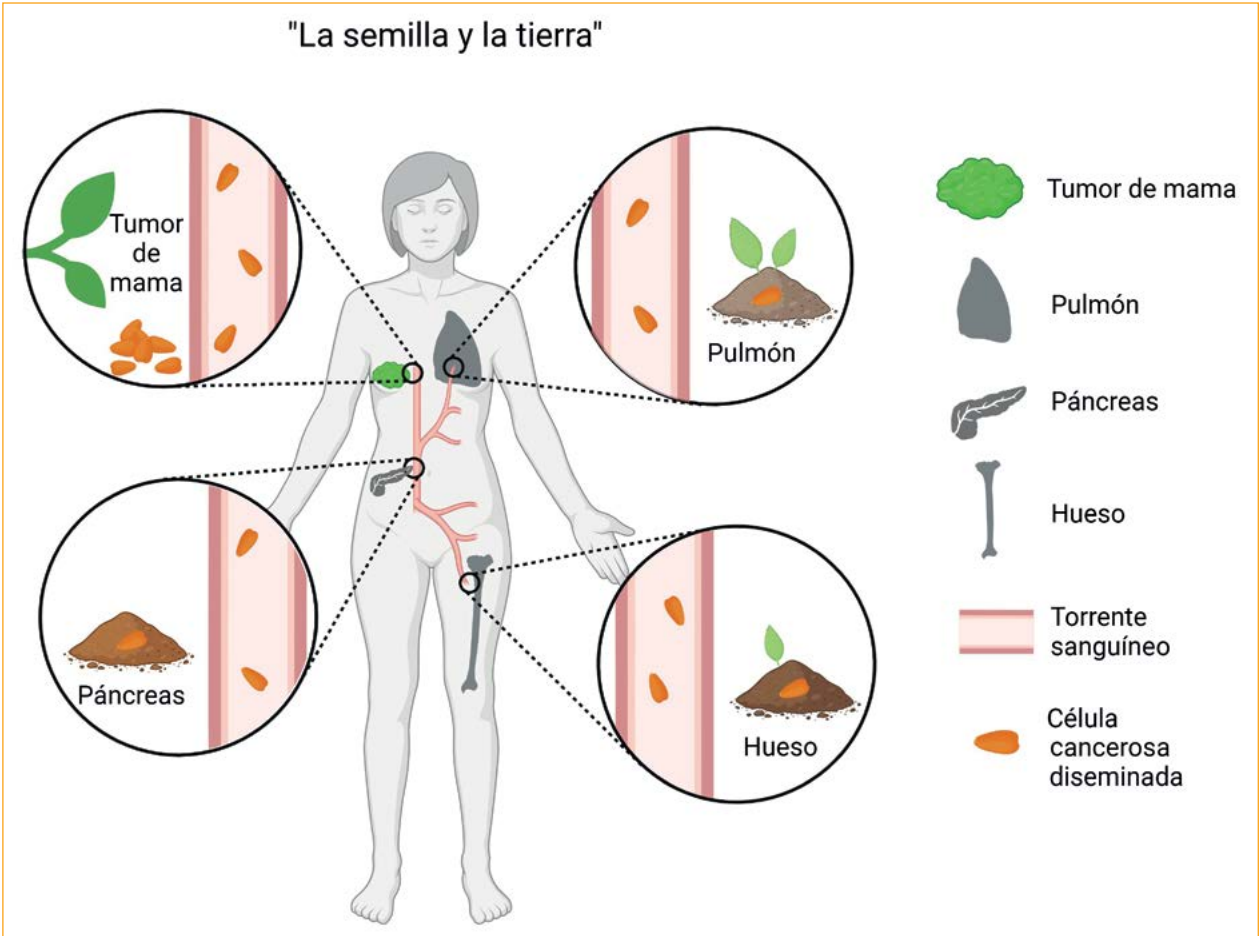


Figura 4. Organotropismo. La teoría de “la semilla y la tierra” es un modelo que explica cómo las células cancerosas metastásicas colonizan órganos específicos.

sucede, se le llama metástasis secundaria y tiene consecuencias peores, ya que, si en la metástasis primaria se necesitó de una combinación casi única entre la semilla y la tierra fértil, en la metástasis secundaria las células cancerosas ahora pueden crecer en tierras donde antes no podían.

Conclusión

Desde hace más de un siglo, la teoría de “la semilla y la tierra” ha sido el modelo que explica la metástasis, modelo en el que la semilla es la célula cancerosa que viaja y coloniza, mientras que la tierra es el órgano nuevo adonde llega. Bajo esta premisa,

Ciclo celular
Etapas por las que transita una célula para dividirse, base de la proliferación celular.

Recuadro 1.

En la homeostasis celular existe un control preciso de la proliferación (división celular), el **ciclo celular** y la muerte celular. El cáncer es generado por un conjunto de alteraciones genéticas en las células, producto de la exposición a agentes mutagénicos; es decir, aquello que ocasiona cambios en el ADN. Un conjunto de alteraciones en las células ocasiona que esta homeostasis se corrompa y dé lugar a la transformación celular y, eventualmente, al cáncer.

¿debemos buscar eliminar las semillas? Si tomamos en consideración que el cuerpo humano adulto se conforma de hasta 100 billones de células no cancerosas, la búsqueda de las células cancerosas metastásicas representaría encontrar una aguja en un pajar. Lo ideal sería encontrar la manera de poder detectar las células malignas en estado de dormancia/quiescencia y poder eliminarlas selectivamente para evitar la recurrencia del cáncer y, por tanto, también la metástasis.

La ciencia pone las cartas sobre la mesa, pero la metástasis insiste en mostrar un as bajo la manga. Actualmente, se reconoce que los descubrimientos en el área no acaban, que aún queda mucho por conocer, pero la investigación persiste en la búsqueda de aquel talón de Aquiles que permita eliminar la metástasis y mejorar la calidad de vida de los pacientes con cáncer.

Miguel Ángel Sarabia Sánchez

Instituto Nacional de Cancerología.
mike_sarabia@hotmail.com

Eduardo Alvarado Ortiz

Facultad de Medicina, UNAM.
eduralv.o@gmail.com

Martha Robles Flores

Facultad de Medicina, UNAM.
rmartha@unam.mx

Lecturas recomendadas

- Aguirre-Alvarado, C. y M. A. Velasco-Velázquez (2017), "Células troncales en tumores sólidos", en M. A. Chávez-González, E. Flores-Figueroa, M. Lamas y J. Chimal-Monroy (eds.), *Células troncales. Biología y aplicaciones en biomedicina*, México, Porrúa-UNAM, pp. 15-38.
- Arvelo, F., F. Sojo y C. Cotte (2016), "Progresión tumoral y metástasis", *Ecancermedicalscience* [en línea], 10:617.
- Guerra-González, A., E. Silva, S. Montero, D. J. Rodríguez, R. Mansilla y J. M. Nieto (2020), "Metástasis: un hito para el conocimiento, un reto para la ciencia", *Revista Cubana de Medicina*, 59(1):1167. Disponible en: http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_abstract&pid=S0034-75232020000100006, consultado el 9 de febrero de 2026.

Brandon Bautista-Becerril, Ruth Kenia Marcial Valdez y Ramcés Falfán-Valencia

Los microARN, reguladores y controladores de funciones biológicas

Durante mucho tiempo, gran parte de nuestro material genético fue considerado “basura evolutiva”, sin una función clara. Hoy sabemos que entre esos fragmentos se encuentran los microARN (miARN), pequeñas moléculas de ARN que constituyen uno de los sistemas de regulación más importantes del cuerpo humano. Su descubrimiento transformó la biología moderna y fue reconocido con el Premio Nobel de Medicina.

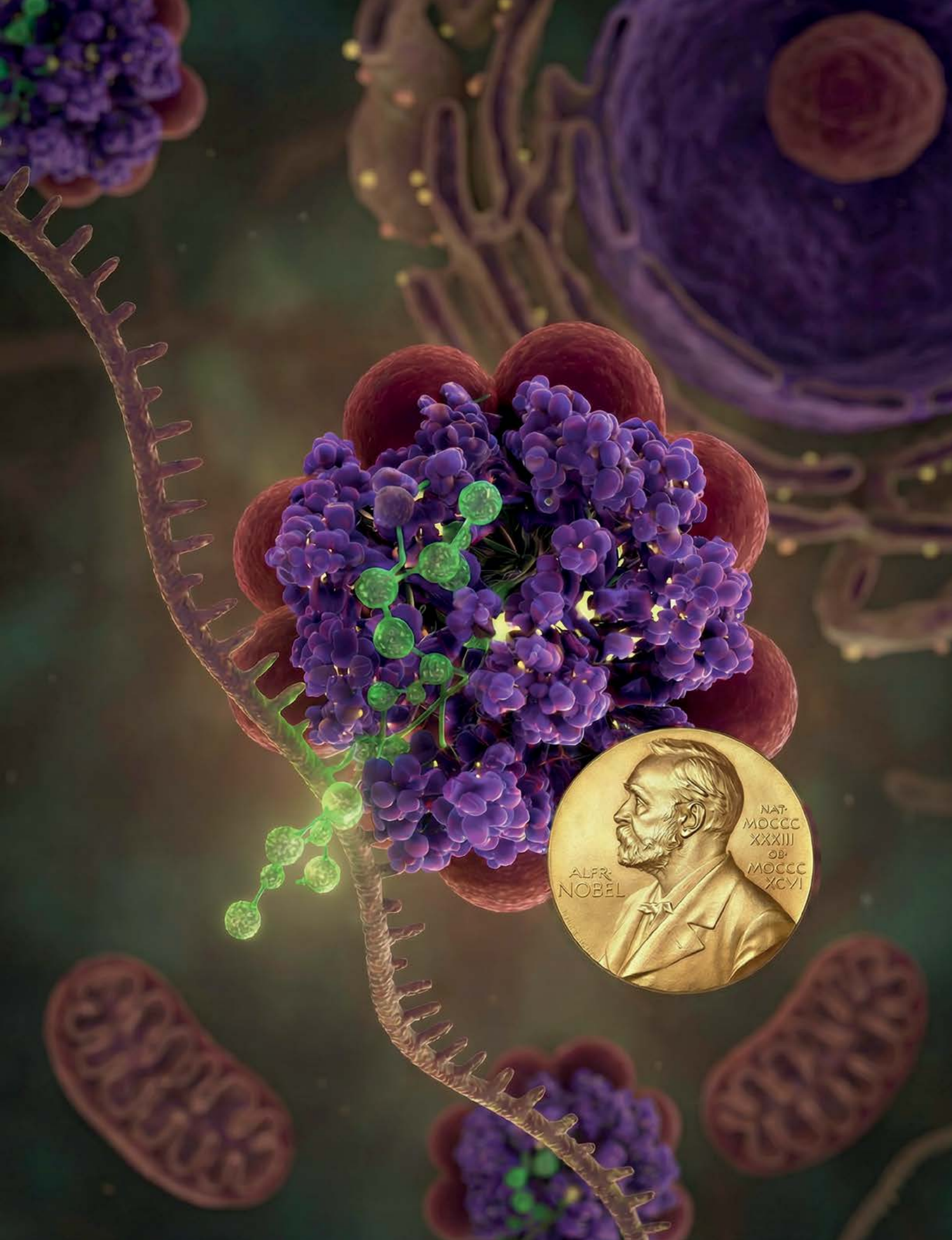
A pesar de su tamaño diminuto, los miARN desempeñan un papel decisivo en el control de la vida celular, pues regulan qué mensajes genéticos se convierten en proteínas y cuáles deben silenciarse o eliminarse. Gracias a este control, una sola célula puede dar origen a un organismo completo, permitiendo que órganos como el cerebro, el corazón y los pulmones se formen de manera ordenada. Estos reguladores no detienen su labor tras el nacimiento, continúan actuando a lo largo de la vida para mantener el equilibrio y funcionamiento normal de los tejidos.

Cuando la regulación de los miARN se altera, ese equilibrio se rompe. Su desajuste se ha relacionado con procesos inflamatorios graves, cáncer, alteraciones metabólicas e incluso con una mayor gravedad de infecciones como la del covid-19. Estos hallazgos muestran cómo cambios aparentemente mínimos a nivel molecular pueden desencadenar consecuencias profundas en la salud.

Por todo ello, los miARN actualmente se investigan como biomarcadores y blancos terapéuticos con el potencial de mejorar el diagnóstico temprano y personalizar los tratamientos. En el futuro, estas diminutas moléculas podrían incluso convertirse en una de las claves para la regeneración de tejidos y órganos, ofreciendo soluciones que hasta hace poco parecían imposibles.

Los miARN

Dentro de cada una de nuestras células existe un conjunto de instrucciones que indica cómo crecer, funcionar y adaptarse. Estas instrucciones están escritas en el



ADN, pero no se utilizan de manera directa. Para protegerse, el ADN permanece resguardado dentro del núcleo celular y necesita intermediarios que copien y ejecuten su información.

Esa tarea recae en el ARN. Para que la información genética pueda utilizarse, primero debe copiarse del ADN a distintas moléculas de ARN, que actúan como mensajeros y ejecutores de las instrucciones celulares. Durante mucho tiempo se pensó que el papel del ARN era sencillo y limitado: transportar la información desde el núcleo hasta el lugar donde se fabrican las proteínas.

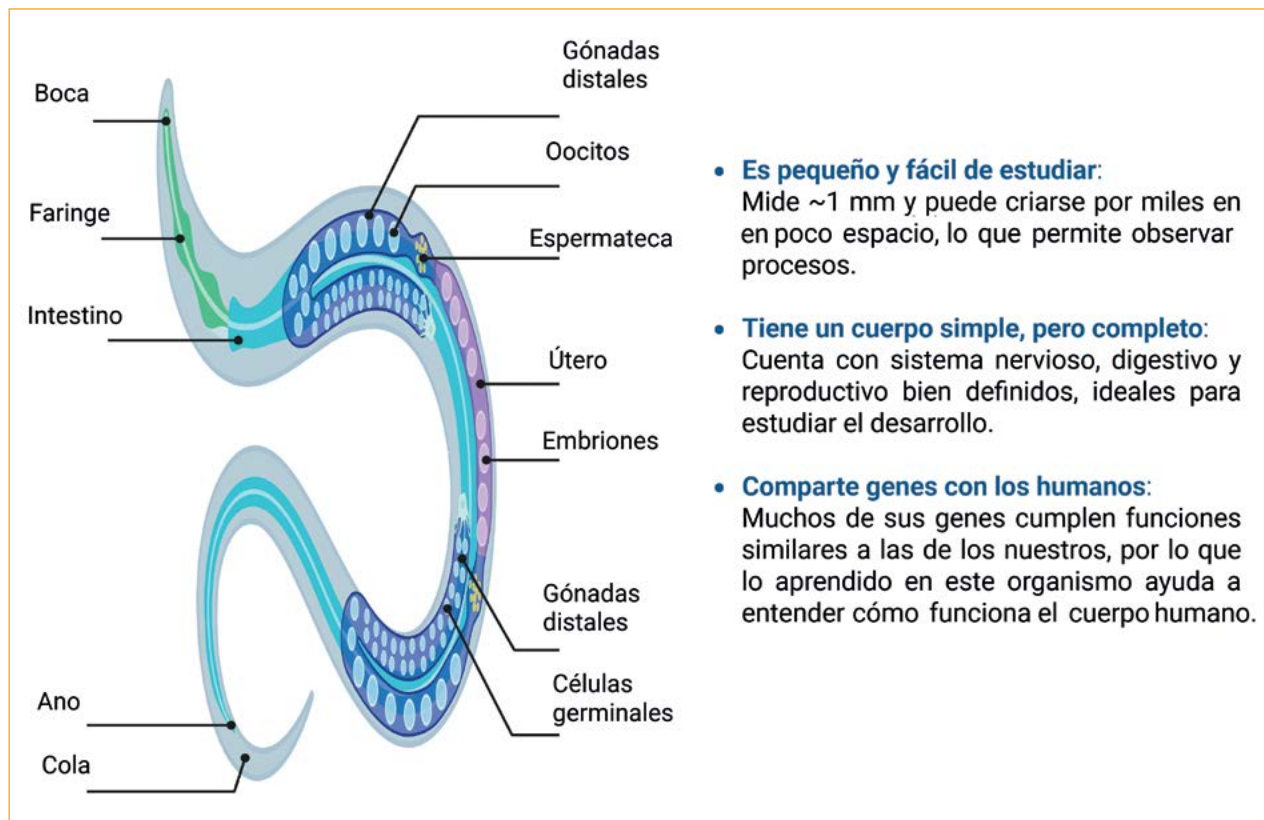
Sin embargo, con el avance de la investigación se descubrió que el ARN es mucho más diverso y cumple múltiples funciones. Dentro de esta diversidad se encuentran los microARN. A diferencia de los ARN convencionales, que pueden estar formados por cientos o miles de bases genéticas, los microARN son extremadamente pequeños y contienen apenas entre 20 y 25 bases. Además, no producen proteínas. Su función es distinta y fundamental: regulan el uso de la información genética, asegurándose de que ciertos

mensajes se utilicen en el momento adecuado y en la cantidad correcta.

Mientras algunos ARN se encargan de llevar las instrucciones, los microARN ayudan a decidir cuáles de esas instrucciones deben ejecutarse y cuáles deben esperar. Gracias a este sistema de regulación fina, las células pueden adaptarse a distintas situaciones y desempeñar funciones muy específicas, incluso cuando comparten exactamente el mismo ADN.

■ ¿Por qué un hallazgo tan pequeño mereció un Premio Nobel?

■ El descubrimiento de los microARN no ocurrió al estudiar al ser humano, sino a partir de un organismo mucho más simple: un gusano microscópico llamado *Caenorhabditis elegans* (Figura 1), ampliamente utilizado como modelo en biología del desarrollo. Fue al analizar cómo este organismo pasaba de una etapa a otra de su desarrollo, como Victor Ambros y Gary Ruvkun observaron algo inesperado. Detectaron que



- **Es pequeño y fácil de estudiar:** Mide ~1 mm y puede criarse por miles en poco espacio, lo que permite observar procesos.
- **Tiene un cuerpo simple, pero completo:** Cuenta con sistema nervioso, digestivo y reproductivo bien definidos, ideales para estudiar el desarrollo.
- **Comparte genes con los humanos:** Muchos de sus genes cumplen funciones similares a las de los nuestros, por lo que lo aprendido en este organismo ayuda a entender cómo funciona el cuerpo humano.

Figura 1. ¿Por qué estudiar microARN en *Caenorhabditis elegans*?

ciertos genes se activaban y se silenciaban con una precisión temporal extraordinaria, pero el mecanismo no encajaba con las reglas conocidas. Por primera vez se demostró que la expresión genética podía regularse después de que el mensaje ya había sido producido. Es decir, incluso cuando una instrucción genética estaba escrita y lista para usarse, existían mecanismos capaces de decidir si debía ejecutarse, retrasarse o cancelarse.

Este hallazgo rompió una idea central de la biología: que la regulación genética dependía únicamente de la activación o desactivación de genes. Los microARN revelaron una capa adicional de control que operaba a nivel del ARN, permitiendo una regulación más fina, rápida y reversible.

Con el tiempo, se descubrió que este mecanismo no era exclusivo de un gusano microscópico. Por el contrario, estaba presente a lo largo de la evolución en plantas, animales y seres humanos. Esto confirmó

que se trataba de un principio biológico fundamental, esencial para el desarrollo, la diferenciación celular y el mantenimiento del equilibrio en los organismos complejos.

■ Cómo funcionan los microARN y por qué controlan la expresión genética

■ Como se muestra en la [Figura 2](#), los microARN se originan a partir de regiones específicas del ADN y se transcriben como moléculas de ARN que no contienen instrucciones para fabricar proteínas. Estas moléculas iniciales son procesadas dentro de la célula mediante una serie de cortes sucesivos, hasta generar fragmentos cortos de ARN de aproximadamente 20 a 25 nucleótidos.

Una vez formados, los microARN se incorporan a un complejo molecular que les permite interactuar con el ARN mensajero. Cada microARN reconoce se-

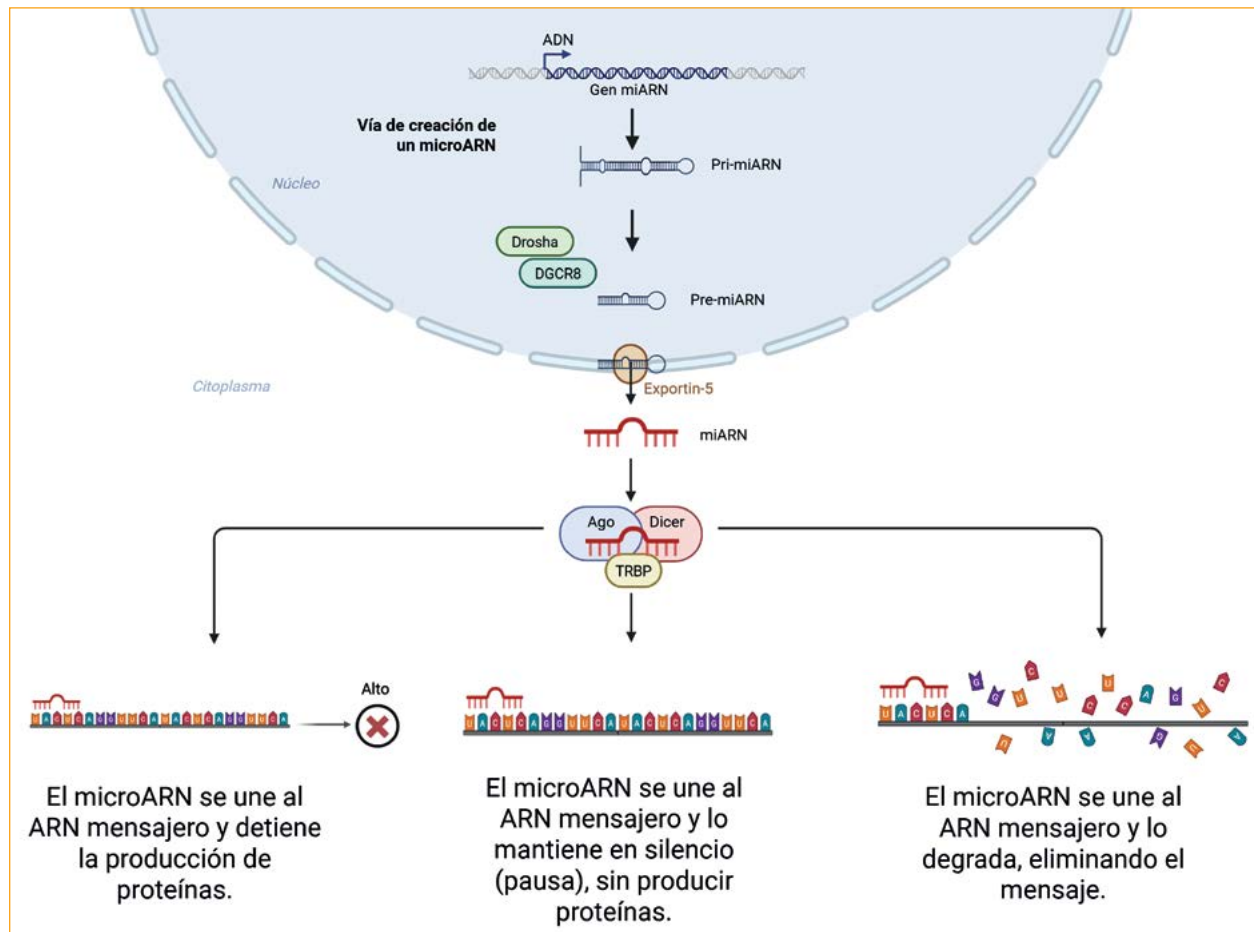


Figura 2. Origen y mecanismos de acción de los microARN.

cuencias específicas dentro de estos mensajes, lo que garantiza una regulación altamente selectiva.

Cuando un microARN se une a su ARN mensajero objetivo, interfiere con su traducción. Como resultado, la proteína correspondiente se produce en menor cantidad o su síntesis se detiene por completo. De este modo, la célula regula la expresión génica sin necesidad de modificar el ADN ni eliminar el mensaje original. Este mecanismo proporciona un control preciso y flexible de la actividad celular. Gracias a él, las células pueden ajustar rápidamente la cantidad de proteínas que producen en función de sus necesidades, responder a cambios en el desarrollo, el entorno o el estado fisiológico, y explicar por qué células con el mismo ADN pueden comportarse de manera distinta.

Cabe destacar que los microARN no revisan directamente cuántas proteínas hay en la célula. En realidad, responden a las señales que la propia célula genera cuando algo está de más o de menos. Si una proteína empieza a producirse en exceso, la célula activa microARN específicos que se unen al mensaje genético que la fabrica y reducen su uso. Así, los microARN ayudan a bajar la producción antes de que el exceso cause daño.

Este nivel de regulación es clave en procesos complejos como el desarrollo embrionario, la respuesta inmune, la adaptación celular y la enfermedad.

Del mecanismo a la forma: los microARN y la construcción del cuerpo humano

Para entender la importancia real de los microARN, basta con observar uno de los procesos biológicos más complejos y delicados que existen: el desarrollo embrionario. Es en esta etapa cuando los efectos de su regulación se hacen más evidentes.

En las primeras semanas de vida, cuando aún no somos conscientes de nuestra existencia, una sola célula debe tomar miles de decisiones precisas: qué será la cabeza y qué serán las extremidades, dónde aparecerán los brazos, cuántos dedos tendremos y cómo se organizará el cerebro. En este punto, no hay margen de error.

A continuación, se muestran algunos de los ejemplos mejor estudiados de cómo los microARN

intervienen en la construcción del cuerpo humano (**Figura 3**).

El cerebro

Durante el desarrollo cerebral, los microARN miR-9 y miR-124 determinan qué células se convierten en neuronas y dónde deben instalarse. Además, ayudan a conectar las neuronas entre sí y a eliminar conexiones sobrantes que no serán necesarias. Este control se logra bloqueando mensajes genéticos que mantienen a las células en estados inmaduros o mal ubicados.

¿Qué pasa si fallan?

El cerebro puede organizarse de forma incorrecta, lo que afecta funciones como el aprendizaje y la memoria desde etapas tempranas.

El corazón

Durante el desarrollo del corazón, el microARN miR-1 regula cómo se forman y organizan las células del músculo cardíaco, así como la sincronización de los latidos. Lo hace limitando la producción de proteínas que favorecen un crecimiento desordenado del tejido cardíaco.

¿Y si falla?

El corazón puede crecer de forma anómala o presentar alteraciones en el ritmo desde el inicio de la vida.

Los pulmones

Para que los pulmones funcionen correctamente, deben formar una estructura ramificada que permita el intercambio de oxígeno. La familia de microARN miR-17~92 regula este proceso. Lo hace controlando los mensajes genéticos que determinan cuántas células se multiplican y cuándo deben especializarse.

¿Qué pasa cuando fallan?

El desarrollo pulmonar puede ser incompleto, afectando la respiración desde el nacimiento.

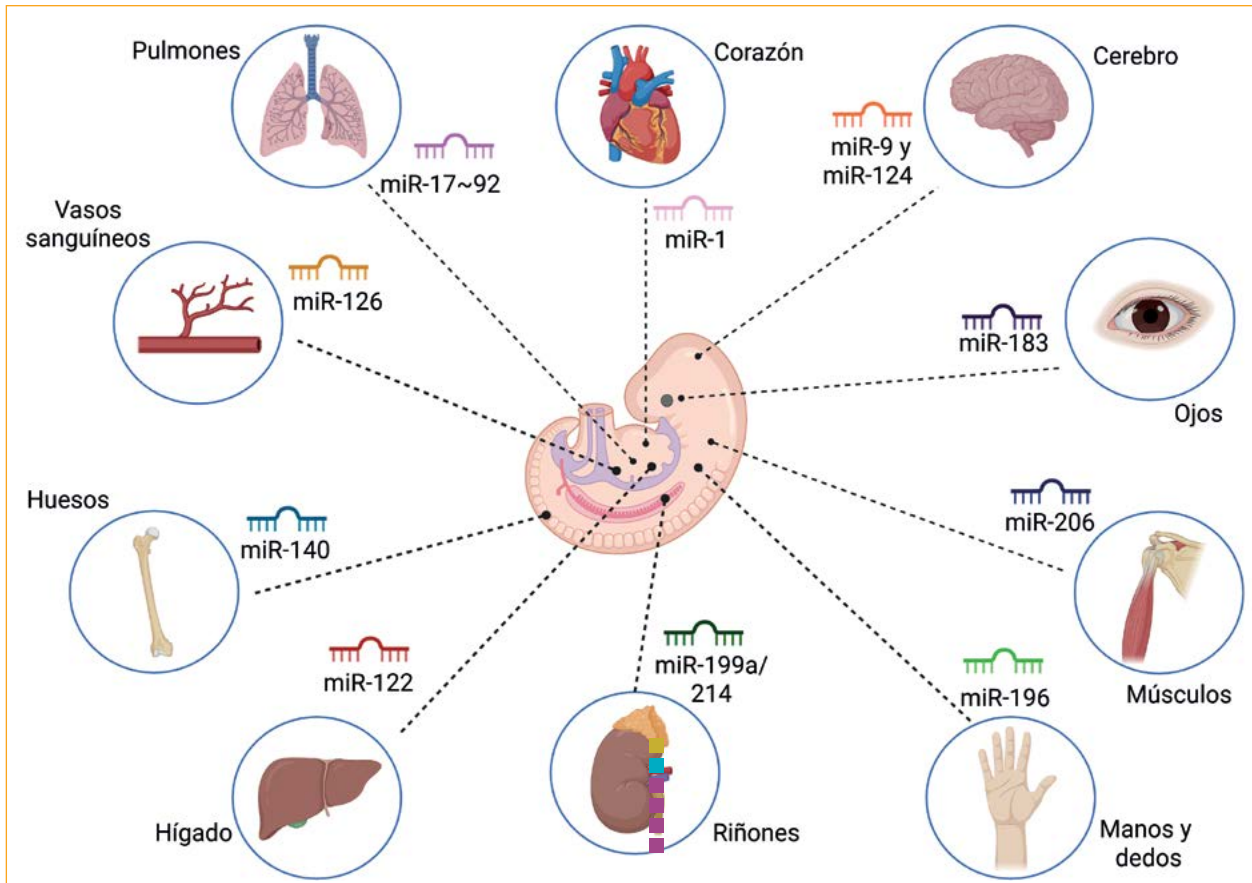


Figura 3. Los microARN en el proceso de la embriogénesis.

Los vasos sanguíneos

Los vasos sanguíneos deben crecer y conectarse con precisión para llevar oxígeno y nutrientes a todos los tejidos. El microARN miR-126 dirige este proceso. Lo hace bloqueando mensajes genéticos que interfieren con la correcta organización de la red vascular.

¿Y cuando falla?

Los vasos pueden quedar mal conectados, comprometiendo el suministro de oxígeno y nutrientes a los tejidos.

Manos y dedos

En las primeras etapas del desarrollo, las manos son una sola masa de tejido. El microARN miR-196 permite que los dedos se separen. Lo hace bloqueando los mensajes genéticos que mantienen vivas las células entre los futuros dedos, provocando su eliminación controlada.

¿Qué pasa si falla?

Los dedos permanecen unidos, dando lugar a malformaciones visibles desde el nacimiento.

Cuando el control se rompe: microARN y enfermedad en la edad adulta

En la vida adulta, el organismo depende de un control fino y constante de la producción de proteínas para mantener su equilibrio. Cuando los microARN dejan de regular adecuadamente los mensajes genéticos, este sistema de control se altera y comienzan a aparecer enfermedades (Figura 4).

En el contexto de inflamación e infecciones graves

La sobreexpresión de miR-21 favorece respuestas inflamatorias descontroladas. En enfermedades como el covid-19, niveles elevados de este microARN se han asociado con mayor gravedad y mortalidad, al

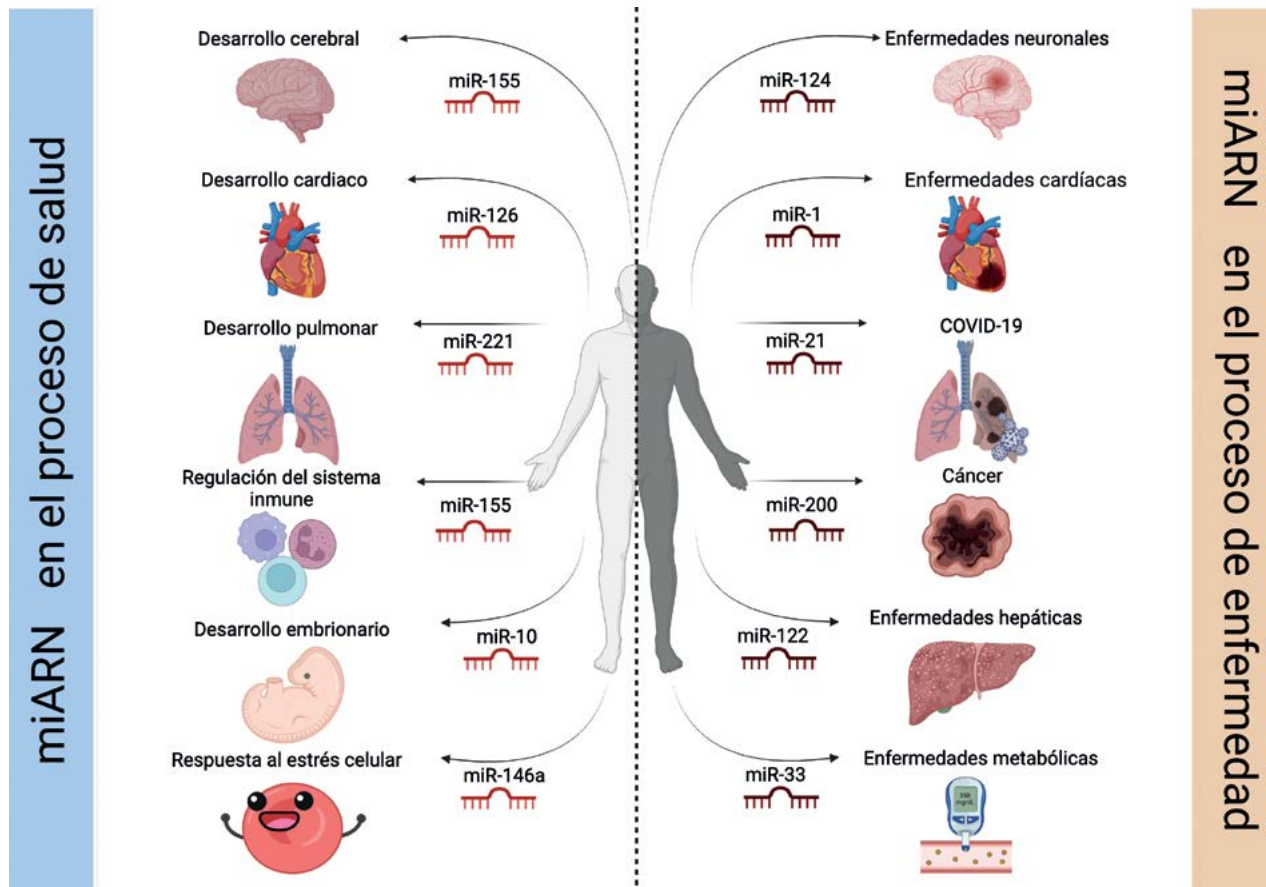


Figura 4. Los microARN en el proceso de salud-enfermedad.

amplificar señales inflamatorias que terminan dañando los tejidos.

En el cáncer

MicroARN como los de la familia miR-200 participan en la pérdida del control del crecimiento celular y facilitan la capacidad de las células para invadir otros tejidos, contribuyendo a la progresión tumoral.

En el metabolismo

MicroARN como miR-122 y miR-33 regulan proteínas clave involucradas en el manejo de grasas y azúcares. Cuando este control se altera, se favorecen procesos como la inflamación crónica y la resistencia a la insulina.

Estos ejemplos muestran cómo la alteración de un sistema regulador microscópico puede tener consecuencias clínicas relevantes en la edad adulta.

Mirar hacia adelante: microARN y la medicina del futuro

En los últimos años, varios de ellos han comenzado a utilizarse como herramientas diagnósticas y blancos terapéuticos, abriendo una nueva etapa en la medicina.

Uno de los ejemplos más claros es miR-122, un microARN altamente abundante en el hígado. Su medición en sangre se utiliza como biomarcador de daño hepático, incluso antes de que aparezcan señales en las pruebas tradicionales. Además, este microARN fue uno de los primeros en ser explorado como blanco terapéutico en hepatitis C, demostrando que bloquear un microARN específico puede tener efectos clínicos reales.

Otro caso relevante es miR-21-5p, ampliamente estudiado en cáncer. Sus niveles elevados se han asociado con el peor pronóstico en distintos tumores, lo que lo convierte en una herramienta útil para estratificar riesgo y evaluar progresión de la enfermedad.

En el campo de la inmunología, miR-155 se ha consolidado como un microARN clave en la activación del sistema inmune. Sus niveles se investigan como marcador diagnóstico y pronóstico en linfomas y enfermedades autoinmunes, y su modulación se estudia como una estrategia para ajustar respuestas inmunológicas exageradas.

■ Conclusión

■ Durante años, los microARN pasaron desapercibidos. Hoy sabemos que son piezas clave que regulan cómo se utiliza la información genética a lo largo de toda la vida. No construyen directamente las células ni los órganos, pero deciden qué instrucciones se activan, cuáles se silencian y en qué momento.

Gracias a este sistema de control fino, una sola célula puede transformarse en un organismo complejo, mantener su equilibrio en la vida adulta y responder o fallar ante la enfermedad. Cuando este control funciona, el cuerpo se adapta con precisión; cuando se rompe, pequeños desajustes moleculares pueden convertirse en problemas graves.

Pequeños, invisibles y precisos, los microARN nos recuerdan que, en biología y también en la vida, lo más diminuto puede tener el impacto más grande.

Brandon Bautista-Becerril

Laboratorio de Neumogenómica, Instituto Nacional de Enfermedades Respiratorias Ismael Cosío Villegas.
brandonbautistab@gmail.com

Ruth Kenia Marcial Valdez

Facultad de Estudios Superiores Zaragoza, UNAM.
ruth.kenia.v@gmail.com

Ramcés Falfán-Valencia

Laboratorio de Neumogenómica, Instituto Nacional de Enfermedades Respiratorias Ismael Cosío Villegas.
rfalfanv@iner.gob.mx

Lecturas recomendadas

Bautista-Becerril, B., G. Pérez-Dimas, P. C. Sommerhalder-Nava, A. Hanono, J. A. Martínez-Cisneros *et al.* (2021), "MiRNAs, from evolutionary junk to possible prognostic markers and therapeutic targets in COVID-19", *Viruses*, 14(1):41. Disponible en: <https://www.mdpi.com/1423796>, consultado el 12 de febrero de 2026.

Bautista-Becerril, B., K. J. Nava-Quiroz, E. Muñoz-Soria, A. Camarena, I. Fricke-Galindo *et al.* (2023), "High expression levels of miR-21-5p in younger hospitalized COVID-19 patients are associated with mortality and critical disease", *International Journal of Molecular Sciences*, 24(12):10112. Disponible en: <https://www.mdpi.com/2341530>, consultado el 12 de febrero de 2026.

Condrat, C. E., D. C. Thompson, M. G. Barbu, O. L. Bugnar, A. Boboc *et al.* (2020), "MiRNAs as biomarkers in disease: latest findings regarding their role in diagnosis and prognosis", *Cells*, 9(2):276. Disponible en: <https://www.mdpi.com/624598>, consultado el 12 de febrero de 2026.

Kabekkodu, S. P., V. Shukla, V. K. Varghese, J. D'Souza, S. Chakrabarty y K. Satyamoorthy (2018), "Clustered miRNAs and their role in biological functions and diseases", *Biological Reviews*, 93(4):1955-1986. Disponible en: <https://doi.org/10.1111/brv.12428>.

Christopher Hernández-Rodríguez, Brenda I. Dodge Velázquez y Roberta Salinas-Marín

El misterioso mundo de los glicoARN

Los glicoARN revolucionaron el campo de la glicobiología cuando se descubrió que algunos tipos de ARN, como los miARN, ARNNO, ARNN, ARNr y los ARN Y, están modificados con carbohidratos y podrían desempeñar un papel crucial en la respuesta inmune. Por la falta de tecnología para su análisis directo, la biosíntesis, la abundancia y la distribución de estas moléculas siguen siendo un misterio. Aquí se describen algunos avances recientes que posicionan a los glicoARN en campos de avanzada como el estudio de la progresión del cáncer.

Los glicoARN

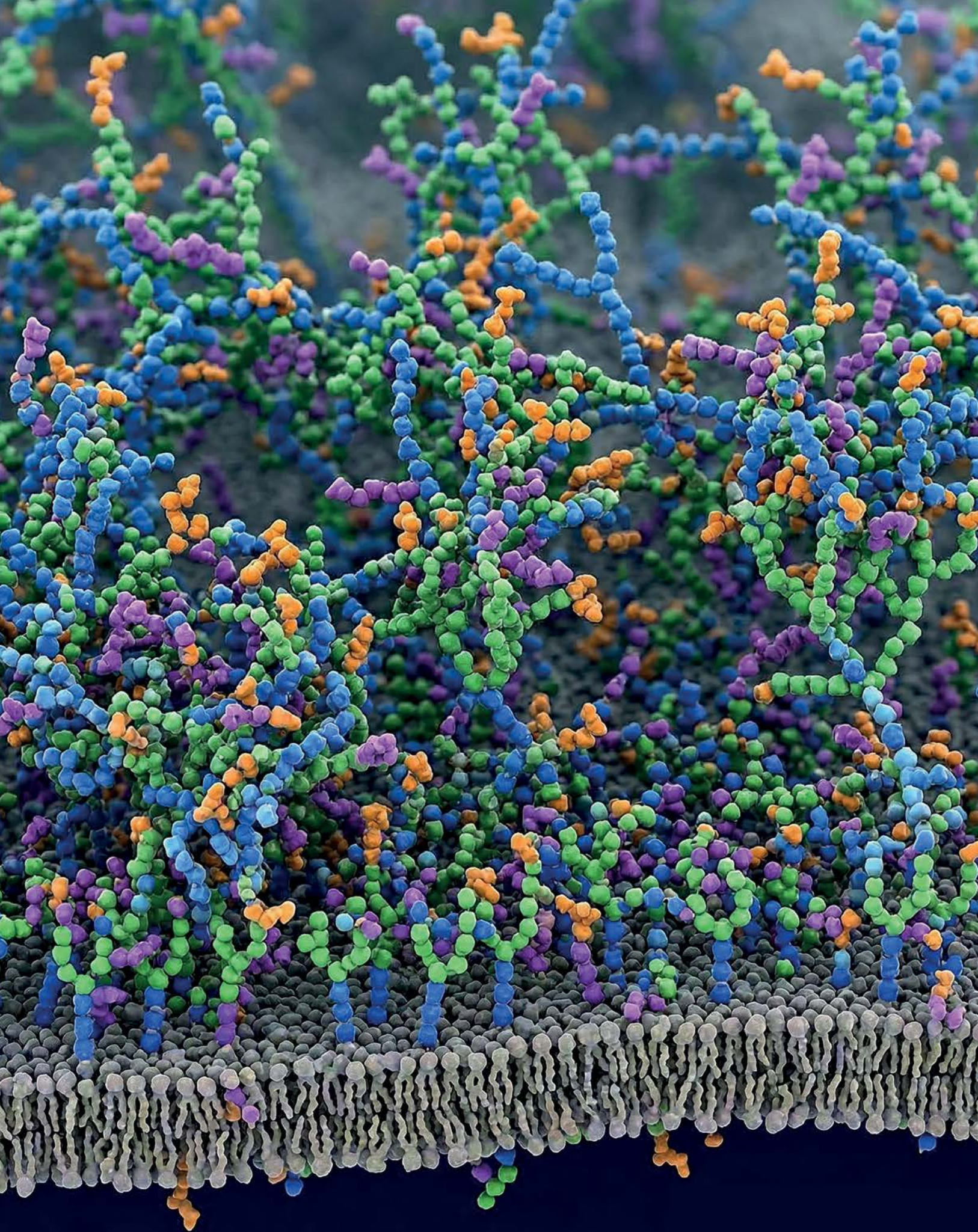
La glicobiología estudia la dinámica celular de los carbohidratos también llamados **glicanos**. Esta fascinante ciencia ha permitido conocer el mundo de las proteínas y lípidos, modificados o adornados con carbohidratos que, en esta fusión, se conocen como glicoproteínas y glicolípidos. Recientemente, se descubrió que el ácido ribonucleico o ARN es una molécula que también presenta adornos de carbohidratos. Este hallazgo ha sorprendido a los científicos, estableciendo un puente de estudio entre el ARN y la glicobiología.

El ARN es una cadena simple de nucleótidos que contienen una base nitrogenada (adenina, guanina, citosina o uracilo), un azúcar de cinco átomos de carbono (ribosa o desoxirribosa) y un grupo fosfato. Esta molécula desempeña un papel fundamental en la síntesis de proteínas, donde también intervienen el ARN ribosomal (ARNr), que actúa como la cocina en un restaurante; los ARN de transferencia (ARNt), que son los ingredientes; y el ARN mensajero (ARNm), que equivale a la receta que contiene las instrucciones para llevar a cabo la síntesis correcta de proteínas. Este proceso, conocido como traducción del ARNm, constituye una base fundamental en la biología molecular y está representado en la **Figura 1**, donde también se muestra el mecanismo actualmente propuesto para la síntesis de los glicoARN.

También existen los ARN no codificantes de proteínas, como los microARN (miARN), ARN pequeños nucleares (ARNn), ARN pequeños nucleolares (ARNno) y

Glicanos

Cadenas de monosacáridos unidas por enlaces glicosídicos que pueden encontrarse libres o unidas a proteínas, lípidos o ARN.



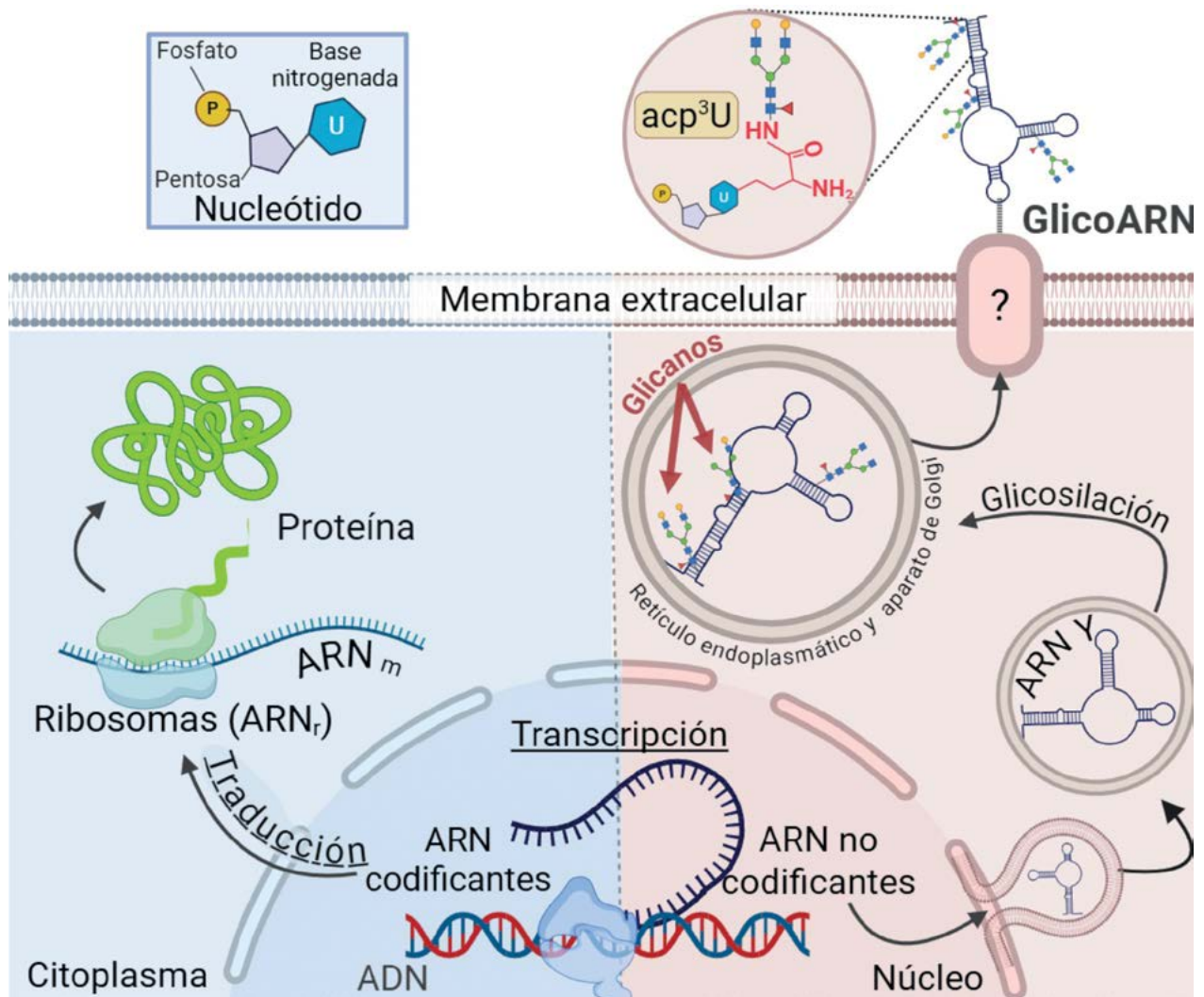


Figura 1. Vías de biosíntesis de ARNm (izquierda) y glicoARN (derecha). En el ARNm, el ADN se transcribe en ARN mensajero, el cual es exportado del núcleo a través de los poros nucleares hacia el citoplasma donde, con ayuda del ARN ribosomal y el ARN de transferencia, se traduce en una proteína. En el glicoARN, los ARN pequeños no codificantes son transportados del núcleo hacia el retículo endoplasmático y el aparato de Golgi mediante vesículas para glicosilarse en la base modificada acp³U [3-(3-amino-3-carboxipropil)uridina] y finalmente se anclan a la membrana externa de la célula (Xie y cols., 2024). En los glicoARN, el carbohidrato no sustituye al azúcar ribosa del ARN, sino que se une a una nucleobase modificada.

los ARN Y (estructuralmente parecidos a una Y), que participan en procesos como la regulación transcripcional, modificaciones químicas y maduración del propio ARNm; es decir, dando los toques finales del platillo.

Ahora bien, volviendo al tema de los glicoARN, ¿cómo se descubrieron estas biomoléculas? En 2018, científicos de la Universidad de Stanford identificaron una nucleobase ancestral que se puede combinar con carbohidratos distintos a la ribosa en el ARN (Yang y cols., 2018). Este descubrimiento ocasionó que se cuestionara la existencia de glicanos unidos al

ARN. Tal interrogante fue crucial para abrir las puertas al misterioso mundo de los glicoARN, moléculas descubiertas gracias a una herramienta de innovación capaz de identificarlas y caracterizarlas. Dicha técnica es conocida como la química del “Click IT”, desarrollada en el área de Química Bioortogonal por Carolyn R. Bertozzi, científica del área de glicobiología, quien recibió, junto con dos colegas, el Premio Nobel de Química en 2022 por dicha investigación (The Nobel Prize, 2022).

Como se mencionó antes, los glicanos se unen a proteínas, lípidos y algunos tipos de ARN en el re-

tículo endoplasmático (RE) y en el aparato de Golgi mediante un proceso llamado **glicosilación**. En mamíferos se han identificado nueve carbohidratos fundamentales: fucosa, manosa, galactosa, N-acetilglucosamina, N-acetilgalactosamina, ácido N-acetilneuramínico (ácido siálico o Sia), xilosa, ácido idurónico y glucorónico. Las glicoproteínas y los glicolípidos se sintetizan mediante las vías clásicas de N- y O-glicosilación. De manera interesante, estudios recientes han mostrado que los glicoARN también aprovechan esta maquinaria celular canónica para su ensamblaje (Flynn y cols., 2021).

Dado que los glicanos modulan procesos biológicos esenciales en las células, como las interacciones proteína-proteína y célula-célula, participan en la respuesta inmune, la comunicación celular y el desarrollo neuronal, entre otros; es crucial, por tanto, identificar la estructura de los carbohidratos presentes en los glicoARN y explorar el papel de estas moléculas a nivel celular.

¿Qué sabemos a la fecha de los glicoARN?

Apenas en 2021 un grupo de la Universidad de Stanford en Estados Unidos descubrió que los ARN Y, ARNN, ARNr, ARNno y ARNT se glicosilan (Flynn y cols., 2021). Por otro lado, en la Universidad de Soochow, en Taiwán, se reportó en 2023 que los miARN, ARNno, ARNN, ARNr y los ARN Y están glicosilados (Li y cols., 2023) (Figura 2). Es notable que sus reportes única-

mente difieren en cuanto al ARNT y los miARN, lo que sugiere un resultado consistente y confiable.

Los glicoARN se identificaron en las membranas plasmáticas de las células, donde se comportan como las antenas de cable en tu casa. Sin embargo, aún no se ha determinado cómo llegan estas moléculas a la superficie de las células. Una posibilidad es que estos glicoARN entren en contacto directamente con la membrana celular después de su biosíntesis en RE y aparato de Golgi, o que existan proteínas que actúen como anclas de los glicoARN en la membrana celular. Definir con precisión cómo se fijan a la membrana proporcionaría información primordial acerca de los glicoARN como **ligandos** de otras proteínas.

En un estudio realizado en la Universidad de Tongji en China se analizaron los N-glicanos provenientes de glicoARN extraídos de 12 órganos humanos sanos (Figura 3A). En los órganos estudiados se identificó un total de 677 tipos de N-glicanos. Sorprendentemente, éstos mostraron una gran diversidad de estructuras entre los distintos órganos, lo que demuestra la complejidad del proceso de glicosilación aun en estas moléculas (Figura 3B). De igual manera, encontraron que de estas 677 estructuras, el 50% de ellas presentaban residuos de fucosa en comparación con sólo un 10% de N-glicanos con ácido siálico (Figura 3C). Esto nos da indicios sobre las funciones que pueden tener y nos señala que debemos enfocarnos más en los glicoARN fucosilados que en los sialilados (Bi y cols., 2023).

Glicosilación

Proceso bioquímico mediante el cual se unen covalentemente cadenas de azúcares (glicanos) a biomoléculas, principalmente proteínas, lípidos y ARN durante su síntesis y maduración en el retículo endoplásmico y el aparato de Golgi.

Ligandos

Son moléculas que se unen de manera específica a otra molécula, generalmente a un receptor o proteína, para desencadenar o modular una respuesta biológica.

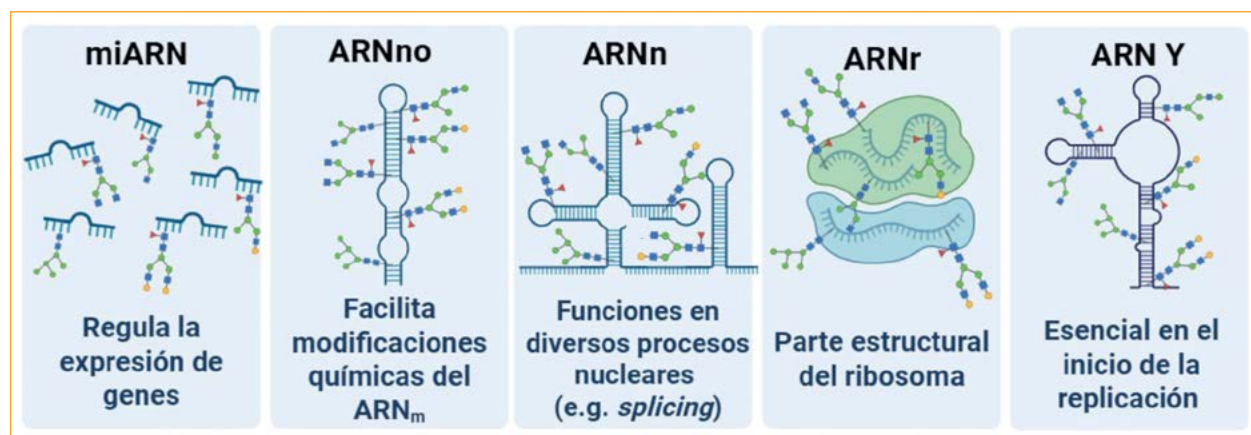


Figura 2. Tipos de ARN identificados con modificaciones de carbohidratos. Las figuras muestran los tipos de ARN glicosilados identificados en 2023: los miARN (microARN); los ARNno (*small nucleolar* ARN); los ARNN (*small nuclear* ARN); los ARNr (ARN ribosomal) y los ARN Y (estructuralmente parecidos a una Y). Basada en Li y cols., 2023.

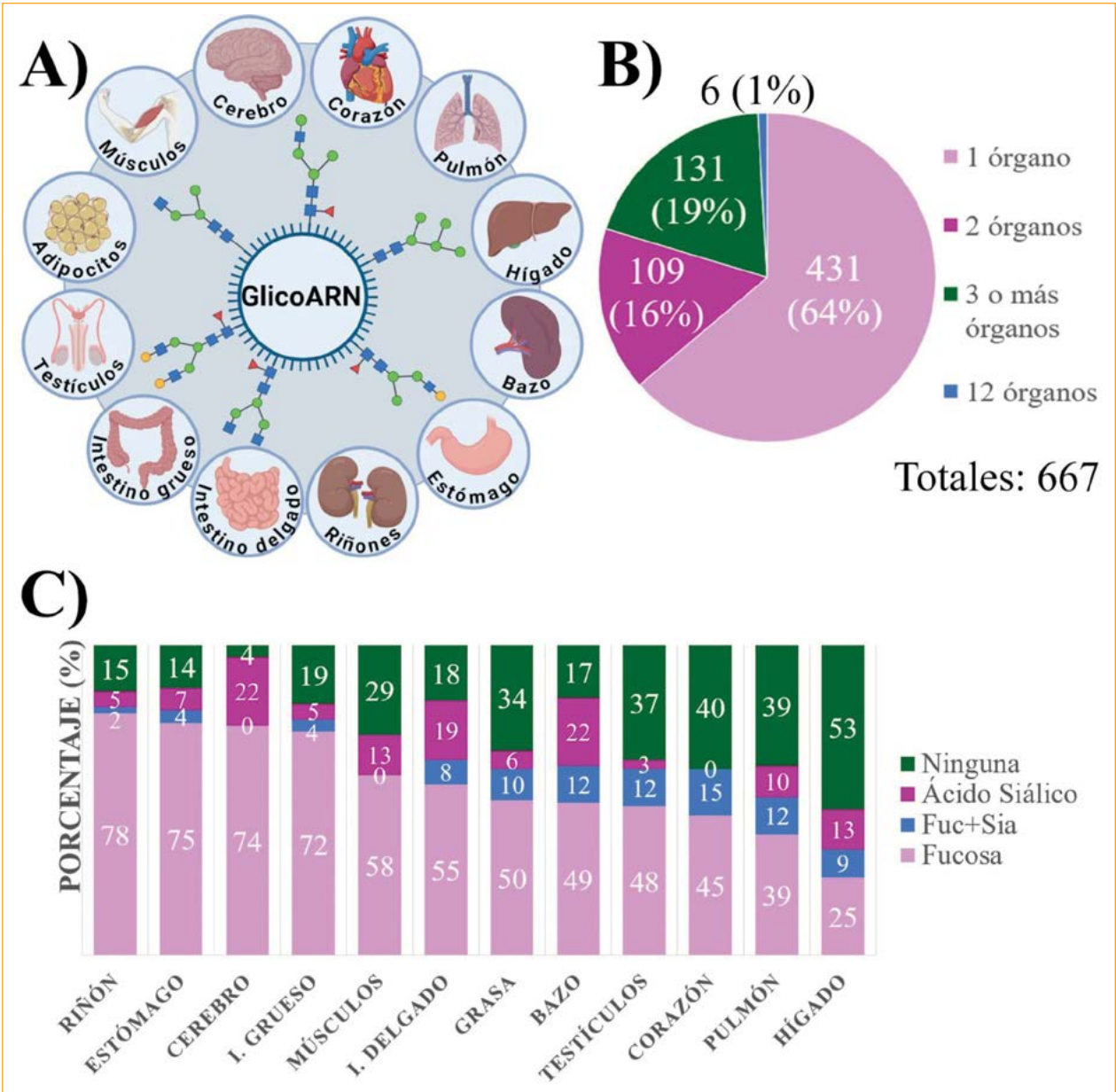
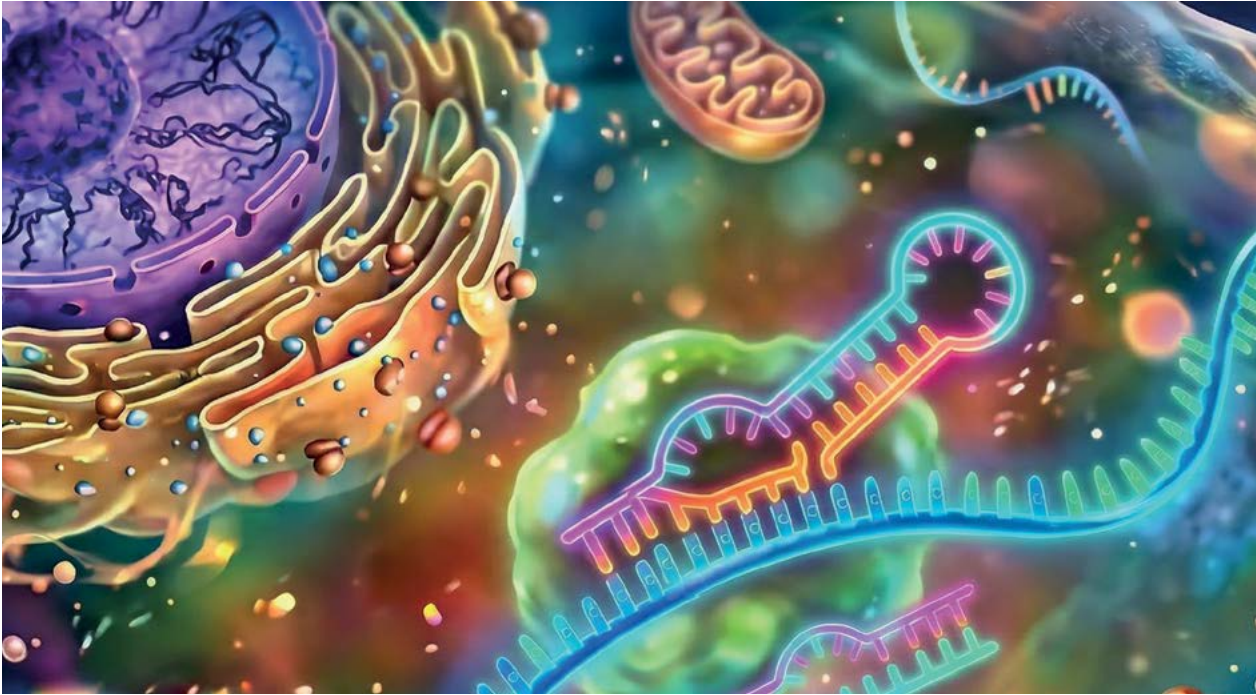


Figura 3. Análisis de N-glicanos en 12 órganos humanos. **A:** los 12 órganos estudiados, así como los 6 glicanos identificados en todas las muestras. **B:** la especificidad de los glicoARN mostró que el 64 % de los N-glicanos son exclusivos del órgano de donde se extrajeron; mientras que sólo 6 tipos de N-glicanos se identificaron repetidamente en los 12 órganos. **C:** el estudio mostró que de las 677 estructuras identificadas, un 50 % de los N-glicanos contenían el azúcar fucosa (Fuc), mientras que sólo un 10 % presentaba residuos de ácido siálico. Basada en Bi y cols., 2023.

¿Qué importancia celular tienen los glicoARN?

El estudio de la diversidad, localización y abundancia de los glicoARN ha permitido reconocer que estas moléculas no son simples modificaciones del ARN, sino componentes activos en procesos fundamentales de la comunicación celular y regulación del sistema inmunológico. Actualmente se sabe que los glicanos presentes en los glicoARN son reconocidos por proteínas de la familia SIGLEC (del inglés,

sialic acid-binding immunoglobulin-like lectins), localizadas principalmente en la superficie de los glóbulos blancos. Estas proteínas reconocen residuos terminales de ácido siálico en los glicanos. Este reconocimiento es crucial para la regulación de la respuesta inmune a patógenos, funcionando de manera similar a una corneta que da el aviso para la batalla contra microorganismos o alteraciones en la superficie celular (Flynn y cols., 2021).



En el contexto del cáncer, esta interacción ha adquirido relevancia especial. Muchos tumores utilizan glicanos sialilados como una forma de “camuflaje” molecular para evadir el reconocimiento inmunológico. Estudios recientes sugieren que los glicoARN altamente sialilados presentes en la superficie celular pueden contribuir a este fenómeno, favoreciendo señales inhibitorias mediadas por proteínas de la familia SIGLEC en células inmunes y promoviendo la tolerancia a las células tumorales. De esta manera, los glicoARN podrían participar en los mecanismos de evasión inmunológica característicos de tumores agresivos.

Además, investigaciones realizadas en la Universidad de Yale demostraron que los glicoARN desempeñan un papel importante en el reclutamiento y la migración de neutrófilos, células conocidas como los “soldados del sistema inmunológico”. Estas moléculas regulan las interacciones entre neutrófilos y células endoteliales, así como su reconocimiento por P-selectinas presentes en las plaquetas. Este proceso influye en fenómenos inflamatorios, trombóticos y tumorales, los cuales están estrechamente relacionados con la progresión del cáncer. Por ello, los glicoARN se consideran moduladores relevantes del microambiente tumoral (Zhang y cols., 2024).

Paralelamente, el desarrollo de nuevas tecnologías ha permitido aislar y analizar glicoARN en células normales y cancerosas. En 2023 se reportó el método quimioenzimático en fase sólida o SPCgRNA, que facilita la captura selectiva de ARN glicosilado. Esta herramienta ha abierto la posibilidad de utilizar los glicoARN como **biomarcadores** para el diagnóstico temprano y el pronóstico de distintos tipos de cáncer, aunque su aplicación aún es limitada debido a la falta de disponibilidad tecnológica (Li y cols., 2023).

Por otro lado, en un estudio realizado en una universidad de Shanghai, China, se exploraron aplicaciones terapéuticas directas de los glicoARN. En modelos murinos, nanopartículas enriquecidas con glicoARN han demostrado reducir la formación de trampas extracelulares de neutrófilos en patologías inflamatorias, evidenciando su potencial como agentes moduladores del sistema inmune. Estos resultados sugieren que, en el futuro, los glicoARN podrían emplearse como vehículos terapéuticos, moduladores inmunológicos o plataformas de liberación dirigida de fármacos (Zhang y cols., 2025).

En conjunto, la evidencia disponible indica que los glicoARN participan activamente en procesos de inmunorregulación, inflamación, adhesión celular y

Biomarcadores

Son características biológicas medibles que permiten identificar o evaluar procesos fisiológicos, patológicos o respuestas a un tratamiento.

evasión tumoral. Su capacidad para integrar información estructural y funcional los posiciona como una nueva clase de reguladores moleculares con alto potencial en el diagnóstico, pronóstico y tratamiento de enfermedades como el cáncer.

■ Limitaciones y controversias en el estudio de los glicoARN

■ Como en muchos campos emergentes, parte de la evidencia sobre glicoARN proviene de prepublicaciones científicas (*preprints*), aún no evaluadas en revisión por pares. Ejemplos son el primer catálogo amplio de N-glicanos asociados a glicoARN propuesto por Bi y cols. (2023) y el estudio de Kim y cols. (2025), que señala posibles interferencias técnicas en la purificación de ARN.

Estas limitaciones reflejan una etapa temprana del campo. Con el perfeccionamiento de las técnicas de aislamiento y análisis, se podrá validar con mayor precisión la naturaleza y funciones de los glicoARN, fortaleciendo su relevancia en biología celular y biomedicina.

■ Conclusión

■ El mundo misterioso de los glicoARN apenas comienza a dilucidarse, pero ya muestra un enorme potencial y avanza en una dirección prometedora. Hoy sabemos que estas moléculas participan activamente en procesos clave como la comunicación celular, la respuesta inmunológica y el desarrollo de enfermedades como el cáncer. Su capacidad para interactuar con el sistema inmune y modular fenómenos como la inflamación y la adhesión celular los convierte en actores inesperados dentro de la biología moderna.

Aunque su estudio aún enfrenta importantes retos tecnológicos, los avances recientes han permitido aislar, visualizar y analizar glicoARN con mayor precisión. Gracias a ello, se abren nuevas oportunidades para utilizarlos como biomarcadores tempranos, herramientas diagnósticas y, en el futuro, como blancos terapéuticos. Además, el desarrollo de técnicas para diseñar glicoARN en el laboratorio amplía sus posibles aplicaciones en medicina personalizada.

Como podemos ver, en este contexto, los glicoARN representan una frontera emergente entre la biología molecular, la glicobiología y la oncología.



Comprender su estructura, funciones y mecanismos de acción no sólo permitirá resolver uno de los enigmas más recientes de la ciencia, sino que también podría contribuir al desarrollo de estrategias innovadoras para el diagnóstico y tratamiento de enfermedades complejas. El estudio de estas moléculas nos recuerda que, incluso en procesos biológicos aparentemente bien conocidos, aún existen mundos por descubrir.

Christopher Hernández-Rodríguez

Laboratorio de Glicobiología Humana y Diagnóstico Molecular,
Centro de Investigación en Dinámica Celular,
Universidad Autónoma del Estado de Morelos.
chrishernandezrdz@gmail.com

Brenda I. Dodge Velázquez

Escuela de Estudios Superiores del Jicarero,
Universidad Autónoma del Estado de Morelos.
brenda.velazquez@docentes.uaem.edu.mx

Roberta Salinas-Marín

Laboratorio de Glicobiología Humana y Diagnóstico Molecular,
Centro de Investigación en Dinámica Celular,
Universidad Autónoma del Estado de Morelos.
rsm@uaem.mx

Lecturas recomendadas

- Bi, M., Z. Zhang, T. Wang, H. Liang y Z. Tian (2023), "A draft of human N-glycans of glycoRNA", *bioRxiv*. Disponible en: <https://doi.org/10.1101/2023.09.18.558371>.
- Flynn, R. A., K. Pedram, S. A. Malaker, P. J. Batista, B. A. H. Smith *et al.* (2021). "Small RNAs are modified with N-glycans and displayed on the surface of living cells", *Cell*, 184(12):3109-3124.e22. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.cell.2021.04.023>.
- Kim, S., Z. Li, Y.-g. Choi, K. Janssen, J.-W. Lagenbach y *et al.* (2025), "RNA-associated glycoconjugates highlight potential ambiguities in glycoRNA analysis", *Experimental and Molecular Medicine* 57: 2619-2628. Disponible en: <https://doi.org/10.1038/s12276-025-01585-z>.
- Li, J., S. Yue, Z. Gao, W. Hu, Z. Liu *et al.* (2023), "Novel approach to enriching glycosylated RNAs: Specific capture of glycoRNAs via solid-phase chemistry", *Analytical Chemistry*, 95(32):11969-11977. Disponible en: <https://doi.org/10.1021/acs.analchem.3c01630>.
- The Nobel Prize (2022), "Press release: The Nobel Prize in Chemistry 2022", *The Nobel Prize* [en línea]. Disponible en: <https://www.nobelprize.org/prizes/chemistry/2022/press-release/>, consultado el 7 de marzo de 2026.
- Xie, Y., P. Chai, N. A. Till, H. Hemberger, C. G. Lebedenko *et al.* (2024), "The modified RNA base acp³U is an attachment site for N-glycans in glycoRNA", *Cell*, 187(19):5228-5237.e12. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.cell.2024.07.044>.
- Yang, A. C., H. du Bois, N. Olsson, D. Gate, B. Lehallier *et al.* (2018), "Multiple click-selective tRNA synthetases expand mammalian cell-specific proteomics", *Journal of the American Chemical Society*, 140(23):7046-7051. Disponible en: <https://doi.org/10.1021/jacs.8b03074>.
- Zhang, N., W. Tang, L. Torres, X. Wang, Y. Ajaj *et al.* (2024), "Cell surface RNAs control neutrophil recruitment", *Cell*, 187(4):846-860.e17. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.cell.2023.12.033>.
- Zhang, Z., T. Ling, Q. Ding, F. Zhu, X. Cheng *et al.* (2025), "GlycoRNA-rich, neutrophil membrane-coated, siMT1-loaded nanoparticles mitigate abdominal aortic aneurysm progression by inhibiting the formation of neutrophil extracellular traps", *Materials Today Bio*, 31:101630. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.mtbio.2025.101630>.

Vanessa Gutiérrez-Chávez, Berenice Palacios-González y Consuelo Lomas-Soria

Cómete los tacos, ¡pero con salsa!

El chile, alimento emblemático de la gastronomía mexicana, contiene compuestos bioactivos, como la capsaicina y el capsiato, que interactúan con la microbiota intestinal y favorecen el metabolismo energético, lo que hace de este fruto un posible aliado en la prevención de la obesidad.

México es reconocido internacionalmente por su riqueza gastronómica: desde los taquitos al pastor con una salsa bien picosa hasta el mole, elaborado a partir de una mezcla de chiles y especias. Sin embargo, este orgullo culinario convive con una realidad preocupante: según la Encuesta Nacional de Salud y Nutrición (Ensanut, 2022), 4 de cada 10 niños y 8 de cada 10 adultos en el país presentan sobrepeso u obesidad.

La obesidad es una enfermedad compleja en la que influyen factores genéticos, ambientales y metabólicos, más allá del simple exceso de calorías. La alimentación juega un papel clave no sólo por la cantidad de energía que aporta, sino por su calidad y su procesamiento en el organismo. En México, los patrones alimentarios actuales –ricos en azúcares y grasas, y pobres en fibra– favorecen el desarrollo de enfermedades metabólicas como la obesidad.

Frente a este panorama, la solución no se limita a eliminar alimentos, sino que también implica recuperar elementos valiosos de la alimentación tradicional. En este sentido, el chile, ampliamente presente en nuestra cocina, ha despertado el interés científico por los efectos de sus compuestos bioactivos sobre el metabolismo energético y la microbiota intestinal, un eje clave en la regulación del peso corporal.

■ La alimentación en México: ¿un detonante de obesidad?

■ La pandemia de obesidad ha afectado severamente a nuestro país (**Figura 1**), y uno de los principales factores asociados a ella es el tipo de alimentación. Los patrones dietéticos ricos en grasas y azúcares, junto con un bajo consumo de verduras,





Figura 1. En México, la prevalencia combinada de sobrepeso y obesidad (S + Ob) alcanza el 75 %, en un entorno alimentario caracterizado por la alta disponibilidad y consumo de alimentos ultraprocesados y bebidas azucaradas. De acuerdo con la Ensanut, el 45 % de la población mexicana consume el equivalente a dos cucharadas cafeteras de verduras, mientras que el 69 % consume de forma regular refrescos y jugos.

frutas, leguminosas y cereales integrales, se han relacionado con el desarrollo de obesidad. Lamentablemente, este patrón es muy común en la mesa de las familias mexicanas.

De acuerdo con la Ensanut, sólo el 45 % de la población consume diariamente al menos 10 g de verduras, una cantidad equivalente a dos cucharadas cafeteras; en otras palabras, los mexicanos creemos que ¡es suficiente con la verdura de los tacos o la lechuga del pozole! Esta idea contribuye de manera significativa al desequilibrio energético y a una ingesta insuficiente de fibra, vitaminas y minerales, favoreciendo la perpetuación de obesidad.

Para comprender mejor cómo se desarrolla la obesidad, más allá de la perspectiva simplista de las calorías, conviene revisar brevemente el proceso de digestión. A lo largo de este proceso, los alimentos se transforman para permitir la absorción de macronutrientes (hidratos de carbono, proteínas y grasas) y micronutrientes (vitaminas y minerales) en el intestino. De este modo, la digestión inicia en la boca, que actúa como una máquina trituradora de alimentos, los cuales se transportan a través del esófago hacia el estómago. En este órgano, con la ayuda del ácido gástrico y diversas enzimas digestivas, la

comida se procesa aún más, facilitando que, durante su paso por el intestino delgado, la mayor parte de los nutrientes pueda absorberse y distribuirse a los distintos tejidos del cuerpo.

Finalmente, en el colon, la microbiota intestinal —compuesta por billones de microorganismos— desempeña un papel clave al fermentar aquellos componentes de la dieta que nuestro organismo es incapaz de digerir por sí mismo. Este proceso da lugar a la producción de sustancias conocidas como metabolitos, que influyen en funciones metabólicas, inflamatorias y regulatorias del apetito, integrando así al intestino como un actor activo en la regulación del peso corporal.

Así, la obesidad es una enfermedad compleja que no puede reducirse únicamente a la cantidad de alimentos consumidos, ya que en su desarrollo intervienen múltiples factores, como la carga genética, el ambiente, el metabolismo, la composición y funcionalidad de la microbiota intestinal.

La microbiota intestinal y su papel en la obesidad

Los seres humanos somos organismos holobiontes; es decir, además de con nuestros propios genes, con-

vivimos con los genomas de millones de microorganismos que han evolucionado junto con nosotros a lo largo del tiempo. Partiendo de este concepto, cada ser humano es un ecosistema compuesto de millones de individuos pertenecientes a miles de especies de microorganismos (bacterias, arqueas, hongos y virus), llamados en conjunto *microbiota*.

La microbiota intestinal cumple funciones metabólicas, inmunitarias y de barrera, fundamentales para la salud; participa en la digestión de los alimentos, la síntesis de vitaminas como las B5, B12, K, biotina y ácido fólico, así como en la absorción de minerales y en la producción de metabolitos bioactivos, como los ácidos grasos de cadena corta (AGCC). Estos compuestos ejercen efectos antiinflamatorios y contribuyen a mantener la integridad de la barrera intestinal.

Debido a su estrecha relación con la salud y la enfermedad, la composición de la microbiota intestinal se ha convertido en un tema científico de vanguardia. Para estudiarla, se emplea su clasificación taxonómica en “filos”, categorías que agrupan a los microorganismos según su organización biológica y características evolutivas. En el intestino humano predominan los filos *Bacillota* (antes *Firmicutes*) y *Bacteroidota* (antes *Bacteroidetes*), que en conjunto representan entre un 80-90 % de la diversidad microbiana, seguidos por *Actinobacteriota*, *Pseudomonadota* (antes *Proteobacteria*) y *Verrucomicrobiota*.

En un escenario de equilibrio funcional, esta comunidad microbiana se organiza en lo que se conoce como **eubiosis**, caracterizada por una alta diversidad y abundancia de microorganismos. En contraste, la disbiosis se refiere a un desequilibrio en la microbiota, ya sea por pérdida de diversidad, cambios en la abundancia relativa de ciertos grupos o proliferación de patógenos oportunistas. Por ejemplo, una mayor presencia de géneros como *Bifidobacterium* y *Lactobacillus* se ha asociado con un perfil de microbiota vinculado con una función intestinal adecuada, menor **inflamación de bajo grado** y un mejor control metabólico, mientras que incrementos en géneros como *Clostridium* o *Escherichia* se relacionan con alteraciones metabólicas.

Al igual que las huellas dactilares, la microbiota intestinal es única en cada individuo. Su composi-



ción comienza a moldearse desde etapas tempranas de la vida y se ve influida por factores como el tipo de parto, la lactancia y la alimentación. Aunque tiende a estabilizarse en la adultez, conserva cierta plasticidad; es decir, capacidad de adaptación ante cambios ambientales.

Entre los factores que más alteran la composición y funcionalidad de la microbiota se encuentran los antibióticos, el estrés y, de manera muy importante, la dieta. Un patrón de alimentación occidental –alto en grasas y azúcares y bajo en fibra– se asocia con una menor abundancia de bacterias productoras de AGCC, como *Roseburia* y *Faecalibacterium* (Figura 2). En contraste, una alimentación rica en fibra favorece una mayor diversidad microbiana, incrementa la abundancia de bacterias productoras de AGCC y se asocia con un menor riesgo de obesidad.

Desde la perspectiva de la medicina preventiva, una dieta pobre en alimentos con compuestos bioactivos puede reducir el potencial de la alimentación para promover la salud. En este contexto, la escasa inclusión del chile en la dieta implica prescindir de fitonutrientes como la capsaicina y el capsato, los cuales han mostrado efectos benéficos sobre la inflamación, el metabolismo energético y la microbiota intestinal. La ausencia de estos compuestos en la dieta no constituye por sí sola una causa directa de obesidad; sin

Eubiosis

Propuesto por Helmut Haenel a inicios del siglo xx, este término hace referencia al estado de equilibrio del ecosistema microbiano intestinal, en el que la comunidad microbiana mantiene una relación funcionalmente armónica con el huésped.

Inflamación de bajo grado

Estado de activación inmunitaria leve, pero persistente, caracterizado por niveles ligeramente elevados de mediadores inflamatorios que se asocian con alteraciones metabólicas.

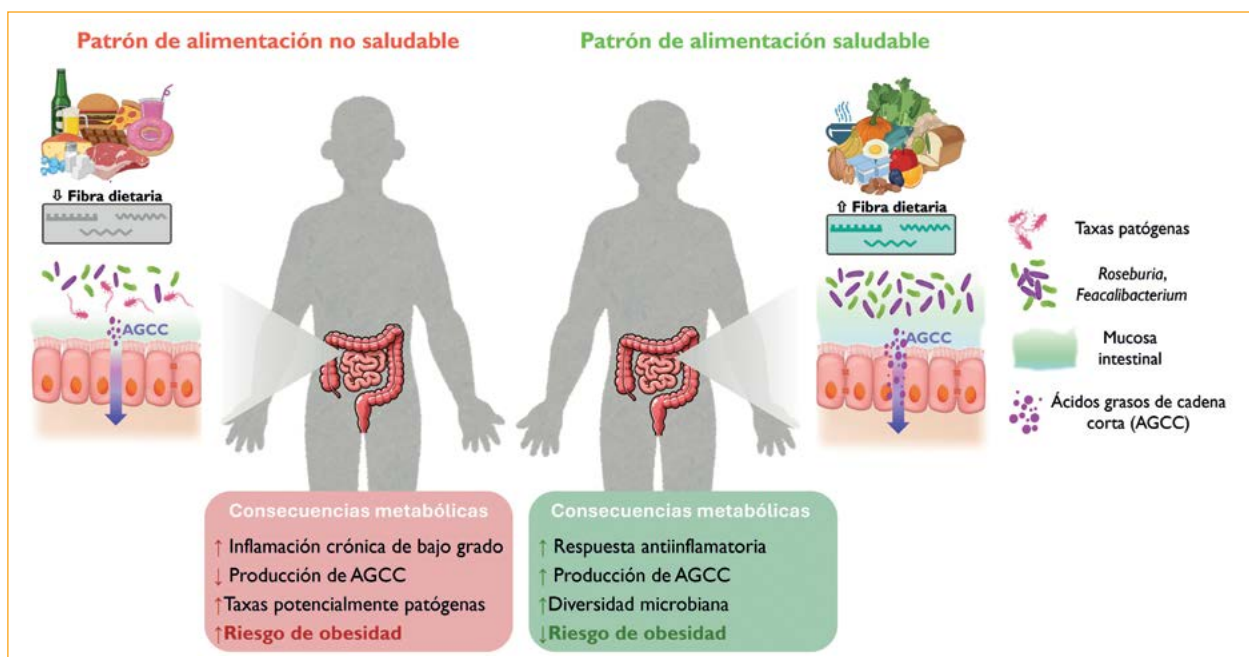


Figura 2. Los patrones dietéticos influyen en la microbiota intestinal y el riesgo de obesidad. Patrones de alimentación no saludables se asocian con disbiosis, menor producción de ácidos grasos de cadena corta (AGCC), adelgazamiento de la mucosa intestinal y mayor inflamación metabólica. En contraste, dietas ricas en fibra favorecen bacterias productoras de AGCC, como *Roseburia* y *Faecalibacterium*, contribuyendo a la regulación del metabolismo energético y a la prevención de la obesidad.

embargo, sí puede contribuir a un entorno metabólico menos favorable para la regulación del peso corporal, al limitar mecanismos fisiológicos protectores relacionados con la microbiota intestinal, la inflamación crónica de bajo grado y el metabolismo.

Ahora bien, ¿qué tienen que ver las bacterias intestinales con la obesidad? Te lo aclaramos en breve: ¡la microbiota es capaz de comunicarse con el cerebro! Esto ocurre a través del llamado eje microbiota-intestino-cerebro. Dicho eje está compuesto por una compleja red de señales que conecta al sistema digestivo con el sistema nervioso central. Para que esta comunicación se lleve a cabo, participan distintos sistemas: el sistema nervioso, que transmite señales mediante el nervio vago y el sistema nervioso entérico; el sistema endocrino, que utiliza hormonas como mensajeros, entre ellas la serotonina y la dopamina; y el sistema inmune, que contribuye a través de células inmunitarias capaces de producir citocinas que influyen en la actividad neuronal.

Además, la microbiota intestinal produce metabolitos bioactivos, como los AGCC, que actúan como señales periféricas con efectos en todo el sistema. Estos compuestos pueden influir indirectamente en el

cerebro mediante la activación de receptores específicos, la modulación del nervio vago o la regulación de hormonas involucradas en el apetito y el metabolismo energético, como el GLP-1 y la leptina.

En conjunto, la comunicación intestino-cerebro da lugar a respuestas adaptativas que regulan el apetito, la saciedad y el balance energético. Sin embargo, cuando este sistema se altera de manera crónica, puede favorecer el desarrollo de enfermedades metabólicas como la obesidad.

Una esperanza para combatir la obesidad

Las estrategias actuales para combatir la obesidad han resultado insuficientes, por lo que la búsqueda de nuevas alternativas sigue siendo una prioridad científica. Históricamente, el uso medicinal de plantas ha sido ampliamente documentado y hoy se sabe que los fitonutrientes que producen son responsables de muchos de los efectos benéficos observados en la salud humana. Bajo esta perspectiva, el chile emerge como un alimento de especial interés.

Originario de México y presente en nuestra dieta desde hace miles de años, el chile no es sólo un sím-

bolo cultural, sino también una fuente importante de vitaminas A, C, E y del complejo B, minerales como el hierro y el potasio y compuestos bioactivos. Entre ellos destaca la capsaicina, compuesto responsable de su sabor picante, ampliamente estudiado por sus efectos analgésicos, antioxidantes, antimicrobianos y metabólicos. Diversos estudios han mostrado que la capsaicina puede favorecer la pérdida de peso y modular la microbiota intestinal. No obstante, el carácter picante del chile limita su consumo en algunos sectores de la población. En este sentido, existen variedades de chiles no picantes, como el chile dulce CH-19, que produce capsiato. Este compuesto, hermano de la capsaicina, comparte sus efectos metabólicos sin generar sensación de ardor al contacto con las mucosas.

Tanto la capsaicina como el capsato contribuyen a la prevención y el manejo de la obesidad a través de diversos mecanismos fisiológicos. Entre ellos se encuentra el aumento del gasto energético mediante el incremento de la temperatura corporal, así como la promoción de la oxidación de ácidos grasos, favoreciendo “la quema de grasas” mediante el uso de las reservas de grasa como fuente de energía. Además, estos compuestos pueden mejorar el metabolismo de los hidratos de carbono al incrementar la sensibilidad a la insulina, mejoran la digestión, brindan una mayor sensación de saciedad y reducen el apetito. Adicionalmente, se ha propuesto que estos fitonutrientes ejercen efectos indirectos sobre el eje microbiota-intestino-cerebro al modular la composición de la microbiota intestinal y la producción de metabolitos con impacto metabólico, como los AGCC (Figura 3).

Ningún alimento por sí solo puede contrarrestar los efectos de hábitos poco saludables; la obesidad es una enfermedad multifactorial que requiere un abordaje integral. En este sentido, la incorporación de alimentos tradicionales y nutritivos como el chile dentro de una dieta equilibrada y acompañada de un estilo de vida saludable, puede contribuir de manera significativa al mantenimiento de la salud metabólica.

Cabe destacar que la mayoría de los estudios que han evaluado los efectos de la capsaicina y el capsato se han realizado en modelos animales, por lo



que su extrapolación a humanos continúa siendo motivo de debate, dada la complejidad y variabilidad propias de nuestra especie. Aun así, la evidencia disponible sugiere que el chile podría representar un coadyuvante nutricional prometedor en la prevención de la obesidad.

Finalmente, como bien decía Hipócrates, considerado el padre de la medicina: “Toda enfermedad comienza en el intestino”. En este sentido, los compuestos derivados del chile, gracias a su capacidad para interactuar con la microbiota intestinal y favorecer un entorno metabólico más saludable, pueden marcar la diferencia. Así que la próxima vez que



Figura 3. El chile, alimento de origen mexicano, es fuente de vitaminas, minerales, fibra y compuestos bioactivos como la capsaicina y el capsiato. Estos compuestos favorecen un mayor gasto energético y la oxidación de grasas. A nivel intestinal, modulan la microbiota al disminuir la abundancia de bacterias asociadas a disbiosis e inflamación metabólica y al favorecer bacterias productoras de ácidos grasos de cadena corta (AGCC). En conjunto, estos mecanismos contribuyen a la prevención y el manejo de la obesidad.

comas tacos recuerda que la salsa podría ayudar a que el mensaje enviado desde el intestino al cerebro sea: “Todo bien por acá, amigo”.

Vanesa Gutiérrez-Chávez

Doctorado en Ingeniería en Biosistemas,
Universidad Autónoma de Querétaro.
vanegcz@gmail.com

Berenice Palacios-González

Investigadora en Ciencias Médicas “E”,
Instituto Nacional de Medicina Genómica.
bpalacios@inmegen.gob.mx

Consuelo Lomas-Soria

Biología de la Reproducción,
Instituto Nacional de Ciencias Médicas y Nutrición Salvador
Zubirán.
consuelo.lomass@incmnsz.mx

Lecturas recomendadas

- Campos-Nonato, I., O. Galván-Valencia, L. Hernández-Barrera *et al.* (2023), “Prevalencia de obesidad y factores de riesgo asociados en adultos mexicanos: resultados de la Ensanut 2022”, *Salud Publica de México*, 65(supl. 1):S238-S247. Disponible en: <https://doi.org/10.21149/14809>.
- Hernández-Ocampo, A. C. y C. Escobedo-Martínez (2022), “Los chiles: herencia cultural mexicana”, *Revista de divulgación científica de nutrición ambiental y seguridad alimentaria*, 11(2):5-11. Disponible en: <https://www.redicinaysa.ugto.mx/index.php/REDICINAYSA/article/view/267/247>, consultado el 19 de febrero de 2026.
- Peñañiel-Peñañiel, M. B. y K. M. Novo-Pinos (2023), “Eje intestino – cerebro – microbiota y su impacto en la salud”, *RECIAMUC*, 7(2):6-575. Disponible en: [https://doi.org/10.26820/reciamuc/7.\(2\).abril.2023.566-575](https://doi.org/10.26820/reciamuc/7.(2).abril.2023.566-575).
- Van Hul, M., P. D. Cani, C. Petitfils *et al.* (2024), “What defines a healthy gut microbiome?”, *Gut*, 73(11):1893-1908. Disponible en: <https://gut.bmj.com/content/gutjnl/73/11/1893.full.pdf>, consultado el 19 de febrero de 2026.
- Zsiborás, C., R. Mátics, P. Hegyi *et al.* (2017), “Cap-saicin and capsiate could be appropriate agents for treatment of obesity: A meta-analysis of human studies”, *Critical Reviews in Food Sciences and Nutrition*, 58(9):1419-1427. Disponible en: <https://doi.org/10.1080/10408398.2016.1262324>.

Daniel Martínez Flores, Karla Yarentzi Contreras de la Torre y Luis Alfonso Vaca Domínguez



El mundo nanoscópico de los virus a través de la luz

Los virus, a pesar de ser sistemas biológicos pequeños acelulares, desempeñan roles fundamentales en los ecosistemas y la medicina. Investigarlos no ha sido una tarea fácil; sin embargo, utilizando las propiedades de la luz en técnicas de microscopía avanzada, como la microscopía de superresolución, STORM, hemos podido adentrarnos en el mundo nanoscópico de los virus y comprender su complejidad estructural y funcional.

Introducción

Los virus son entidades biológicas infecciosas acelulares que carecen de procesos metabólicos y maquinaria para sintetizar proteínas, por lo que tampoco poseen la capacidad de replicarse por sí mismos. Los virus llevan a cabo funciones de gran importancia en el mundo que nos rodea, y sólo una pequeña porción de la diversidad viral causa enfermedades. Por ejemplo, los virus participan en el control natural de las poblaciones para limitar su sobrecrecimiento, como es el caso de los fagos con las bacterias, y en los ciclos nutrimentales de los ecosistemas, aumentando la productividad y su funcionamiento en general. En el ámbito médico, se han utilizado para el desarrollo de vacunas, antivirales y tratamientos como la terapia génica. Además, mediante transferencia de genes o mutaciones, los virus pueden modificar el genoma del hospedador, creando variación y biodiversidad genética. Así, los virus desempeñan funciones que van desde las más sencillas, como formar parte de los microbiomas, hasta las más complejas, en términos evolutivos.

Los virus pueden presentar distintos grados de complejidad. En esencia, están compuestos por un genoma de ADN o ARN, de cadena simple o doble –lineal o circular–, protegido por una cápside formada por proteínas. En algunos casos, la cápside se encuentra rodeada por una bicapa lipídica derivada del hospedador, denominada envoltura. De acuerdo con la presencia o ausencia de esta envoltura, los virus se clasifican como envueltos o no envueltos. A partir de esta estructura básica, la diversidad viral se manifiesta en la amplia variedad de tamaños, formas, geometrías y composiciones moleculares que presentan.



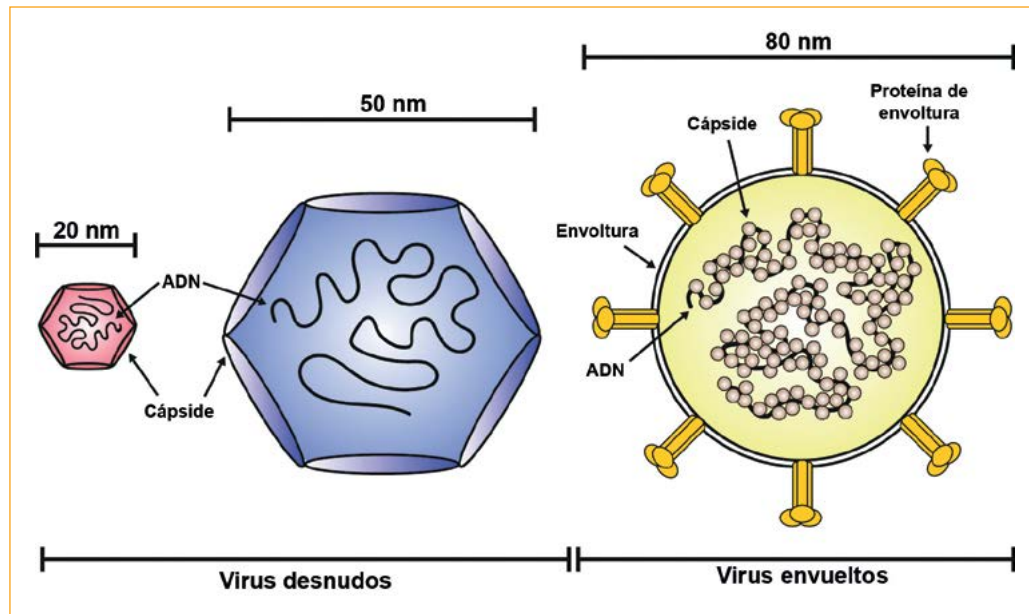


Figura 1. Características estructurales y componentes de los virus.

■ **Microscopía electrónica: revelando el mundo invisible de los virus**

Debido a su tamaño nanoscópico, los virus difícilmente pueden ser observados mediante un microscopio óptico convencional. El primer virus descubierto fue el virus del mosaico de tabaco (TMV) en 1892 (Ivanowski, 1892), pero no fue sino hasta 1935 cuando se publicaron las primeras micrografías del TMV (Stanley, 1935) y en 1939 se convirtió en el primer virus en ser observado por microscopía electrónica de transmisión (TEM, por sus siglas en inglés) (Kausche y cols., 1939), un tipo de microscopía que emplea electrones, con la resolución suficiente para observar virus.

El primer microscopio de TEM fue desarrollado en 1930 y destacaba por tener una resolución mucho mayor que los microscopios ópticos de la época. Años después se introdujo la tinción negativa, la cual permitió contrastar la muestra con el fondo y detectar virus en muestras líquidas, arrojando información sobre la morfología, simetría y el arreglo de la cápside. Gracias al progreso en TEM se logró el descubrimiento de virus de importancia clínica como los adenovirus, enterovirus, paramyxovirus y reovirus, entre otros.

La TEM moderna tiene el poder resolutivo suficiente para permitirnos ver hasta las estructuras

biológicas más pequeñas, como los virus. Es ampliamente utilizada para analizar la ultraestructura de los virus y conocer nuevos aspectos del ciclo viral en una célula infectada.

Actualmente TEM sigue siendo el estándar de oro para visualizar la estructura viral; no obstante, una de las limitaciones de TEM es que requiere utilizar muestras fijadas y no vivas, lo cual nos aleja de observar a los virus en sus condiciones más nativas y dinámicas. También resulta complicado identificar proteínas individuales en virus mediante TEM, por lo que es difícil determinar qué proteínas están formando las estructuras nanoscópicas observadas.

■ **Microscopía óptica y fluorescencia: iluminando el mundo oculto de los virus**

La microscopía óptica es una excelente herramienta para observar sistemas biológicos en un ambiente dinámico, ya que no es necesario fijar la muestra y permite visualizar fenómenos dinámicos. Se trata de una técnica que no es invasiva y no daña al espécimen. Sin embargo, posee importantes limitaciones que restringen la visualización de muestras a escalas nanométricas.

En todas las técnicas de microscopía existe un límite inferior en cuanto al tamaño de los detalles que

pueden ser discernidos, llamado límite de resolución espacial. Si la muestra es menor a este límite, entonces no puede ser vista con claridad. En el caso de la microscopía óptica esto se debe a que la luz viaja en forma de onda y por lo tanto solamente puede ser enfocada en regiones determinadas cuyo tamaño no sea inferior a la mitad de la longitud de onda de la luz. De esta manera, la resolución espacial en la microscopía óptica se encuentra limitada por la longitud de onda de la luz, y los detalles a menores distancias no pueden ser distinguidos. Éste es un principio físico y no está asociado al tipo de microscopio de luz utilizado. El límite de difracción de la luz aplica para microscopios sencillos de epifluorescencia, así como para modernos microscopios confocales.

Hace algunos años, pensar en observar virus empleando microscopía de luz hubiera parecido inimaginable. Sin embargo, la microscopía de fluorescencia (un tipo de microscopía óptica) ha revolucionado nuestra manera de observar el mundo nanoscópico de los virus.

La microscopía de fluorescencia es una técnica clave para los científicos que estudiamos los sistemas vivos e incluso aquellos que se consideran “no vivos”, como los virus. Esta técnica nos permite visualizar estructuras y procesos biológicos con una alta especificidad y sensibilidad, conservando las propiedades biológicas de la muestra. Su principal herramienta es el uso de fluoróforos, moléculas que tienen la capacidad de emitir luz cuando son excitadas por una fuente de luz. Los fluoróforos pueden emplearse para realizar el marcaje específico de proteínas, ácidos nucleicos como el ADN o el ARN, así como otros componentes estructurales como las membranas lipídicas en los virus.

Existen múltiples maneras de aprovechar la fluorescencia según los diferentes tipos de microscopía. Algunos ejemplos son la microscopía de epifluorescencia y confocal, técnicas convencionales que están limitadas en resolución y donde objetos menores a 200 nm (como los virus) serían imposibles de observar. Sin embargo, la microscopía de superresolución permite incrementar entre 10 y 20 veces la resolución espacial de la microscopía de luz convencional, facilitando la observación de estructuras de 20 nm o menos.

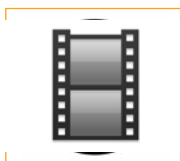


■ Microscopía de superresolución: reconstruyendo virus una molécula a la vez

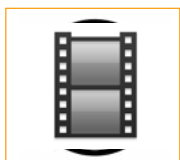
■ La microscopía de superresolución representa un conjunto de técnicas que han revolucionado la biología al romper la llamada “barrera de difracción” de la luz (Jacquemot y cols., 2020). Con la microscopía de superresolución, los científicos podemos seguir de cerca el proceso de infección, desde el momento en que un virus se adhiere a la membrana celular, hasta su entrada y replicación dentro de la célula. Esto no sólo ayuda a entender mejor cómo los virus logran evadir el sistema inmunológico, sino que también permite identificar puntos críticos en su ciclo de vida que podrían ser vulnerables a nuevos tratamientos antivirales.

Cada técnica de microscopía de superresolución tiene sus propias características y aplicaciones. Pero particularmente una de ellas ha llevado a los científicos a superar los límites de resolución en algo que pareciera inimaginable. Esta técnica es la microscopía de reconstrucción óptica estocástica (STORM), la cual localiza moléculas fluorescentes individuales en múltiples imágenes para reconstruir una imagen de alta resolución, una molécula a la vez.

La técnica STORM ha revolucionado la virología al permitir la visualización de proteínas individuales en virus, revelando su organización con una alta precisión. Con STORM, podemos encender y apagar



Video 1



Video 2

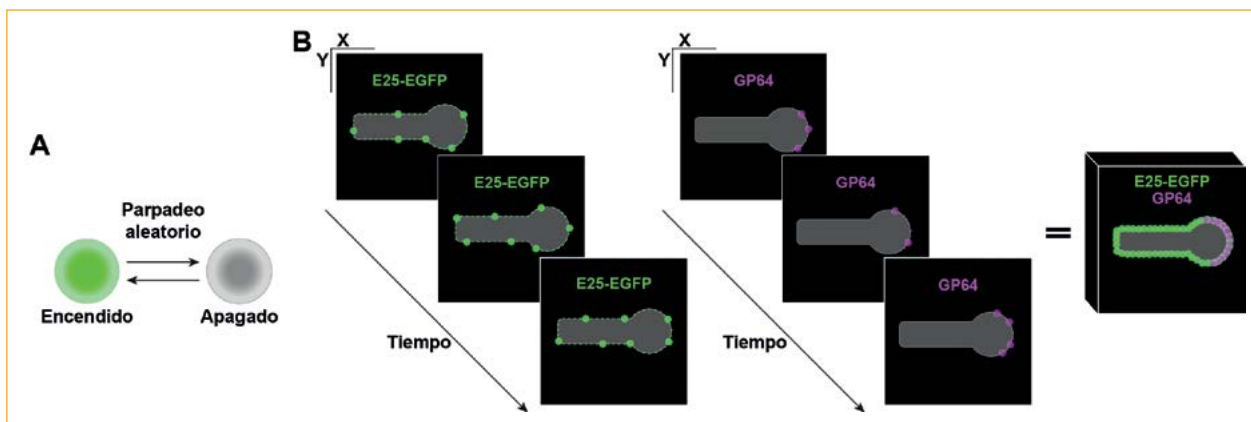


Figura 2. Fundamento de la técnica de STORM (A) y su uso en la localización de proteínas estructurales individuales para la reconstrucción de un mapa de distribución de proteínas estructurales individuales en virus (B). Véanse también los videos 1 y 2.

fluoróforos individuales de forma aleatoria. Al adquirir imágenes en el tiempo de estos pasos de encendido y apagado (llamados parpadeos), es posible reconstruir la distribución espacial de proteínas virales de interés con gran precisión, molécula por molécula, tal y como se ejemplifica en la **Figura 2** (**Videos 1 y 2**).

Esta capacidad para observar proteínas individuales dentro de un virus ha sido crucial para entender cómo éstas interactúan entre sí. Por ejemplo, en el estudio de herpesvirus, STORM ha revelado la organización de las diferentes capas de proteína del virus, incluyendo proteínas asociadas a la envoltura y proteínas que se encuentran entre la cápside y la envoltura (Laine y cols., 2015). STORM también ha ayudado a explicar el ensamblaje del virus de inmunodeficiencia adquirida humana (VIH) y los cambios que sufre durante su maduración (Buttler y cols., 2018). Otros virus de importancia médica para humanos como SARS-CoV-2 e influenza han sido estudiados para obtener información sobre su tamaño y la distribución de sus proteínas estructurales. Estos estudios han permitido demostrar, por ejemplo, que existe una mayor simetría en la distribución espacial de proteínas de la envoltura en el virus de SARS-CoV-2, comparado con el de influenza (McMahon y cols., 2023).

Además de proporcionar información básica sobre la biología de los virus, STORM tiene implicaciones prácticas significativas. Al entender mejor la organización y función de las proteínas virales, los científicos podemos identificar nuevas técnicas para

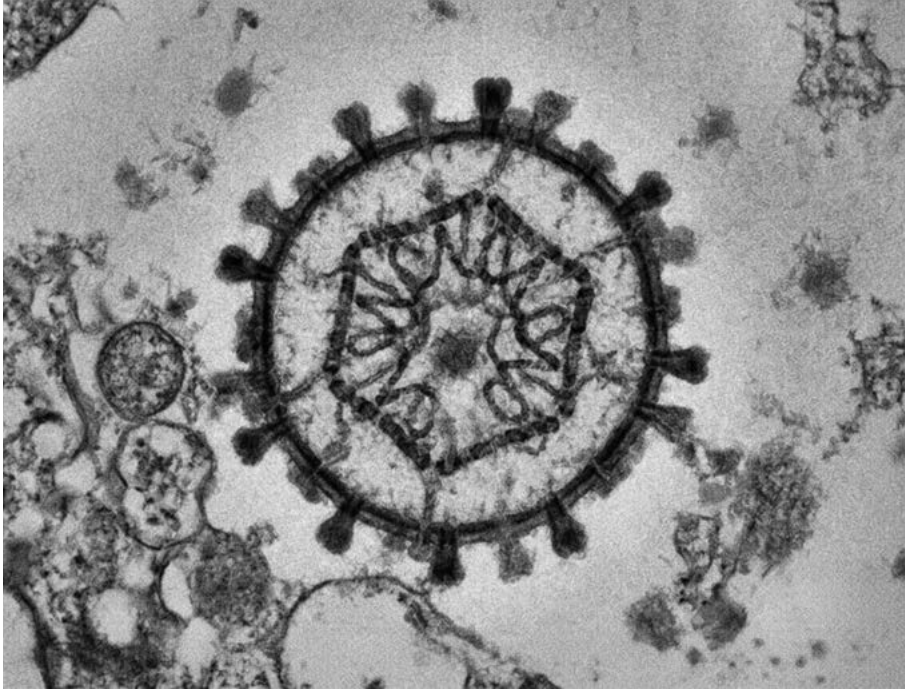
el desarrollo de medicamentos antivirales y diseñar estrategias más efectivas para interferir con el ciclo de vida del virus. Asimismo, el uso de STORM para analizar miles de partículas virales individuales nos permite entender la heterogeneidad morfológica viral, identificar malformaciones virales o virus sin contenido genético (vacíos), estudiar con detalle el anclaje de virus a la célula hospedera y seguir paso a paso la morfogénesis viral.

Resolviendo la nanoarquitectura de los baculovirus

Nuestro grupo de trabajo es pionero a nivel mundial en el uso de STORM para estudiar la distribución espacial de proteínas estructurales en baculovirus individuales. Los baculovirus son virus que infectan de manera selectiva a insectos.

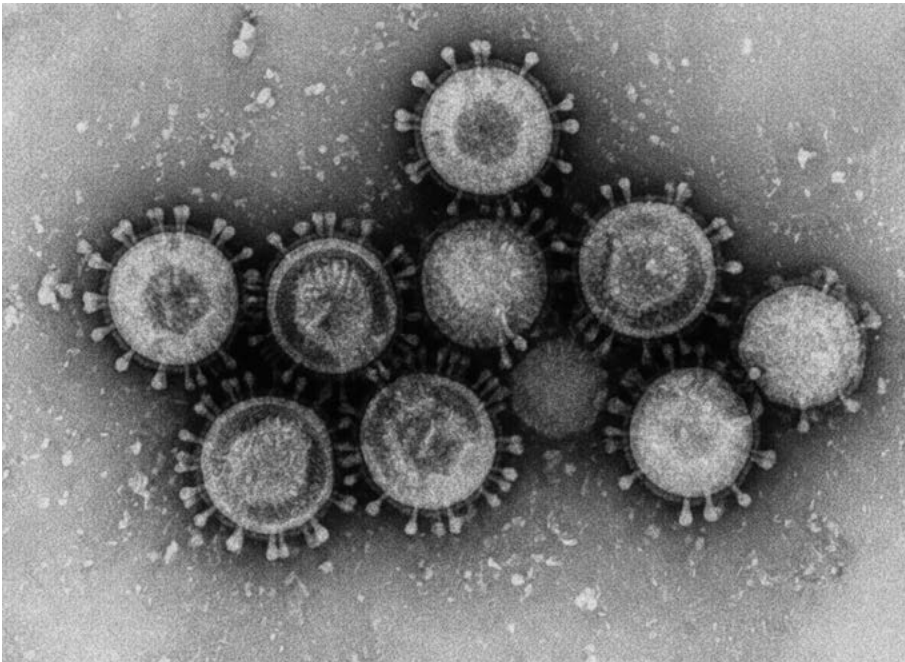
La historia del descubrimiento de los baculovirus está relacionada con el desarrollo de la industria de la seda en China, hace más de 5000 años. En esas épocas la seda era moneda de cambio a nivel mundial (Xeros, 1952).

La producción de seda se llevaba a cabo mediante el cultivo de la oruga o gusano de la seda llamado *Bombix mori*. En algunos periodos, los cultivos del gusano eran totalmente destruidos por un enemigo invisible: el baculovirus (Xeros, 1952). Así fue como años después, mediante el uso de la microscopía de TEM, se descubrió que estos virus infectan y matan al gusano de la seda (Xeros, 1952).



Los baculovirus, en combinación con el cultivo de células de insecto aisladas de la oruga *Spodoptera frugiperda*, han permitido desarrollar un nuevo sistema de expresión de proteínas en células eucariontes. Este sistema es utilizado actualmente para la producción de una gran cantidad de vacunas y proteínas recombinantes de uso médico y biotecnológico, principalmente porque el baculovirus es muy

fácil de manejar a nivel molecular para generar baculovirus recombinantes que expresen proteínas de interés biomédico. Además, los baculovirus producen una gran cantidad de proteína recombinante en las células de insectos en cultivo. Por todo lo anterior, los baculovirus se han utilizado por los últimos 30 años para la producción de proteínas recombinantes de interés biotecnológico y médico. Un sinnúmero de





vacunas modernas se produce en el sistema de expresión de baculovirus y células de insecto en cultivo.

Los baculovirus resultan ser una excelente herramienta para conocer el mundo nanoscópico de los virus con mayor profundidad. Su forma alargada como la de un bastón con un tamaño de entre 250 y 400 nm de largo, su fácil amplificación y purificación a partir de células de insecto en cultivo y la capacidad de manipularlos genéticamente son sólo algunas de las enormes ventajas que ofrece el estudio de estos virus mediante microscopía de STORM.

Nuestro estudio se ha centrado en entender cómo se distribuyen las proteínas estructurales a lo largo de estos virus. Para lograrlo, utilizamos la técnica de STORM, que nos permite observar la disposición de estas proteínas con una alta precisión.

Uno de los hallazgos más interesantes de nuestra investigación es el descubrimiento de que algunas proteínas estructurales de baculovirus se distribuyen de

forma polarizada en el virus, mientras que otras se distribuyen de forma homogénea a lo largo del virus.

Para lograr observar proteínas estructurales mediante STORM, hemos realizado el marcaje de la proteína llamada E25 con una proteína verde fluorescente (EGFP). E25 es una proteína de la que se sabe muy poco; sin embargo, con STORM hemos podido mapear su distribución a lo largo del virus y comenzar a sugerir posibles funciones con base en esta distribución. Además, podemos contrastar su distribución con proteínas de localización y función conocida, como es el caso de la proteína GP64, una proteína que participa activamente en los mecanismos de infección de la célula hospedera y que es bien conocida por tener una distribución polarizada en el baculovirus. Con la técnica de STORM hemos corroborado observaciones previas donde mediante microscopía electrónica (TEM) se había demostrado que la proteína GP64 se localizaba en un polo del baculovirus. Ésta es la primera vez que se puede observar mediante microscopía de luz (en este caso STORM) la distribución polarizada de GP64 ([Figura 3](#) y [Video 3](#)).

Estos descubrimientos no sólo profundizan nuestro conocimiento sobre la biología de los baculovirus, sino que también tienen implicaciones para el diseño de nuevas herramientas biotecnológicas. Comprender la organización nanoscópica de las proteínas en los baculovirus puede ayudar a mejorar su eficiencia como plataformas para la producción de proteínas recombinantes y el desarrollo de nuevas terapias basadas en esta tecnología.

Nuestra investigación destaca la importancia de la microscopía de superresolución en la biología de virus y abre nuevas avenidas para el desarrollo de

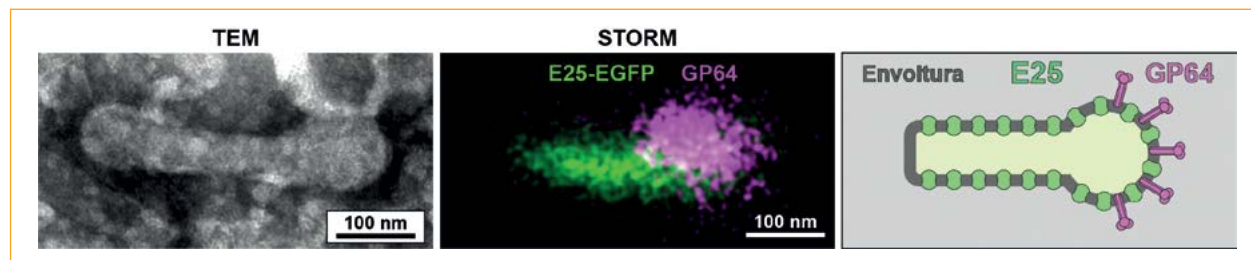


Figura 3. La microscopía de superresolución STORM permite mapear la distribución nanoscópica de proteínas estructurales en partículas individuales de baculovirus. En este caso particular se muestra la distribución polarizada de GP64, así como la distribución homogénea de E25-EGFP. El dibujo de la derecha muestra el modelo y representa la distribución de estas dos proteínas en baculovirus individuales.

aplicaciones biotecnológicas basadas en baculovirus. Estamos entusiasmados con los futuros avances que estos hallazgos podrían desencadenar en el campo de la biotecnología y la virología. A medida que la tecnología avanza, sigue prometiendo revelar nuevas perspectivas sobre estos enigmáticos y poderosos agentes infecciosos, ahora visibles gracias a la microscopía de superresolución y, en particular, a los avances en la manipulación de la luz y de superresolución.

Daniel Martínez Flores

Instituto de Fisiología Celular, UNAM.
danielciencias14@gmail.com

Karla Yarentzi Contreras de la Torre

Instituto de Fisiología Celular, UNAM.
karlaycontreras@ciencias.unam.mx

Luis Alfonso Vaca Domínguez

Instituto de Fisiología Celular, UNAM.
lvaca@ifc.unam.mx

Referencias específicas

- Buttler, C. A., N. Pezeshkian, M. V. Fernández, J. Aaron, S. Norman, E. O. Freed *et al.* (2018), “[Single molecule fate of HIV-1 envelope reveals late-stage viral lattice incorporation](#)”, *Nature Communications*, 9(1):1861.
- Ivanowski, D. (1892), “[Concerning the mosaic disease of the tobacco plant](#)”, *Phytopathological Classics*, 7, St. Paul, MN, American Phytopathological Society.
- Jacquemet, G., A. F. Carisey, H. Hamidi, R. Henriques y C. Leterrier (2020), “[The cell biologist's guide to super-resolution microscopy](#)”, *Journal of Cell Science*, 133(11): jcs240713.
- Kausche, G. A., E. Pfankuch y H. Ruska (1939), “[Sichtbarmachung von pflanzlichem Virus im Übermikroskop](#)”, *Naturwissenschaften*, 27(18):292-299.
- Laine, R. F., A. Albecka, S. van de Linde, E. J. Rees, C. M. Crump y C. F. Kaminski (2015), “[Structural analysis of herpes simplex virus by optical super-resolution imaging](#)”, *Nature Communications*, 6(1):5980.
- McMahon, A., R. Andrews, D. Groves, S. V. Ghani, T. Cordes *et al.* (2023), “[High-throughput super-resolution analysis of influenza virus pleomorphism reveals insights into viral spatial organization](#)”, *PLOS Pathogens*, 19(6):e1011484.
- Stanley, W. M. (1935), “[Isolation of a crystalline protein possessing the properties of tobacco-mosaic virus](#)”, *Science*, 81(2113):644-645.
- Xeros, N. (1952), “Cytoplasmic polyhedral virus diseases”, *Nature*, 170:1073. Disponible en: <https://doi.org/10.1038/1701073a0>.

Lecturas recomendadas

- Aylward, F. y M. Moniruzzaman (2022), “Viral complexity”, *Biomolecules*, 12(8):1-19. Disponible en: <https://doi.org/10.3390/biom12081061>.
- Rohrmann, G. F. (2019), *Baculovirus Molecular Biology* [en línea], 4.ª ed., Bethesda (Maryland), EUA, National Center for Biotechnology Information. Disponible en: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK543458/>, consultado el 13 de febrero de 2026.
- Vázquez, G. y O. Echeverría (2000), *Introducción a la microscopía electrónica aplicada a las ciencias biológicas*, México, Fondo de Cultura Económica.

Cristian Felipe Cruz García y Luis Rodríguez Fernández

Armonía a escala nanométrica

Desde ondas, rayas o puntos, la formación de patrones superficiales es un fenómeno bastante familiar en el mundo natural a simple vista. ¿Será que este mismo fenómeno ocurre en escalas muy pequeñas, como la nanométrica? La respuesta a esta pregunta es sí. En este trabajo se presenta y describe la formación de nanopatrones superficiales inducidos por irradiación iónica, así como sus posibles aplicaciones dentro de la industria de la nanotecnología.

Introducción

Todos alguna vez hemos visto las dunas que se forman sobre las extensas arenas del desierto. Nos hemos maravillado al observar las manchas o rayas sobre la piel de ciertos animales, como los tigres o jaguares, o nos ha sorprendido la forma hexagonal de los panales de abejas. Estas imágenes, presentes en contextos muy distintos, representan el mismo fenómeno: la formación de patrones en superficies sólidas; patrones que, en contraste con la abrumadora diversidad del mundo natural, toman siempre un limitado número de motivos básicos (ondas, rayas, puntos, hexágonos, etc.), confiriendo armonía y belleza al mundo natural.

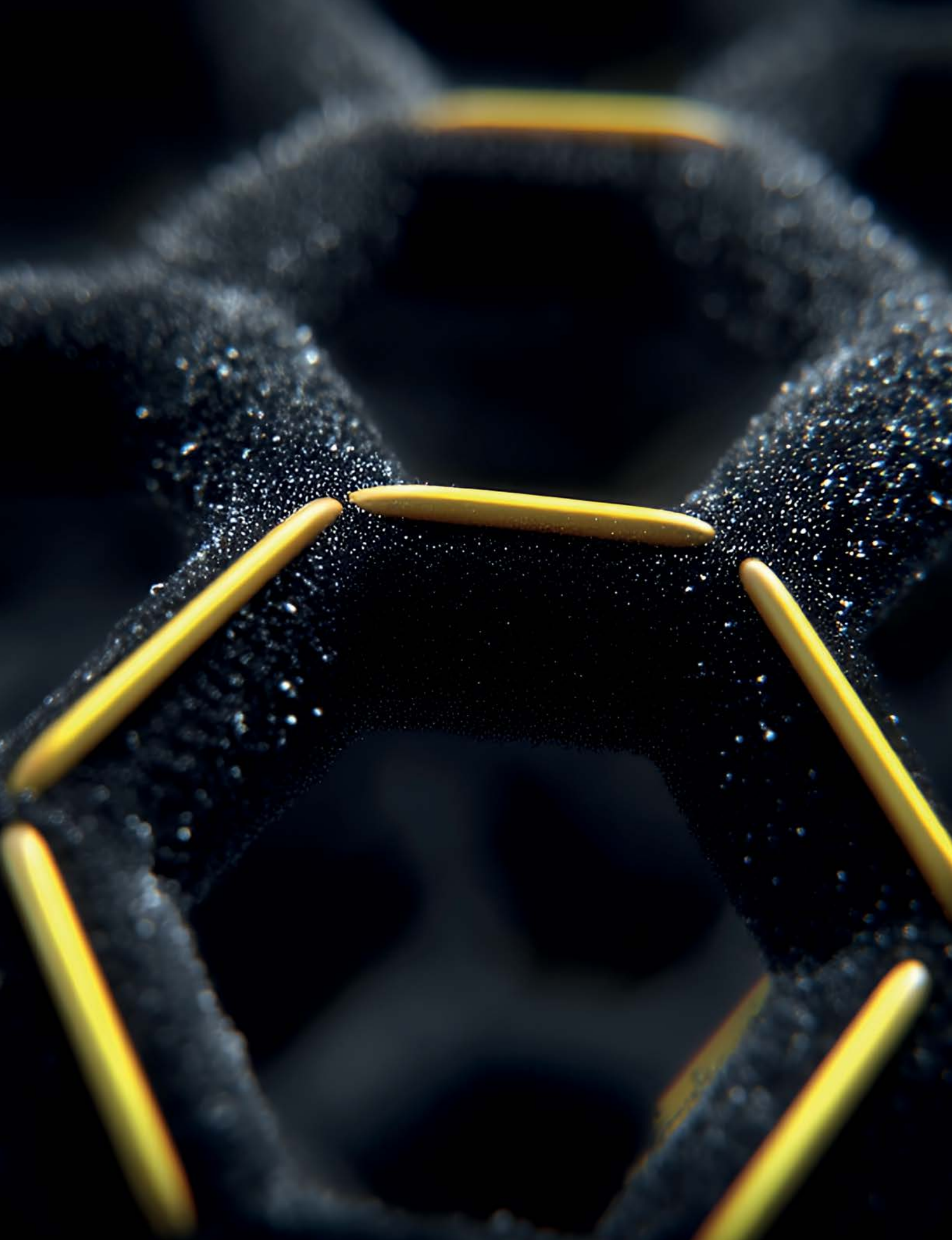
Los ejemplos mencionados corresponden a la formación de patrones macroscópicos —es decir, que pueden observarse a simple vista—, pero uno podría preguntarse si este fenómeno también ocurre en escalas mucho más pequeñas, como la **nanométrica**. La respuesta a esta pregunta no sólo es de interés en la investigación científica básica, sino que podría tener gran relevancia en la revolución nanotecnológica de nuestra época. Hoy en día, gracias a la invención de microscopios más potentes que el óptico —de los cuales hablamos más adelante—, se sabe que la respuesta buscada es un rotundo sí. En efecto, se ha encontrado que una gran variedad de superficies sólidas irradiadas con **iones energéticos** exhiben *nanopatrones* muy similares a las dunas del desierto, a los panales de las abejas o a las rayas en la piel de ciertos felinos. Lo cual indica que, incluso en el escenario de lo muy pequeño, donde la naturaleza muchas veces se comporta de manera diferente a la habitual, el mundo natural guarda la misma armonía y belleza que en la escala macroscópica.

Escala nanométrica

Un nanómetro resulta de dividir un milímetro en mil partes iguales y luego tomar una de estas partes para volver a dividirla en mil partes iguales.

Ion energético

Un ion es un átomo cargado eléctricamente que, al desplazarse a altas velocidades, adquiere una elevada energía cinética.



Comencemos por el principio y por partes

Hemos mencionado que el proceso de irradiación iónica conduce a la formación de nanopatrones superficiales; por tanto, para comprender este fenómeno es importante platicar un poco en qué consiste este proceso. La irradiación iónica de una superficie —que puede ser metálica, un cristal, un vidrio, etc.— consiste esencialmente en hacer incidir sobre ella iones de cierto elemento químico (como oro, cobre, xenón, argón, etc.) y con determinada energía (específicamente cinética, que es la energía que tiene un cuerpo en virtud de su movimiento). En la mayoría de los casos, los iones energéticos son producidos por máquinas bastante complejas llamadas aceleradores, que, en esencia, utilizan la carga eléctrica de los iones para acelerarlos; es decir, para darles energía de tipo cinética. Normalmente, la energía alcanzada por los iones es de unos pocos hasta millones de electronvoltios. El

Electronvoltio (eV)

Energía que adquiere un electrón al ser acelerado por una diferencia de potencial igual a 1 V. Para tener una referencia de su valor, nótese que la energía que se libera al caer una moneda de 2 g desde una altura de 1 cm es del orden de 10^{15} (1 seguido de 15 ceros) eV.

electronvoltio (eV) es una unidad de energía usada en física de partículas. En la escala macroscópica, 1 eV es una cantidad de energía extremadamente pequeña. Por su parte, en el **Recuadro 1** se explica un poco más a fondo sobre el funcionamiento de un tipo particular de acelerador conocido con el nombre de Peletrón.

Después de la irradiación iónica, para poder ver los nanopatrones formados en la superficie, no basta con un microscopio óptico, sino que es necesario usar otro tipo de microscopios más potentes, entre ellos el microscopio electrónico de barrido y de fuerza atómica. En un microscopio electrónico de barrido, la superficie se ilumina o barre no con luz visible, como en el microscopio óptico, sino con un haz compuesto de electrones energéticos. Cuando los electrones barren la superficie, algunos rebotan desde ella, perdiendo energía durante el proceso. La información de este cambio de energía, el número de electrones rebotados y su posición son datos recopilados por un detector dentro del microscopio que se envían a una computadora para formar una imagen bidimensional de la superficie. Debido al tamaño muy pequeño de los electrones (del orden atómico), las imágenes obtenidas por este microscopio alcanzan una resolución de entre 2-20 nanó-

metros (la resolución del microscopio óptico es de hasta 200 nm).

Por su parte, en el microscopio de fuerza atómica, la superficie no se barre con un haz de luz o de electrones, sino con una sonda en forma de punta que se pone en contacto con ella. Durante el barrido aparecen fuerzas (electrostáticas, químicas, de tensión superficial, etc.) entre los átomos de la sonda y los de la superficie, que son medidas por un sistema que combina un láser y un detector tipo fotodiodo. El detector fotodiodo convierte la medición de estas fuerzas en una señal eléctrica, la cual es procesada por una computadora para reconstruir la topografía de la superficie a escala nanométrica. A diferencia

Recuadro 1.

El Peletrón es un equipo con el que se pueden acelerar iones de prácticamente cualquier elemento de la tabla periódica a energías mayores a los 2 MeV (dos millones de eV). En este acelerador, en particular, los iones se obtienen a partir de la erosión iónica de un sólido compuesto del elemento que se quiere trabajar. Después de su producción, los iones (que son negativos al hacerlos interactuar con un vapor de cesio) se encaminan al acelerador mediante un electroimán inyector y son acelerados una primera vez en el centro del acelerador por un alto voltaje. En el acelerador Peletrón, este alto voltaje es producido por el transporte de carga eléctrica desde una terminal positiva hacia el centro del acelerador mediante cadenas de metal y plástico. Además de ser acelerados en el centro del acelerador, los iones interactúan con una nube de nitrógeno que arranca electrones de los iones, convirtiéndolos en iones positivos. Gracias a este intercambio de carga negativa a positiva, los iones son ahora empujados por el alto voltaje, dándoles una segunda aceleración y aumentando su energía hasta alcanzar la deseada. Finalmente, los iones son dirigidos hacia la superficie a irradiar mediante el uso de electroimanes selectores de masa, carga y energía iónica.

Microscopios no ópticos

Instrumentos que, a diferencia de los microscopios ópticos convencionales, no utilizan luz visible ni lentes de cristal para formar imágenes amplificadas de un objeto; en su lugar, emplean haces de electrones o sondas con formas de punta para alcanzar resoluciones de hasta unos pocos nanómetros.



del microscopio electrónico de barrido, el microscopio de fuerza atómica nos permite obtener información sobre la altura de la superficie hasta con una resolución de 1 nanómetro.

■ (Nano) ondas, (nano) rayas, (nano) panal...

■ Como dice la famosa frase, “¡Ver para creer!” Pasemos, por tanto, a ilustrar la formación de nanopatrones en casos concretos. En la **Figura 1a**, se muestra una imagen de microscopía de fuerza atómica para una superficie de vidrio irradiada con iones de silicio de energía de 1 MeV (un millón de eV). Como se puede observar, en la superficie se forma un nanopatrón de rayas muy similar al que se observa sobre la piel de ciertos gatos domésticos (**Figura 1b**). La altura del patrón es de hasta 2.16 micrómetros (aprox. 2100 nanómetros). Ahora bien, conforme aumenta la duración del proceso de irradiación iónica –lo cual se traduce en que un mayor número de

iones llegan a la superficie–, la superficie del vidrio exhibe ahora un nanopatrón parecido a un panal de abejas (**Figura 1d**), según observamos en la correspondiente imagen de microscopía electrónica de barrido (**Figura 1c**). El ancho o diámetro de cada celda del panal es de hasta 8000 nanómetros.

Por otro lado, la imagen de microscopía de fuerza atómica en la **Figura 1e** muestra que, sobre la superficie de dióxido de silicio (SiO_2) irradiado con iones de oro de energía igual a 1.8 MeV (un millón ochocientos mil eV), se forma un nanopatrón ondulado similar al de las dunas del desierto (**Figura 1f**). En todos estos casos, ¡los patrones nanométricos superficiales inducidos por irradiación iónica toman las mismas formas que los patrones superficiales macroscópicos! Además, la formación de los nanopatrones superficiales tiene una dependencia tanto de los parámetros de la irradiación iónica (tipo y energía de los iones, duración del proceso de irradiación iónica, etc.) como del tipo de super-

ficie (vidrio o dióxido de silicio). La investigación científica actual sobre este tema busca comprender más profundamente la relación de dependencia anterior.

Los mecanismos físicos detrás de la formación de nanopatrones por irradiación iónica

Pero, ¿cómo es que se forman estos nanopatrones superficiales por irradiación iónica? Pues bien, cuan-

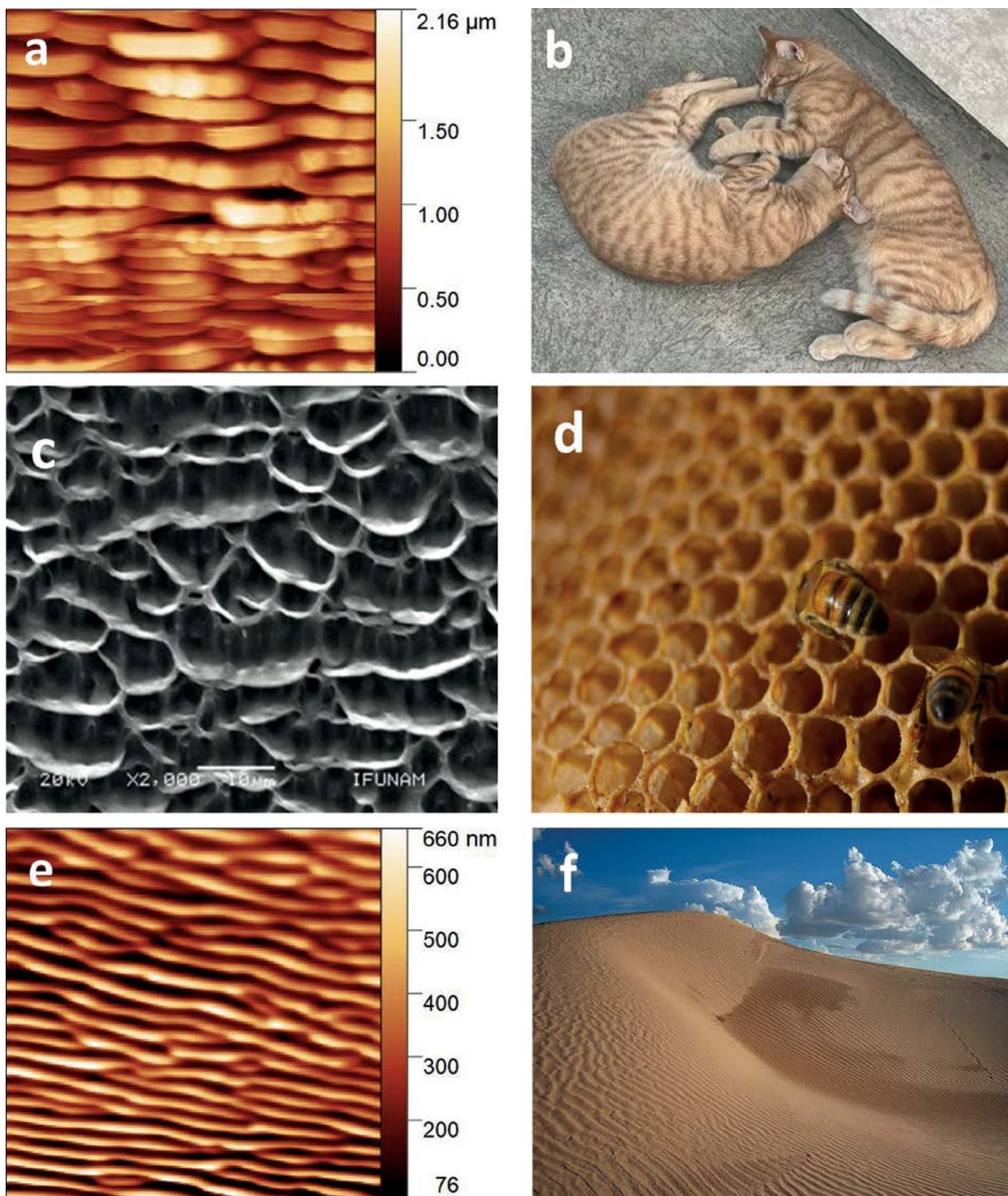


Figura 1. Formación de nanopatrones en superficies de vidrio y dióxido de silicio (SiO_2) irradiadas con iones de silicio y oro, respectivamente (1a, 1c y 1e). Es innegable el parecido con los patrones macroscópicos (1b, 1d y 1f). Créditos: figura 1d, Peter S^hanks; figura 1f, Felix García (ambas imágenes: CC BY 2.0).

do los iones llegan al material objetivo, transfieren gran parte de su energía a los átomos de éste mediante una serie de colisiones. Una imagen bastante conocida que nos puede ayudar a entender lo anterior es la jugada de saque en el billar: la bola blanca que inicia el saque sería el ion incidente, mientras las demás bolas representan los átomos del material objetivo. Por otro lado, debido a que los átomos superficiales están menos enlazados al material que si estuvieran en el interior del mismo –a causa de que arriba de ellos no hay átomo alguno que los enlace–, es posible que, al colisionar con los iones, algunos de ellos sean expulsados desde la superficie del material, es decir, sean erosionados superficialmente. De acuerdo con las teorías físicas más aceptadas, la velocidad con que cierta parte de la superficie es erosionada es proporcional a la energía ahí depositada por todos los iones incidentes.

Ahora bien, ¿qué papel tiene la erosión iónica sobre la forma que toma la superficie? Microscópicamente, todas las superficies son irregulares; es decir, están repletas de depresiones y protuberancias. Durante la irradiación iónica, y por razones meramente geométricas, resulta que la energía depositada por todos los iones es mayor en estas depresiones que en las protuberancias, lo cual implica –de acuerdo con lo dicho arriba– que las primeras se erosionan más rápido que la segundas. Esto significa, en otras palabras, que durante el proceso de irradiación las protuberancias superficiales, en comparación con las depresiones, van a crecer en altura sin parar.

Sin embargo, esto no es lo que pasa realmente porque es *energéticamente costoso*. En el mundo natural todo sistema siempre tomará la configuración que posea la menor energía posible, y una superficie cuyas protuberancias crecen en altura sin parar, sin duda, no cumple con este principio –por esta misma razón los árboles no pueden crecer indefinidamente ni podemos construir rascacielos tan altos como queramos–. Por lo tanto, para que la superficie llegue a un estado energético de mínima energía, debe aparecer un mecanismo que contrarreste el efecto anterior de la erosión superficial; es decir, que limite el crecimiento en altura de las protuberancias superficiales durante la irradiación iónica. Tal mecanismo es el que

corresponde al transporte de materia (masa) desde las protuberancias hacia las depresiones debido al calentamiento de la superficie durante la irradiación iónica (parte de la energía transferida desde los iones hacia los átomos superficiales se da en forma de calor).

Así, mientras el mecanismo de erosión iónica induce el incremento en altura de las protuberancias superficiales, el transporte de masa descrito arriba achataría las protuberancias más altas, manteniendo ambos mecanismos, durante la irradiación iónica, con una especie de equilibrio entre sí. Los nanopatrones superficiales son el resultado de este equilibrio, de esta armonía entre dos mecanismos atómicos que compiten uno con otro para lograr, en última instancia, que la superficie irradiada se encuentre en el estado de menor energía. Y la razón de que los nanopatrones superficiales inducidos por irradiación iónica sean similares a los patrones superficiales macroscópicos es que, en ambos casos, opera el mismo principio de conservación de la energía.

¿Y esto cómo podría aplicarse?

Los nanopatrones superficiales formados por irradiación iónica no sólo son fascinantes por sí mismos, sino que podrían aplicarse para mejorar el rendimiento de ciertos dispositivos que actualmente tienen una gran relevancia tecnológica. Por ejemplo, se ha encontrado que la superficie ondulada que se forma en un vidrio irradiado con argón puede mejorar la eficiencia de conversión de energía luminosa en energía eléctrica, lo cual constituye la principal preocupación en la fabricación de celdas solares. La mejora en la eficiencia de conversión de energía luminosa en energía eléctrica por una superficie ondulada se debe a que la luz solar puede quedar *atrapada* dentro de los valles superficiales de dicha superficie, permitiendo que –en comparación con lo que sucede con una superficie plana– la fracción de luz solar absorbida por la celda (que después se transforma en energía eléctrica) sea mayor.

Los nanopatrones superficiales formados por irradiación iónica también podrían aplicarse para alargar la vida útil de los implantes médicos, ya que se ha encontrado que la presencia de un patrón de ondas

o rayas superficiales mejora significativamente las propiedades de osteointegración (proceso biológico donde una superficie sólida se integra al tejido óseo) y anticorrosivas de materiales comúnmente usados para implantes, tales como el acero inoxidable o el titanio. En efecto, en comparación con una superficie plana, la forma ondulada o de rayas de la superficie resulta en un aumento del área efectiva de conexión entre el tejido óseo y el implante, lo que tiene como consecuencia una mejora del proceso de osteointegración.

Además de lo anterior, la irradiación con iones sobre superficies semiconductoras (como la del silicio) puede conducir a la formación de un patrón de nanoagujeros, los cuales se comportan como *puntos*

cuánticos. Específicamente, un punto cuántico se puede entender como un pozo de potencial (con tamaño de pocos nanómetros) donde los electrones del material quedan confinados. Debido a este confinamiento, estas nanoestructuras se rigen por las leyes de la mecánica cuántica, lo que les confiere propiedades optoelectrónicas excepcionales para el desarrollo de sensores de alta precisión y fuentes de luz láser más eficientes. Cabe mencionar que las investigaciones sobre estos puntos cuánticos fueron merecedoras del Premio Nobel de Química en el año 2023.

Finalmente, es posible alinear preferencialmente nanotubos de ADN sobre nanopatrones ondulados en superficies de silicio, lo que permitiría obtener una



disposición ordenada de nanocables funcionales basados en esta biomolécula. Esto último es especialmente relevante para la fabricación de sensores de ADN.

Como es evidente en los ejemplos anteriores, la formación de nanopatrones superficiales por irradiación iónica promete ser una técnica poderosa para la fabricación de superficies funcionales dentro de varias industrias emergentes. ¿En qué otro tipo de aplicaciones se puede pensar? La respuesta depende tanto de nuestra imaginación como de lo bien que sepamos formar patrones superficiales por irradiación iónica. Por lo tanto, es necesario seguir investigando este fenómeno para despertar

nuestra creatividad y enfrentar los desafíos tecnológicos actuales.

Cristian Felipe Cruz García

Instituto de Física de la Universidad Nacional Autónoma de México.

cris-106-fis@ciencias.unam.mx

Luis Rodríguez Fernández

Instituto de Física de la Universidad Nacional Autónoma de México.

luisrf@fisica.unam.mx

La memoria episódica es más que un cúmulo de recuerdos

La memoria episódica es el almacén de nuestros recuerdos personales que permite tener conciencia de nuestro devenir en el tiempo, lo cual es esencial para experimentar quiénes somos. Sin embargo, es un tipo de memoria altamente vulnerable al paso del tiempo. En este artículo revisaremos qué es la memoria episódica, cuáles son sus bases anatómicas y fisiológicas, y cuál es su destino a lo largo de la vida.

Introducción

La memoria episódica es aquella a la que la mayoría de las personas refiere como *memoria*, ya que se trata de los recuerdos personales. No obstante, más de cien años de investigación han permitido distinguir que la memoria no es una entidad única, sino que existen múltiples tipos. A pesar de esta multiplicidad, la memoria episódica es, sin duda, una de las más esenciales para nuestra existencia, ya que sin ella no tendríamos un sentido de identidad ni de continuidad en nuestras vidas. La importancia de la memoria episódica se hace evidente cuando comienza a disminuir, pues las personas pierden control de su vida y de su autonomía. El caso extremo de la pérdida de este tipo de memoria lo experimentan quienes padecen la enfermedad de Alzheimer. Sin embargo, en el presente trabajo abordamos cómo se manifiesta la memoria episódica en individuos sanos, para referirnos a la mayoría en este tema de índole universal.

El origen del concepto de memoria episódica

A finales del siglo XIX, William James propone su teoría dual de la memoria, en la que distinguía entre memoria a corto plazo (primaria), que permitía retener información por segundos, y memoria a largo plazo (secundaria), capaz de retener información por años. Sin embargo, fue hasta mediados del siglo pasado que se demostró mediante un hecho fortuito la existencia de ambos tipos de memoria. Esto ocurrió cuando el paciente HM fue sometido a una cirugía para aliviarlo de ataques epilépticos incontrolables; en la cirugía se removieron varias estructuras del lóbulo temporal medial, entre ellas los dos tercios anteriores del hipocampo. HM nunca



se liberó de sus ataques epilépticos, pero se descubrió que la amnesia se asocia a un tejido específico que había sido removido. HM podía recordar eventos pasados que ocurrieron antes de la operación, pero no podía retener experiencias nuevas; retenía información por periodos breves si mantenía la atención, e incluso podía aprender tareas motoras, aunque no recordaba haber realizado dichas tareas. Por lo tanto, se descubrió que la memoria a largo plazo dependía, en parte, de una estructura cerebral llamada hipocampo.

Tiempo después, Endel Tulving (1972) fue más allá al proponer que existían dos tipos de memoria a largo plazo, la memoria semántica y la episódica. El término *memoria semántica* ya había sido introducido por M. Ross Quillian en su tesis doctoral para referirse al almacén del lenguaje y de nuestros conocimientos del mundo; por ejemplo, el conocimiento de los nombres y características de las cuatro estaciones del año, o que la capital de Austria es Viena. Tulving observó que la memoria semántica excluía los recuerdos autobiográficos, por lo que propuso el término *memoria episódica* como el almacén de los eventos personales, los cuales invariablemente ocurren en un momento y lugar determinados, por lo que ambos contextos (tiempo y espacio) acompañan dichos recuerdos. En cambio, la memoria semántica carece del contexto en el que la información fue aprendida.

La memoria episódica sólo ocurre en presencia de tres condiciones: la cronestesia, la conciencia auto-noética y el ser, los cuales se explican a continuación. El desarrollo de estos conceptos a través de los años surge del paciente amnésico NN, quien después de un accidente automovilístico era incapaz de recordar eventos pasados, retener nuevas experiencias y planear su futuro. Esta condición fue descrita por Tulving (1985) como vivir permanentemente en el presente. La *cronestesia* es la capacidad de experimentar el tiempo subjetivo que nos permite viajar mentalmente hacia el pasado, lo que rompe la regla física de que el tiempo sólo fluye en una dirección, del pasado al futuro. Un ejemplo de ello es revivir mentalmente un viaje que realizamos. La *conciencia auto-noética* es la autoconciencia temporal que nos

proporciona el sentido de existir en un tiempo subjetivo que incluye nuestro pasado, presente y futuro personales. La conciencia auto-noética es necesaria para recordar; es decir, sin ella no es posible viajar mentalmente al pasado. Por ejemplo, al recordar un viaje se experimenta que es uno mismo quien vivió ese evento. El *ser o la identidad* se refiere al sentido personal de existir como una entidad única en nuestro tiempo subjetivo. Es el ser el que viaja mentalmente en el tiempo, sin él no hay memoria episódica.

Bases anatómicas y fisiológicas de la memoria episódica

El hipocampo es la región cerebral más relevante que subyace a la memoria episódica, pero no funciona de manera aislada, sino en colaboración con una extensa red de regiones distribuidas a través de todo el cerebro. El lóbulo temporal medial es la región media del lóbulo temporal que alberga al hipocampo y a las cortezas adyacentes parahipocampal, perirrinal y entorrinal (**Figura 1**). La corteza parahipocampal recibe su nombre por su proximidad con el hipocampo, ya que bordea al hipocampo en su parte inferior. Las cortezas perirrinal y entorrinal se ubican alrededor y dentro, respectivamente, del surco rinal, que separa estas cortezas del hipocampo. Se ha propuesto que las áreas de asociación que integran la información recibida por nuestros sentidos transmite señales sobre el evento de una experiencia episódica a la corteza perirrinal y ésta, a través del área lateral entorrinal, hace llegar dicha información al hipocampo (Dickerson y Eichenbaum, 2010). A su vez, las áreas de asociación envían información sobre el contexto espacial y temporal en que ocurren los eventos a la corteza parahipocampal, la cual, a través del área medial entorrinal, transmite dicha información al hipocampo. Finalmente, el hipocampo integra el evento y su contexto en una representación episódica.

Posteriormente, cuando deseamos recuperar el recuerdo, ocurre lo opuesto. Una clave que puede provenir de un estímulo externo o generarse mentalmente promueve la recuperación del recuerdo,

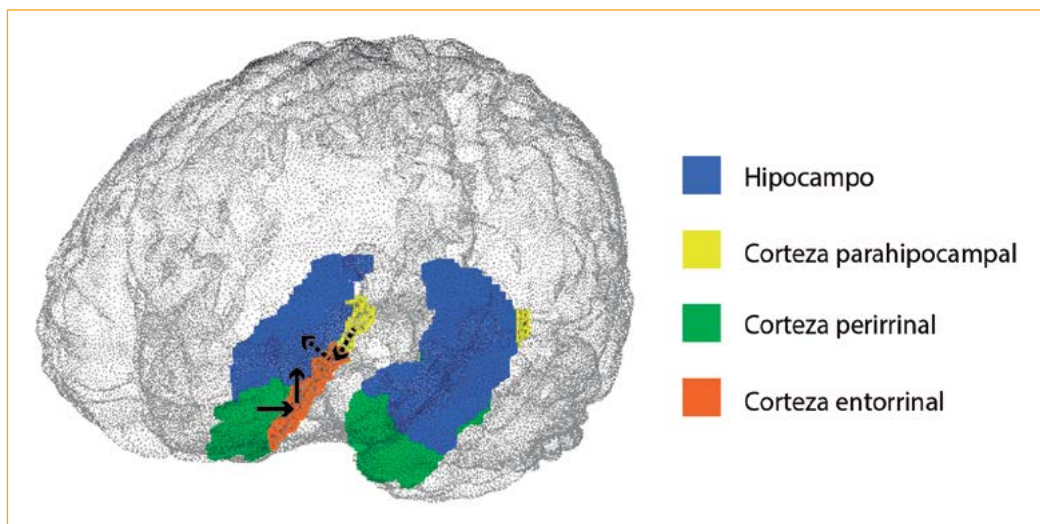


Figura 1. Regiones en el lóbulo temporal medial involucradas en la memoria episódica. Las flechas continuas indican el curso que sigue la información sobre el evento, y las flechas discontinuas, el curso que sigue la información sobre el contexto espacial y temporal.

que se logrará mediante la regeneración de la representación episódica en el hipocampo y sus cortezas adyacentes, para su ulterior proyección a las cortezas de asociación que originalmente procesaron el evento y su contexto. Es posible que a través de múltiples reactivaciones de los recuerdos, por medio del hipocampo y las áreas de asociación, se produzca un gradual desplazamiento de los recuerdos hacia áreas corticales. La evidencia más fuerte a favor de esta propuesta es el hecho de que los pacientes amnésicos no pueden recordar hechos recientes, pero son capaces de recordar hechos remotos, lo que demuestra que estos recuerdos no residen en las regiones del lóbulo temporal medial, sino que se encuentran almacenados en regiones cerebrales especializadas en tipos de recuerdos específicos.

Se han desarrollado numerosos estudios con distintas aproximaciones metodológicas para establecer cuáles son estas regiones corticales que contribuyen a la memoria episódica. Entre ellos, destacan los estudios de resonancia magnética funcional, que permiten identificar regiones cerebrales activas en el momento mismo en que las personas realizan una tarea. Esta técnica registra el flujo de sangre oxigenada requerido por las neuronas activas. Se han identificado numerosas regiones cerebrales involucradas en la memoria episódica que varían en función de la tarea, por lo que aún no existe un consenso. Sin

embargo, entre estas regiones destaca la relevancia de la corteza prefrontal para la formación de recuerdos episódicos y para su recuperación. Durante la formación de memorias la corteza prefrontal —que tiene conexiones directas con el hipocampo— resuelve posibles conflictos entre nuevas memorias y memorias ya existentes que comparten información en común. Asimismo, durante la recuperación de recuerdos la corteza prefrontal selecciona el recuerdo relevante suprimiendo la recuperación de memorias irrelevantes.

El destino de la memoria episódica a lo largo de la vida

La memoria episódica se desarrolla gradualmente en la niñez, y en la edad adulta declina también gradualmente. A pesar de que existe controversia, la mayoría de las investigaciones demuestran que el recuerdo de eventos específicos ocurre aproximadamente a los 3 años de edad; sin embargo, la capacidad de recordar el contexto en que ocurrió el evento inicia aproximadamente a los 5 años, aunque seguirá desarrollándose. Estas edades coinciden con la madurez del hipocampo —que se alcanza entre los 3 y 5 años de edad— y con la amnesia infantil, que se refiere al hecho de que la mayoría de las personas no puede recordar eventos que ocurrieron antes de los 3 o 4 años de edad.

Los niños son capaces de aprender el lenguaje y adquirir numerosos conocimientos desde muy temprana edad a través de la memoria semántica. Esto es posible porque se trata de información que puede ser aprendida mediante conciencia noética, que se refiere a la capacidad de tener conciencia de la información, operar sobre ella, incluso en ausencia de ella, pero carece de contexto. Por ejemplo, conocer el significado de la palabra “océano” sin recordar cuándo ocurrió el aprendizaje de esa palabra. Ulrick Neisser describe cómo un niño pequeño puede ser consciente de un evento u objeto cuando lo percibe, pero no es consciente que es él, una persona con una historia e identidad propias, quien está percibiendo el evento u objeto. En cambio, la memoria episódica sólo emergerá cuando se desarrolle la conciencia autoética y el sentido del ser existiendo en un tiempo subjetivo.

Del mismo modo, existe controversia sobre cuándo comienza a disminuir la memoria episódica en la vida adulta; lo cual se debe, en parte, a los diferentes métodos que se han elegido para responder a esta pregunta. La mayoría de los estudios que han evaluado la memoria episódica a lo largo de la vida adulta han empleado tareas en las que los participantes deben recordar diferentes tipos de eventos, como palabras, imágenes, rostros o historias. Sin embargo, este procedimiento no garantiza que las personas estén recuperando el contexto en el que originalmente experimentaron los eventos, por lo que la memoria episódica sólo es evaluada parcialmente. Por ello, surgieron tareas que les solicitan a los participantes la recuperación no sólo del evento en sí mismo, sino también del contexto en que éste ocurrió. Este procedimiento garantiza una evaluación objetiva de la memoria episódica porque el contexto acompaña todas nuestras experiencias.

No obstante, tampoco existe un consenso en este tipo de estudios, ya que los procedimientos también varían. Por ejemplo, en un estudio en el que se les pidió a las personas que recorrieran una exhibición y que identificaran al final el lugar en el que se encontraban ciertos objetos exhibidos, se concluyó que el declive de la memoria episódica iniciaba en la década de los sesenta. En cambio, en otro estudio en el que los participantes debían recordar si acciones sim-

ples descritas en tarjetas las habían realizado o sólo las habían leído, se observó que la memoria episódica empezaba a disminuir en la década de los cincuenta.

En el Laboratorio de Neurocognición de la Facultad de Psicología de la Universidad Nacional Autónoma de México abordamos esta crucial pregunta en una muestra de 1 557 personas de entre 21 y 80 años de edad (Cansino y cols., 2013). En una fase inicial, los participantes observaron una serie de imágenes a color de objetos conocidos que se presentaban al azar en uno de los cuadrantes de la pantalla (**Figura 2**). En esta fase los participantes sólo debían indicar si se trataba de una imagen que representaba un objeto natural o artificial. Posteriormente, en una segunda fase, las imágenes se presentaron al centro de la pantalla mezcladas con imágenes nuevas y las personas debían identificar si la imagen había sido presentada previamente o era nueva. Si la imagen había sido vista previamente, debían indicar en qué cuadrante de la pantalla se había presentado. Este procedimiento permitió evaluar la capacidad para reconocer el evento y la habilidad para recuperar el contexto espacial en el que el evento ocurrió. El contexto espacial invariablemente acompaña todas nuestras experiencias y, por lo tanto, su recuperación representa una clara evidencia de la integridad funcional de la memoria episódica.

Mediante este procedimiento fue posible identificar que la capacidad para recuperar el contexto en el que ocurren nuestras experiencias disminuye linealmente desde la década de los veinte a una velocidad de -0.6% por año (**Figura 2**). Este descenso en la exactitud para recuperar el contexto equivale a olvidar el lugar en que ocurrió una experiencia previa cada dos años. En cambio, la capacidad para reconocer el evento (imagen) sólo disminuye 14% a lo largo de las seis décadas. Esta diferencia en la capacidad para recuperar el contexto y el evento indica claramente que sólo la primera disminuye drásticamente a lo largo de la vida adulta.

La inhabilidad para recuperar el contexto de las experiencias personales conforme avanza la edad no sólo empobrece nuestros recuerdos porque empiezan a carecer de detalles, sino que puede incidir en la autonomía de las personas. Por ejemplo, podríamos trasladarnos a un lugar equivocado si recupe-

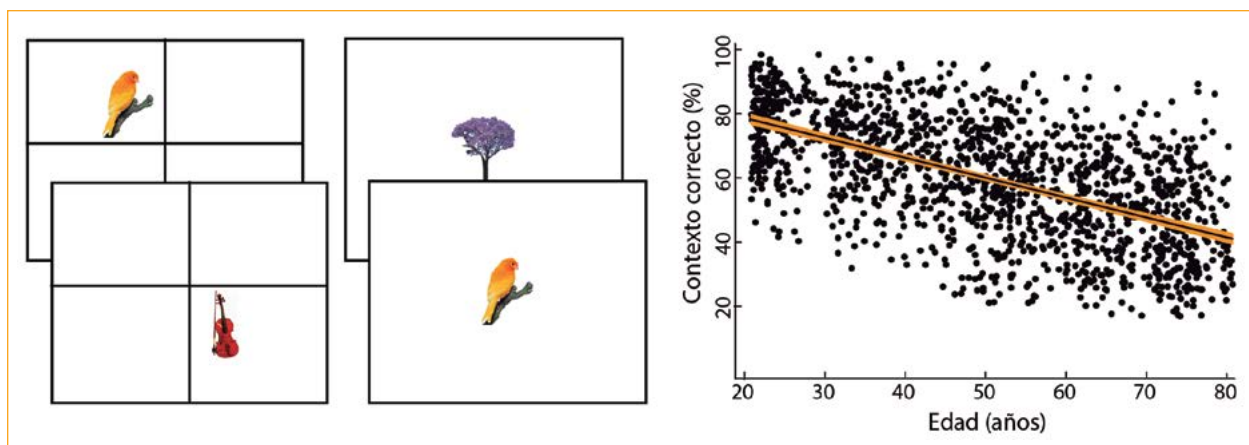


Figura 2. Del lado izquierdo se muestra la pantalla dividida en cuadrantes durante la primera fase de la tarea, y sin cuadrantes en la segunda fase, así como ejemplos de la manera en que se presentaron las imágenes en cada fase. Del lado derecho se muestra la exactitud de la memoria de contexto en función de la edad en una muestra de 1 557 personas de entre 21 y 80 años. Fuente: Cansino y cols., 2018. (CC-BY 4.0.)

ramos erróneamente el lugar al que deseamos regresar. Del mismo modo, podríamos comunicar el orden equivocado en el que ocurrieron ciertos eventos. En el ámbito laboral o en la vida cotidiana, realizar una tarea puede implicar un mayor esfuerzo si hemos olvidado cómo se realizó originalmente. En el ámbito social, podemos olvidar con quién hemos compartido cierta información, por lo que es posible que repitamos la misma información una y otra vez con la misma persona, lo que podría generar un estigma o rechazo hacia nuestra persona por parte de los demás.

El declive de la memoria episódica en la vida adulta es un fenómeno universal que ocurre como consecuencia de la gradual disminución de las funciones cerebrales durante el envejecimiento. Día con día se realiza investigación en la búsqueda de mitigar el deterioro de la memoria episódica. En particular, la memoria episódica se beneficia del repaso mental de nuestras experiencias para fortalecer su codifica-

ción. En cambio, la recuperación de los eventos episódicos requiere el empleo de claves adecuadas que propicien el recuerdo de la experiencia. Este proceso implica una búsqueda y esfuerzo mental interno sin recurrir a ayuda externa, como preguntarle a alguien sobre el evento. Sin embargo, quizá la solución más inmediata y efectiva fue propuesta hace ya mucho tiempo por Cicerón: *Memoria minuitur nisi eam exerceas* (la memoria disminuye si no se ejercita).

Agradecimiento

Este trabajo recibió apoyo de la Universidad Nacional Autónoma de México a través del proyecto DGAPA PAPIIT 1G300124.

Selene Cansino

Laboratorio de Neurocognición, Facultad de Psicología, UNAM.
selene@unam.mx

Lecturas recomendadas

- Cansino, S. et al. (2013), "The rate of source memory decline across the adult life span", *Developmental Psychology*, 49(5):973-985. Disponible en: <https://doi.org/10.1037/a0028894>.
- Cansino, S. et al. (2018), "Mediators of episodic memory decay across the adult life span", *Scientific Reports*, 8:2610. Disponible en: <https://doi.org/10.1038/s41598-018-20884-2>.
- Dickerson, B. C. y H. Eichenbaum (2010), "The episodic memory system: neurocircuitry and disorders", *Neu-*

ropsychopharmacology, 35(1):86-104. Disponible en: <https://doi.org/10.1038/npp.2009.126>.

- Tulving, E. (1972), "Episodic and semantic memory", en E. Tulving y W. Donaldson (eds.), *Organization of Memory*, Nueva York y Londres, Academic Press, pp. 381-403.
- Tulving, E. (1985), "Memory and consciousness", *Canadian Psychology*, 26(1):1-12. Disponible en: http://www.esalq.usp.br/lepse/imgs/conteudo_thumb/Memory-and-Consciousness.pdf, consultado el 28 de enero de 2026.

José Emilio Quiroz Ibarra y Jorge Ángel González Ordiano

¿Todo es medible?

La métrica de las cosas

Las métricas o medidas sobre los objetos que integran un sistema son herramientas que se han convertido en elementos cuantitativos críticos debido a que demuestran las propiedades y condiciones operativas. La selección, veracidad, continuidad, almacenamiento y aprovechamiento de las métricas deben ser motivo de reflexión, análisis e interpretación adecuada para la toma de decisiones, la mejora continua y la solución de problemas detectados o pronosticados. El objetivo de este documento es proporcionar una descripción de qué es una métrica, los diferentes tipos de métricas existentes y las pautas generales para su manejo, con el fin de que resulten útiles para el rendimiento de un sistema.

Lo que no se puede medir no se puede mejorar.

LORD KELVIN

Definición de métrica

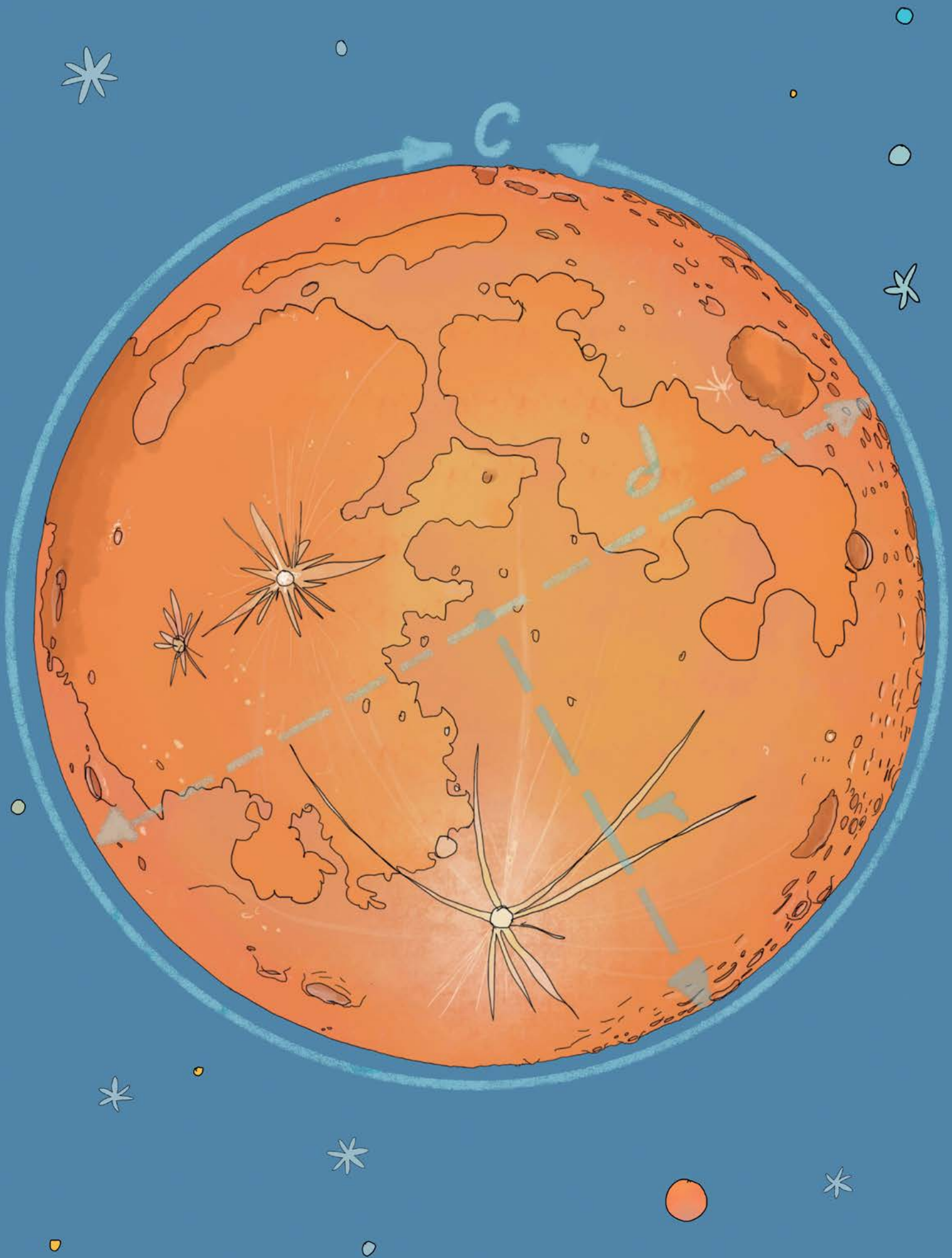
Una de las acepciones de *métrica*, de acuerdo con el *Diccionario de la lengua española*, es “El arte que trata de la medida o estructura de los versos, de sus clases y de las distintas combinaciones que con ellos pueden formarse”.¹ Un sinónimo de esta acepción es el de *prosodia*, “que estudia los rasgos fónicos que afectan a la métrica”.² En el **Recuadro 1** se muestra un poema con métrica; sin embargo, este aspecto no constituye el enfoque principal de este escrito.

Para el manejo de los sistemas, habrá que referirse a “la medida o conjunto de medidas que tienen como propósito la identificación, clasificación, agrupación, control y pronóstico aplicados a un objeto o colección de objetos”.³ En la **Figura 1** se muestra un fragmento de cinta métrica con valores del 0 al 9 e intermedios. Cabe resaltar

¹ *Diccionario de la lengua española*, Real Academia Española [en línea]. En: <https://dle.rae.es/métrico?m=form>.

² *Ibid.* En <https://dle.rae.es/prosodia?m=form>.

³ Adaptado a partir de: <https://www.rib-software.com/en/blogs/kpis-vs-metrics-differences#what-are-metrics?>.



Recuadro 1.

En el silencio de la noche,
la luna brilla con su luz plateada,
iluminando el camino del caminante solitario.

Las estrellas titilan en el cielo,
como diamantes esparcidos en un manto negro,
observando en silencio del paso del tiempo.

El viento susurra entre las hojas de los árboles,
cantando una canción de cuna a la naturaleza,
que se prepara para descansar bajo el manto de la noche.

Fragmento de un poema con métrica.

Fuente: *El arpa del bardo, ensayos poéticos*, Eugenio Martínez Cuende.

que en el caso de la cinta métrica, el término se refiere a que la escala está en metros, aunque su finalidad es también obtener medidas o métricas.

Las métricas pueden no ser únicas para los objetos de un sistema; depende de lo que se quiera hacer con éstas. Asimismo, las métricas son por lo regular un conjunto de medidas que se generan para propósitos establecidos. La intención es que los sistemas o colecciones de objetos similares que contiene un sistema puedan estar en condición de evaluarse y compararse por medio de métricas específicas.

Casos de métricas

A continuación se ejemplifican algunos casos de métricas de los objetos del sistema indicado: los primeros con valores de muestra típicos; más adelante, sólo se mencionan los casos sin valores.

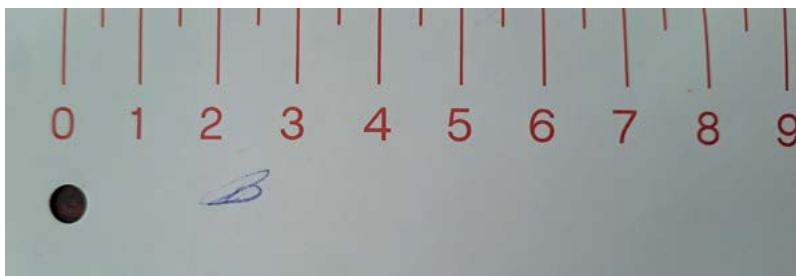


Figura 1. Fotografía que muestra un fragmento de cinta métrica. Elaboración propia.

Organizaciones

- Gestión: ¿Cómo califica a la empresa (Buena o Mala)? ¿Recomendaría los productos y servicios de la empresa (del 0 al 5)? ¿Está satisfecho con las condiciones laborales de la empresa (Sí o No)?

Personas

- Salud mental: ¿Has dormido bien (Bien, Regular, Mal)? ¿Estás cansado de ayer (Sí o No)? ¿Empiezas a sentirte un poco enfermo (Sí o No)? ¿Estás preparado para afrontar grandes retos (Sí o No)?
- Condición física: Frecuencia cardíaca (por ejemplo, 65 latidos por minuto). Ingesta calórica (por ejemplo, 2000 kcal al día). Pulsioximetría (por ejemplo, SpO₂ del 95 %). Peso corporal (49 kg para una persona de 1.50 m). Temperatura (37 °C).
- Antropometría: diámetro torácico, índice de masa corporal, estatura, largo de la mano, largo del pie, tal como se muestra en la Figura 2.

Vehículos automotores

- Funcionamiento general: odómetro, antigüedad, servicios de mantenimiento, tipo de uso, cilindros del motor, tipo de combustión, distancia entre ejes.

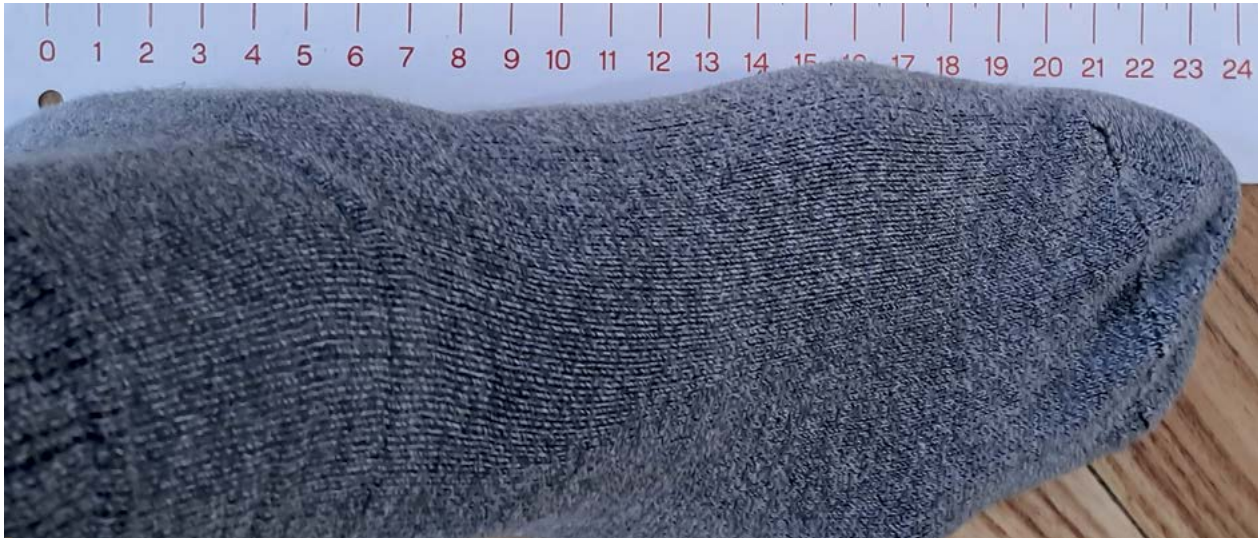


Figura 2. Fotografía que muestra la medición de un pie en centímetros. Elaboración propia.

- Capacidades: número de ruedas, potencia del motor, capacidad de carga, peso del vehículo, posibilidad de acoplamiento, rendimiento del combustible, potencia del motor.

Bases de datos

- En la nube: frecuencia de respaldo, factor de crecimiento, consumo de recursos de memoria y CPU en horas pico y en horas de uso medio, medidas de seguridad.
- En servidores locales: cantidad de conexiones, tráfico generado en la red, lecturas lógicas y físicas, volúmenes actuales y factor de crecimiento, cantidad de actualizaciones.

Diseño de las métricas

- Puede observarse que dependiendo de cada necesidad se debe considerar el diseño de las métricas específicas. No se debe dudar en cuanto a la cantidad de

métricas y, en algunos casos, respecto a la frecuencia con que se obtendrán estas medidas; pero no hay que descartar que algunos casos de medidas podrían no tener mayor uso o relevancia y ser eliminadas. Asimismo, detectar nuevas métricas y agregarlas no debe ser un problema; al contrario, podrían complementar todo el sistema de mediciones. En todo caso, un sistema de medición que tiene mucho tiempo registrando valores y que ahora requiere nuevos elementos tendría que ser revisado en cuanto a su congruencia.

Ahora bien, existen modelos o métodos matemáticos que nos permiten reconstruir valores antiguos o desconocidos, a partir de mediciones en objetos similares o en otro momento del tiempo; éstos son modelos de regresión lineal, no lineal o estructurada, matrices de correlación, como se muestra en el ejemplo de la [Tabla 1](#) y en matrices de covarianzas. Estos modelos matemáticos son pilares de la estadística moderna y pueden ser consultados en textos modernos sobre probabilidad y estadística.

Tabla 1. Ejemplo de matriz de factores de correlación entre diferentes disciplinas de estudio. Elaboración propia.

Materia	Matemáticas	Física	Química	Biología
Matemáticas	1	0.9	0.8	0.7
Física	0.9	1	0.92	0.82
Química	0.8	0.92	1	0.85
Biología	0.7	0.82	0.85	1

Los modelos de regresión no sólo se utilizan para la reconstrucción de métricas, también pueden utilizarse para la proyección o diagnóstico de comportamientos, lo cual puede ser muy útil para saber lo que podría estar sucediendo con ciertas métricas críticas en un futuro. Pero estos modelos deben ser siempre sujetos de una prueba; es decir, no confiar en un primer resultado sino generar diferentes escenarios que nos permitan valorar si el resultado final va a ser o no válido, sin olvidar que es un valor de tipo pronóstico, no lo que ciertamente va a suceder. En la gráfica de la **Figura 3** se pueden observar una serie de puntos resultantes de mediciones de comportamiento de un objeto. Con estos datos se puede obtener un nuevo valor sobre la horizontal y saber cuál sería su correspondencia sobre la vertical, o viceversa.

El proceso de diseño de una métrica debe obedecer a un plan estratégico sobre el uso o comportamiento de los objetos, considerando su dinámica estructural e interacción con otros sistemas. Es común que la generación de las métricas sea a partir de un estudio de fortalezas y debilidades del sistema (**FODA**), ya que éste nos marca la pauta sobre lo que debemos conocer para controlar, clasificar, identificar y pronosticar.

Se recomienda que las métricas sean valores cuantitativos y que se traten de evitar elementos cualitativos. Un elemento cuantitativo es un número específico que puede ser comparado con otro valor medido del mismo sistema o de otro similar. El va-

lor cualitativo puede ser sujeto de interpretación tanto de quien diseñó la métrica como de quien evaluó y, finalmente, de quien pretende comparar los resultados entre objetos o sistemas.

En algunos ambientes organizacionales se habla también de *objetivos* y *resultados*. Con esto se pretende relacionar mediciones de desempeño enfocadas muy específicamente en los objetivos de una organización, a un nivel tan detallado como lo requiera la misma organización, cuidando, nuevamente, los aspectos cualitativos y cuantitativos.

Una métrica puede ser un número o valor simple; por ejemplo, la cantidad de gasolina disponible en un tanque de almacenamiento. En algunos casos podrían ser un conjunto de valores con los que se genera un vector. Un ejemplo de vector podría ser el conjunto de valores que se obtiene al medir el desempeño de una computadora con los valores de la memoria RAM ocupada, de velocidad, de transferencia del disco duro, de frecuencia de ejecución del CPU y tiempo de respuesta al ejecutar un programa determinado. Todos estos valores integran un vector. Si se miden varias computadoras, por ejemplo, cada una tendrá su vector propio y estos valores podrán ser comparados para tomar decisiones respecto al desempeño.

■ **Guardado de las métricas**

■ Es muy conveniente almacenar de forma ordenada, sistemática y computarizada todas las métricas que se generan a lo largo del tiempo. Una forma idónea es con un sistema de bases de datos; sin embargo, esto requiere de ciertos conocimientos técnicos, por lo que una buena alternativa y sin mayor preámbulo son las hojas de cálculo, aunque para su manejo se presentarán restricciones de integración y exploración.

■ **Tipos de métricas**

■ Las métricas pueden ser dinámicas y siempre estar cambiando, aunque debe establecerse un rango de valores aceptables. Por ejemplo, la cantidad de combustible en un tanque de vehículo automotor. Otro tipo de métrica es aquella que se espera que no cambie en un periodo de tiempo largo —aunque al final

FODA
Técnica de análisis que se usa para identificar las fortalezas, las oportunidades, las debilidades y las amenazas de un negocio o proyecto específico.

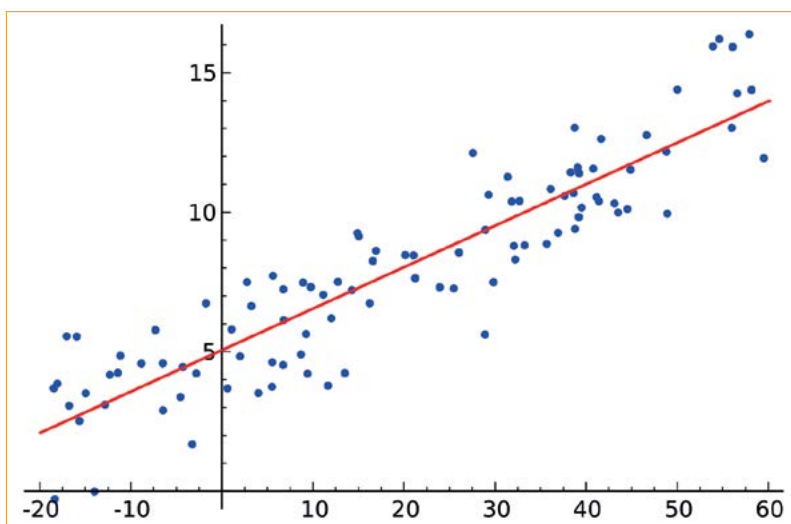


Figura 3. Ejemplos de muestras de métricas y línea de tendencia. Tomado de: https://es.wikipedia.org/wiki/Regresi%C3%B3n_lineal. Dominio público.

termine cambiando—; por ejemplo, la estatura de una persona, que al llegar a la vejez se va a reducir. Otro tipo de métrica es la que no debería cambiar y que, cuando presenta variaciones, éstas podrían significar que hay un problema grave; por ejemplo, la distancia entre los ejes de un vehículo, pues si ésta cambia, hay una discrepancia mecánica importante.

Algunas métricas podrían ser sujeto de algún cálculo tan simple o complejo como se requiera en cuanto a la precisión. Un caso puede ser la edad de un individuo a partir de la fecha de su nacimiento. Si se requieren años y fracción, será relativamente sencillo; si se requieren días o incluso horas desde el nacimiento, el cálculo podría ser algo más complejo.

Las métricas deben tener definida una unidad de valor, sea el caso de la estatura de una persona en metros y fracción de metros, el contenido líquido de un tanque de combustible en litros, la distancia entre ejes de un vehículo en metros y fracción, el peso de una estructura en kilogramos o toneladas, las partes por millón contenidas en un líquido, las piezas de una estructura desarmable, el precio de venta de un artículo, las unidades de ensamble que una persona coloca en un tiempo determinado... También pueden ser factores o porcentajes; por ejemplo, la cantidad de nombres propios entre el total de palabras de un texto. Otras métricas pueden ser booleanas o de dos valores; es decir, sí o no, verdadero o falso. También se pueden obtener factores primos; esto es, valores que dividen a un número o cantidad o el máximo común divisor o factores sujetos de una expresión algebraica.

Documentación de las métricas

 Cada métrica debe tener una documentación específica sobre lo que significa, su rango de valores o posibles valores, su interpretación en la medición y la frecuencia con que deba ser obtenida; quizás no todas las métricas deban ser obtenidas con la misma frecuencia o en las mismas condiciones operativas.

Conclusiones

 Las métricas no constituyen meros datos aislados, sino que representan herramientas fundamentales

para la gestión y optimización de cualquier sistema. Las métricas constituyen un elemento fundamental en nuestra existencia como seres inteligentes y racionales, ya que nos facilitan la actualización necesaria para transformar y adaptar nuestro entorno. La digitalización de la vida cotidiana ha permitido que la disponibilidad de métricas proporcione certeza, seguridad y competitividad. Las herramientas destinadas a la recolección, evaluación y análisis de métricas son cada vez más sofisticadas.

José Emilio Quiroz Ibarra

Instituto de Investigación Aplicada y Tecnología (INIAT)
Universidad Iberoamericana, CDMX.
quirozem@gmail.com

Jorge Ángel González Ordiano

Instituto de Investigación Aplicada y Tecnología (INIAT)
Universidad Iberoamericana, CDMX.
jorge.gonzalez@ibero.mx

Lecturas recomendadas

- Chavarría Briceño, R. (2025), “El indicador clave de desempeño (KPI)”, *FAECO Sapiens*, 8(2):254-264. Disponible en: <https://doi.org/10.48204/j.faeco.v8n2.a7755>.
- Corral, R. (2022), *KPIs útiles: diseño de indicadores operativos que realmente sirvan para mejorar*, Leexonline.com.
- Devore, J. L. (2020), *Introducción a la Probabilidad y Estadística*, Cengage.
- Domínguez, G. (2021), *Indicadores de gestión y resultados: un enfoque sistémico*, Medellín, Colombia, Doiké S.A. S.
- Lescano, L. y L. Ocaña (2023), “Uso de business intelligence para la evaluación de desempeño a través de indicadores clave de rendimiento (KPI'S)”, *Universidad y Sociedad*, [en línea]. Disponible en: <https://rus.ucf.edu.cu/index.php/rus/article/view/3876>.

Cursos recomendados

- Coursera: <https://www.coursera.org/>, cursos sobre análisis de datos y métricas.
- EdX: <https://www.edx.org/>, cursos sobre análisis de datos y métricas.
- Khan: <https://es.khanacademy.org/math/ap-statistics>, curso sobre estadística avanzada.
- Udemy: <https://www.udemy.com/>, cursos sobre análisis de datos y métricas.

Rocío Fonseca-Aguinaga, Walter M. Warren Vega y Luis A. Romero Cano

Evaluación de la calidad del tequila

El tequila es reconocido como símbolo de la cultura mexicana. En el marco de la celebración del 30 aniversario del Consejo Regulador del Tequila (CRT) y la conmemoración de los 50 años de la Denominación de Origen del Tequila (DOT), con el fin de promover la cultura de la bebida nacional por excelencia, la presente comunicación tiene como objetivo presentar los avances científicos para la generación de un banco isotópico de la bebida como herramienta auxiliar para salvaguardar el tequila como bebida en el mundo.

Introducción

El tequila es una bebida alcohólica cuya autenticidad se comprueba a través de una inspección permanente desde el origen del **agave** hasta la comercialización del producto realizada por el Consejo Regulador del Tequila (CRT) en las empresas productoras, inspección en la que se constata que el proceso de producción cumple con los lineamientos de la NOM-006-SCFI-2012. En esta norma se establecen las especificaciones para la producción de esta bebida, describiendo sus categorías y clases. De acuerdo con su categoría, se clasifica en dos: tequila 100 % agave y tequila.

El *tequila 100 % agave* se define como un producto que no ha sido enriquecido con fuentes de azúcares distintas al *Agave tequilana* Weber variedad azul. Esta especie es la única permitida para la producción del tequila y debe cultivarse dentro del territorio que comprende la Denominación de Origen del Tequila (DOT), territorio conformado por 181 municipios cuya distribución se describe a continuación: los 125 de Jalisco, 30 de Michoacán, 11 de Tamaulipas, 8 de Nayarit y 7 de Guanajuato. El envasado del producto debe realizarse en una planta controlada por un **productor autorizado** y estar ubicada dentro del territorio comprendido en la DOT.

Ahora bien, la categoría de *tequila* corresponde a un producto en cuya formulación de mostos –líquido azucarado proveniente de la extracción del agave hidrolizado– pueden adicionarse otros azúcares conforme a la norma, sin exceder un 49 % de azúcares reductores totales en unidades masa; de modo que el 51 %

Agave

Planta de la familia de las agaváceas, de hojas largas y fibrosas, de forma lanceolada, de color azulado, de la especie tequilana Weber variedad azul, cuya parte aprovechable para la elaboración de tequila es la piña o cabeza.

Productor autorizado

Persona física o moral que cuenta con autorización por parte de la Dirección General de Normas y del Instituto Mexicano de la Propiedad Industrial, conforme a sus respectivas atribuciones, para dedicarse a la elaboración de tequila dentro de sus instalaciones.



de los azúcares debe pertenecer a plantas de *Agave tequilana* Weber, variedad azul cultivadas dentro de la DOT. Para el caso de esta categoría, el envasado puede realizarse fuera de la DOT, pero debe cumplir con las especificaciones establecidas en la Norma Oficial Mexicana.

Por otro lado, existen cinco clases de tequila, que se distinguen principalmente por el tiempo de maduración al que ha sido sometida la bebida y se describen a continuación: a) *blanco*, producto que se obtiene de la destilación y al que se añade agua de dilución para el ajuste de la graduación alcohólica; b) *joven*, producto obtenido de la mezcla de tequila blanco, tequila reposado, tequila añejo o tequila extra añejo; c) *reposado*, producto que ha estado en contacto con madera de recipientes de roble o encino por un tiempo mínimo de dos meses; d) *añejo*, aquel que ha estado por un tiempo mínimo de un año en contacto con madera de recipientes de roble o encino teniendo una capacidad máxima de 600 L, y e) *extra añejo*, el que ha estado al menos tres años en maduración en recipientes de roble o encino con una capacidad máxima de 600 L.

Banco de datos isotópico

Base de datos que cuenta con la trazabilidad de cada muestra, determinando los valores isotópicos de carbono 13 y oxígeno 18, en el laboratorio del Consejo Regulador del Tequila, A. C., como una herramienta auxiliar para la calidad de la bebida.

■ **Isotopía en el tequila**

■ De acuerdo con cifras del CRT, en 2025 se alcanzó un volumen de producción total de 559.36 millones de litros de tequila 100 % agave y tequila, con participación en mercados nacionales e internacionales.

Esto refleja el creciente interés de los consumidores del mundo en el tequila y la necesidad de establecer técnicas analíticas auxiliares que puedan implementarse como controles de calidad a nivel internacional. Para lograr este objetivo, el 16 de marzo de 2016 se inauguró dentro de las instalaciones del CRT el Laboratorio de Isotopía con la finalidad de que, mediante el uso de un equipo de cromatografía de gases acoplado a un espectrómetro de masas de relaciones isotópicas, se determinaran los isótopos de carbono 13 ($\delta^{13}\text{C}_{\text{VPDB}}$) –donde VPDB alude a Vienna Pee Dee Belemnite, material de referencia que permite establecer una escala para su medición y oxígeno 18 ($\delta^{18}\text{O}_{\text{VSMOW}}$), en donde VSMOW es la escala a un material de referencia primario denominado Vienna Standard Mean Ocean Water–. El análisis de estos isótopos se realiza en ambas categorías del producto a fin de generar un **banco de datos isotópicos** del tequila, considerando también sus clases, con la finalidad de contar con una herramienta analítica complementaria a las actividades de inspección y certificación del CRT, y garantizar así la autenticidad del tequila. A continuación se presenta la infraestructura que se cuenta en el Laboratorio de Isotopía del CRT para llevar a cabo el análisis de bebidas alcohólicas (**Figura 1**).

Antes de referir los avances alcanzados en el Laboratorio de Isotopía del CRT, es importante explicar qué es un isótopo. De acuerdo con el Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA), un isótopo se defi-



Figura 1. Infraestructura del Laboratorio de Isotopía del Consejo Regulador del Tequila. Crédito de imágenes: Consejo Regulador del Tequila A. C.

ne como átomos pertenecientes a un mismo elemento químico (que cuentan con un número específico de protones y electrones en su núcleo), pero que pueden presentar diferencias en la cantidad de neutrones en su núcleo. Para realizar su medición, la notación utilizada es partes por mil (‰), debido a que la abundancia de los isótopos es relativamente pequeña.

La diferencia en el número de neutrones permite identificar el origen y las variaciones relacionadas con el proceso de elaboración de la bebida. Con esta metodología analítica, es posible determinar el origen del componente principal de cada bebida alcohólica, el etanol. La NOM-006-SCFI-2012 establece que el contenido alcohólico del tequila debe encontrarse entre 35-55 % de Alc. Vol., el cual se analiza mediante cromatografía de gases acoplado a la espectrometría de masas de relaciones isotópicas para determinar el “delta de carbono 13” ($\delta^{13}\text{C}$), parámetro que permite identificar si la fuente de azúcar empleada en la elaboración del tequila pertenece a una agavácea o a otra fuente, como la uva, la caña o el maíz. Este parámetro se correlaciona con el ciclo fotosintético de la planta. En la **Figura 2** se presenta un mapa mental de los tipos de plantas que hay de acuerdo con los mecanismos de asimilación de CO_2 en la fotosíntesis y ejemplos de éstas.

Estudios de isotopía en tequila

Para el caso de tequila 100 % agave blanco, en estudios acotados a un número finito de muestras, considerando los productores autorizados activos al momento de la realización de los análisis y los



procesos de producción utilizados, se ha encontrado que los valores de delta de carbono 13 ($\delta^{13}\text{C}$) en la molécula de etanol se han comportado en un rango de -12.00 a -13.50 ‰ (Fonseca-Aguiñaga y cols., 2020). Estudios posteriores evidenciaron que el parámetro $\delta^{13}\text{C}$ en las clases reposado (con por lo menos dos meses en barrica) y añejo (con por lo menos un año en barrica) no se ve afectado; sin embargo, se observa un enriquecimiento en la relación isotópica de oxígeno 18 ($\delta^{18}\text{O}_{\text{VSMOW}}$) en el etanol, por lo que este parámetro ha sido declarado como trazador del tiempo de maduración de la bebida, ya que se encuentra relacionado con la generación de compuestos volátiles, como ésteres, por reacciones de oxidación que ocurren dentro de la barrica (**Tabla 1**) (Fonseca-Aguiñaga y cols., 2021; Warren-Vega y cols., 2021).

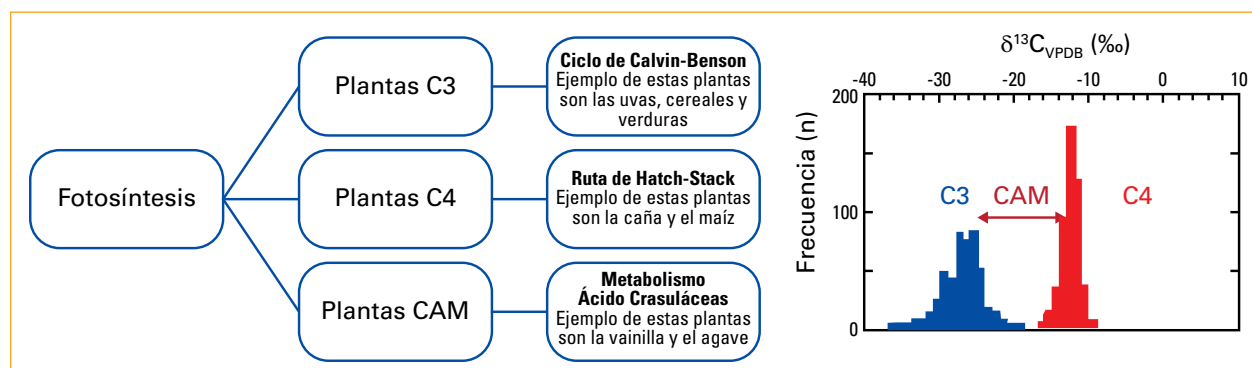


Figura 2. Mapa mental de los tipos de plantas presentes de acuerdo con su proceso de fotosíntesis. Para el caso de las plantas CAM (siglas en inglés de Crassulacean Acidic Metabolism), el intervalo está definido por las flechas.

Tabla 1. Parámetros analíticos auxiliares para determinar la autenticidad de la fuente de azúcar utilizada en la producción de etanol ($\delta^{13}\text{C}_{\text{VPDB}}$) y el tiempo de maduración de la bebida ($\delta^{18}\text{O}_{\text{VSMOW}}$).

Bebida	$\delta^{13}\text{C}_{\text{VPDB}}$ (‰)			$\delta^{18}\text{O}_{\text{VSMOW}}$ (‰)		
	Mín.	Máx.	Prom.	Mín.	Máx.	Prom.
Tequila 100 % agave blanco	-13.38	-12.30	-12.84	17.38	21.66	19.52
Tequila 100 % agave reposado	-13.25	-12.43	-12.84	18.65	22.43	20.54
Tequila 100 % agave añejo	-13.20	-12.52	-12.86	19.42	23.48	21.45

Nota: Los valores isotópicos presentados aquí corresponden a análisis realizados en estudios previos (Fonseca-Aguñaga y cols., 2020; Fonseca-Aguñaga y cols., 2021).

Es importante mencionar que, dentro de la elaboración del tequila, una etapa fundamental es la cosecha de la materia prima, la cual se realiza seis o siete años después de la plantación del *Agave tequilana* Weber variedad azul, periodo en el que alcanza su completo desarrollo. Sin embargo, debido a las necesidades del mercado, en ocasiones se llegan a utilizar plantas de cuatro años.

A fin de estudiar la afectación de la edad del agave en el perfil del producto y su impacto en los controles de calidad, se evaluó este efecto dentro del Laboratorio de Isotopía del CRT. El estudio consistió en emplear diferentes edades del agave (cuatro a seis años) durante la elaboración de tequila 100 % agave blanco a escala industrial (Acosta-Salazar y cols., 2021). Se confirmó que no existen diferencias estadísticamente significativas en los valores de las relaciones isotópicas de carbono 13, ni en los parámetros fisicoquímicos (aldehídos, ésteres, metanol y alcoholes superiores) reglamentados en la

norma, garantizando que es posible utilizar agave de diferentes edades.

Por otra parte, es importante destacar que el tequila no es la única bebida alcohólica obtenida a partir de una especie de agave; existen otras bebidas en el mercado que paulatinamente se han ido posicionando en el gusto de los consumidores. Entre éstas destacan la raicilla, la bacanora y el mezcal, que, de acuerdo con sus respectivas normativas, poseen criterios específicos para su elaboración, como lo son la especie de agave permitida o el territorio geográfico en donde se pueden cultivar o producir. Debido a que todas las especies de agave poseen el mismo proceso fotosintético, se hace evidente la necesidad de buscar estrategias adicionales para identificar correctamente las bebidas, ya que todas ellas tendrán valores de $\delta^{13}\text{C}_{\text{VPDB}}$ similares.

Con la finalidad de diferenciar estas bebidas, el Laboratorio de Isotopía del CRT ha implementado la evaluación del $\delta^{13}\text{C}_{\text{VPDB}}$ en los compuestos congénéricos (como aldehídos, ésteres, alcoholes superiores y metanol) que conforman la bebida, los cuales se generan en cada una de las etapas del proceso de producción. Se tiene conocimiento de que las etapas de hidrólisis-extracción, fermentación y destilación impactan en el perfil de las bebidas, ya que cada industria tiene diferencias en sus procesos de elaboración: desde el uso de hornos de mampostería hasta el uso de columnas de barro. La caracterización isotópica de estos compuestos permitirá construir la huella isotópica del tequila (Figura 3) y evidenciar que las prácticas de producción empleadas repercuten en los isótopos de las moléculas, contribuyendo así a la definición de trazadores que distingan correcta-

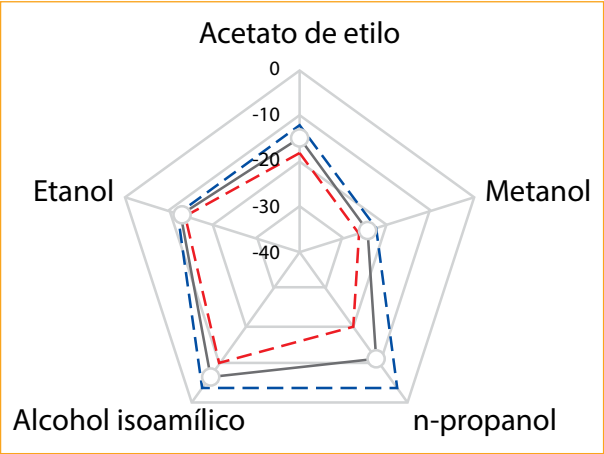


Figura 3. Huella isotópica de tequila 100 % agave blanco: $\delta^{13}\text{C}_{\text{VPDB}}$ (‰), ---+2s, ---2s. Figura reproducida a partir de Fonseca-Aguñaga y cols., 2023 (bajo licencia Creative Commons CC BY 4.0).

mente el tequila y el tequila 100 % agave del resto de las bebidas espirituosas (Fonseca-Aguiñaga y cols., 2023).

■ Conclusiones

■ El uso de la cromatografía de gases acoplada a la espectrometría de masas de relaciones isotópicas fortalecerá la evaluación del tequila y del tequila 100 % agave, así como sus respectivas clases, complementando las actividades que se realizan actualmente dentro del proceso de inspección del CRT, con lo cual se espera fortalecer el proceso de evaluación de la autenticidad de la bebida.

Esta técnica analítica, por otro lado, puede ofrecer evidencia científica que favorezca la protección del tequila frente a la competencia desleal con otras bebidas, permitiendo la defensa, mediante la información generada y almacenada en el CRT, de los productos de cada empresa.

Rocío Fonseca-Aguiñaga

Laboratorio de Isotopía, Consejo Regulador del Tequila, A. C.
rfonseca@crt.org.mx

Walter M. Warren Vega

Laboratorio de Isotopía, Consejo Regulador del Tequila, A. C.
wwarren@crt.org.mx

Luis A. Romero Cano

Grupo de Investigación en Materiales y Fenómenos de Superficie,
Departamento de Biotecnológicas y Ambientales, Universidad
Autónoma de Guadalajara.
luis.cano@edu.uag.mx

Referencias

- Acosta-Salazar, E., R. Fonseca-Aguiñaga, W. M. Warren-Vega, A. I. Zárate-Guzmán, M. A. Zárate-Navarro *et al.* (2021), "Effect of age of Agave tequilana Weber blue variety on quality and authenticity parameters for the tequila 100% agave silver class: Evaluation at the industrial scale level", *Foods*, 10(12):1-14. Disponible en: <<https://doi.org/10.3390/foods10123103>>.
- Daya, P. (2022), "¿Qué es un isótopo?", OIEA [en línea]. Disponible en: <<https://www.iaea.org/es/newscenter/news/que-es-un-isotopo>>, consultado el 26 de febrero de 2026.
- Fonseca-Aguiñaga, R., H. Gómez-Ruiz, F. Miguel-Cruz y L. A. Romero-Cano (2020), "Analytical characterization of tequila (silver class) using stable isotope analyses of C, O and atomic absorption as additional criteria to determine authenticity of beverage", *Food Control*, 112:107161. Disponible en: <<https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2020.107161>>.
- Fonseca-Aguiñaga, R., W. M. Warren-Vega, F. Miguel-Cruz y L. A. Romero-Cano (2021), "Isotopic characterization of 100% agave tequila (silver, aged and extra-aged class) for its use as an additional parameter in the determination of the authenticity of the beverage maturation time", *Molecules*, 26(6):1719. Disponible en: <<https://doi.org/10.3390/molecules26061719>>.
- Fonseca-Aguiñaga, R., U. E. Navarro-Arteaga, M. Muñoz-Sánchez, H. Gómez-Ruiz, W. M. Warren-Vega y L. A. Romero-Cano (2023), "Design of a novel auxiliary diagnostic test for the determination of authenticity of tequila 100% agave silver class based on chemometrics analysis of the isotopic fingerprint of the beverage", *Foods*, 12(13):2605. Disponible en: <<https://doi.org/10.3390/foods12132605>>.
- Warren-Vega, W. M., R. Fonseca-Aguiñaga, L. V. González-Gutiérrez, F. Carrasco-Marín, A. I. Zárate-Guzmán y L. A. Romero-Cano (2021), "Chemical characterization of tequila maturation process and their connection with the physicochemical properties of the cask", *Journal of Food Composition and Analysis*, 98. Disponible en: <<https://doi.org/10.1016/j.jfca.2021.103804>>.

Aprovechamiento de efluentes vinícolas para generar nuevos productos

Los efluentes vinícolas son uno de los residuos más abundantes en la producción del vino. En este artículo se brinda información sobre la composición de este residuo, así como sobre su impacto negativo en el medio ambiente, para, finalmente, presentar las alternativas que se han propuesto para el aprovechamiento de estos residuos en la generación de nuevos productos.

Introducción

El vino es una deliciosa bebida que se produce a partir del zumo de uvas maduras de diversas partes del mundo. A nivel internacional, en 2021 se produjeron cerca de 25 000 millones de litros de esta icónica bebida. Sin embargo, por cada litro de vino que se produce se generan de uno a cuatro L de aguas residuales. Éstas contienen muchos compuestos que, si se incorporan en los ecosistemas, pueden provocar severos daños. Por ello, se han propuesto diferentes tecnologías para el tratamiento de estos efluentes.

Efluentes

Líquidos residuales que se generan en una planta industrial.

El proceso de producción del vino

El proceso de producción del vino inicia con la cosecha de la uva (Figura 1). En un esquema tradicional, esta etapa se realiza a mano debido a delicadeza de las uvas. Puede parecer que no es una etapa muy significativa; sin embargo, si no se realiza con el cuidado adecuado, las uvas que se maltratan pueden ser atacadas por microorganismos (principalmente hongos) que dañan el producto, generan mal olor y sabor, así como riesgos para la salud.

En la siguiente etapa se realiza el despalillado, el cual consiste en separar la uva de su racimo. Este paso se puede realizar de manera tradicional, como la etapa anterior, o mediante máquinas automatizadas. Algunas de estas máquinas cuentan con sistemas de selección vibratoria u óptica para realizar esta tarea sin dañar a la uva. Este paso es uno de los más importantes, ya que el racimo contiene compuestos





Figura 1. Proceso de elaboración del vino. Elaboración propia.

vegetales que afectan de manera significativa la calidad del vino.

Posteriormente, está la etapa de prensado, proceso en el que se separa el jugo de la uva del resto de sus componentes, los cuales se conocen como orujo. Actualmente, las prensas empleadas son mecánicas; sin embargo, el uso de máquinas para el prensado no siempre fue así. Tradicionalmente, las uvas se prensaban con los pies, y en algunos viñedos suele recrearse esta actividad con fines recreativos y de esparcimiento.

La cosecha de la uva, el despalillado y el prensado son etapas que permiten acondicionar las uvas para su transformación en vino, etapa que se conoce como fermentación y que usualmente se define como el corazón del proceso de la producción del vino. La fermentación se realiza en un tanque conocido como biorreactor, en el cual la transformación del jugo de uva en vino se lleva a cabo mediante el uso de levaduras. Las levaduras son hongos unicelulares que pueden adaptar su metabolismo para sobrevivir sin oxígeno; debido a ello se les clasifica como microorganismos aerobios facultativos. Este concepto se describe a continuación.

La función del oxígeno en todos los organismos que lo respiran es recibir electrones que ya no le sirven a las células. Posteriormente, ese oxígeno

no se desecha en forma de vapor de agua; este proceso se realiza en pequeños organelos llamados mitocondrias. Para sobrevivir en condiciones sin oxígeno, las levaduras consumen su alimento (un azúcar llamada glucosa) de una manera incompleta; es decir, en lugar de degradar el alimento en CO_2 y H_2O —lo cual se realiza en una serie de procesos llamados glucólisis, ciclo de Krebs y cadena respiratoria—, el alimento se degrada hasta una molécula conocida como piruvato. A través de una serie de pasos, el piruvato acepta los electrones que debería haber tomado el oxígeno; como consecuencia, se obtiene el alcohol del vino —etanol—, en lugar de generar dióxido de carbono y agua. Para la operación del biorreactor, es fundamental eliminar todas las fuentes de oxígeno; de lo contrario, la levadura no producirá el etanol y sólo se generarán malos olores y sabores en un caldo que claramente no es vino.

Después de la fermentación, es necesario retirar la levadura, así como las partículas sólidas (restos de piel de uva) que se encuentren suspendidas en el vino. A esta operación se le conoce como clarificación. Si la clarificación no se lleva a cabo, se tendrá un vino de mala calidad, y no precisamente porque resulte peligroso para consumo humano, sino porque la turbidez se vuelve una característica desagradable.

dable a la vista. La clarificación se puede llevar a cabo mediante filtraciones, sedimentaciones (precipitación de partículas sólidas), y coagulación (formación de grumos que se pueden precipitar). Todos los residuos sólidos que provienen de esta etapa se conocen como lías, las cuales están constituidas por levaduras, y residuos de uva (celulosa, hemicelulosa y lignina).

Una vez que se tiene el vino clarificado, éste se coloca en barricas de madera, en las que comienza un proceso de maduración. El objetivo de esta etapa es que el vino adquiera aromas y colores por la transferencia de compuestos orgánicos (por ejemplo: los taninos) desde la madera.

La **Figura 2** muestra una representación gráfica del proceso antes mencionado. Además, el diagrama muestra varias corrientes hacia abajo, las cuales simbolizan algunos de los residuos que se generan. Todos los residuos generados en el proceso de producción de vino pueden emplearse para la generación de nuevos productos, lo que permitiría que la industria vinícola utilizara de manera integral toda la cosecha de la uva. Tales residuos incluyen hojas, tallos, orujo, semillas, vinazas y lías. En particular, en este artículo se analizan las estrategias de aprovechamiento de las vinazas provenientes de la fermentación y clarificación, las cuales forman parte de los efluentes vinícolas.

Los efluentes vinícolas se definen como todos los desechos líquidos (no sanitarios) provenientes del proceso vinícola; en otras palabras, es la mezcla de vinazas, agua del lavado de los tanques de fermentación, clarificación y prensa. Además, los efluentes incluyen vinazas, las cuales se definen como el líquido que se queda al momento de retirar levaduras y partículas sólidas. En los efluentes también se con-

sideran los derrames de producto durante la producción, aquel producto rechazado por el departamento de calidad (el cual debe tirarse), o incluso las devoluciones hechas por los clientes, las cuales también deben verse al drenaje.

Estos efluentes vinícolas constan de diversos componentes. Los más abundantes y representativos son el agua, azúcar (en forma de sacarosa, glucosa y fructuosa), etanol y compuestos sólidos (materiales con lignina, celulosa y hemicelulosa, que son componentes de las hojas, tallos y orujo). Los componentes de los efluentes vinícolas pueden dañar a los ecosistemas si entran en contacto con ellos; de allí que, por regulaciones ambientales, no deben verse directamente al drenaje. En consecuencia, los efluentes deben someterse a procesos de tratamiento para remover esos componentes, y así cumplir con los límites establecidos en las disposiciones ambientales.

Existen tecnologías disponibles para el tratamiento de efluentes vinícolas; la más común es una planta de tratamiento de aguas residuales y en ella se emplean diversos procesos físicos y químicos cuyo objetivo es remover los componentes contaminantes de los efluentes vinícolas. En consecuencia, se obtiene agua con una composición apropiada para su uso en riego de áreas verdes, y lodos que pueden emplearse para generar electricidad. No obstante, estas tecnologías usualmente se perciben en las empresas como un gasto para cumplir con las regulaciones ambientales; pero puede cambiarse este paradigma y ver de otra manera a los residuos vinícolas. En otras palabras, los efluentes vinícolas no son necesariamente un problema, sino que pueden ser una materia prima que puede revalorizarse para generar nuevos productos que se reinserten en el mercado.

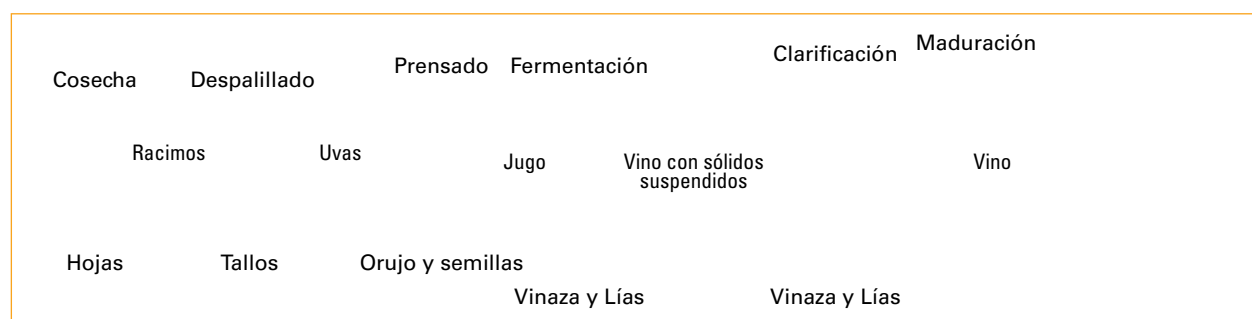


Figura 2. Proceso de elaboración del vino. Elaboración propia.

Tabla 1. Ejemplos de procesos de revalorización.

Naturaleza del proceso	Principio de funcionamiento	Tipos de productos generados
Química	Conversión del residuo mediante reacciones químicas que requieren catalizadores (sustancias que aceleran las reacciones químicas) usualmente metálicos.	Biocombustibles, químicos, plásticos.
Bioquímica	Conversión del residuo por la acción de catalizadores biológicos, los cuales son pequeñas moléculas que, aunque se obtienen de seres vivos, no son considerados seres vivos (Figura 3).	Productos de pretratamiento, como compuestos fenólicos o azúcares simples.
Termoquímica	Conversión del residuo debida a una reacción química con oxígeno, en diferentes proporciones, a altas temperaturas.	Biocombustibles, calor.
Biológica	Conversión del residuo en productos de valor o biomasa por acción de los microorganismos, tales como las microalgas o las lombrices.	Alcoholes, lípidos, compuestos de valor agregado, biomasa.

■ **Revalorización de efluentes vinícolas**

■ La revalorización se define como el proceso de recuperación o producción de compuestos de valor agregado a partir de residuos. Así, los procesos de revalorización permiten emplear como materias primas los residuos, reduciendo con ello su impacto negativo en el ambiente. Por otra parte, los nuevos productos pueden reincorporarse en el mercado, impulsando así el crecimiento económico y el uso eficiente de los recursos. Los productos generados pueden tener diversas aplicaciones según su naturaleza; por ejemplo, pueden emplearse como catalizadores biotecnológicos, emulsificantes, polímeros

precursores de plásticos, adsorbentes biológicos, o biocombustibles. Estos productos pueden obtenerse mediante diversas tecnologías, las cuales incluyen procesos químicos, bioquímicos, termoquímicos y biológicos; algunos ejemplos de tecnologías se muestran en la Tabla 1.

Este tipo de tecnologías permite obtener biocombustibles, bioenergía, o bien productos de valor agregado. Sin embargo, ninguna de ellas permite generar los tres tipos de productos de manera simultánea. Contar con un esquema de procesamiento que permita obtenerlos podría contribuir al aprovechamiento integral de los residuos; es decir, utilizarlos comple-

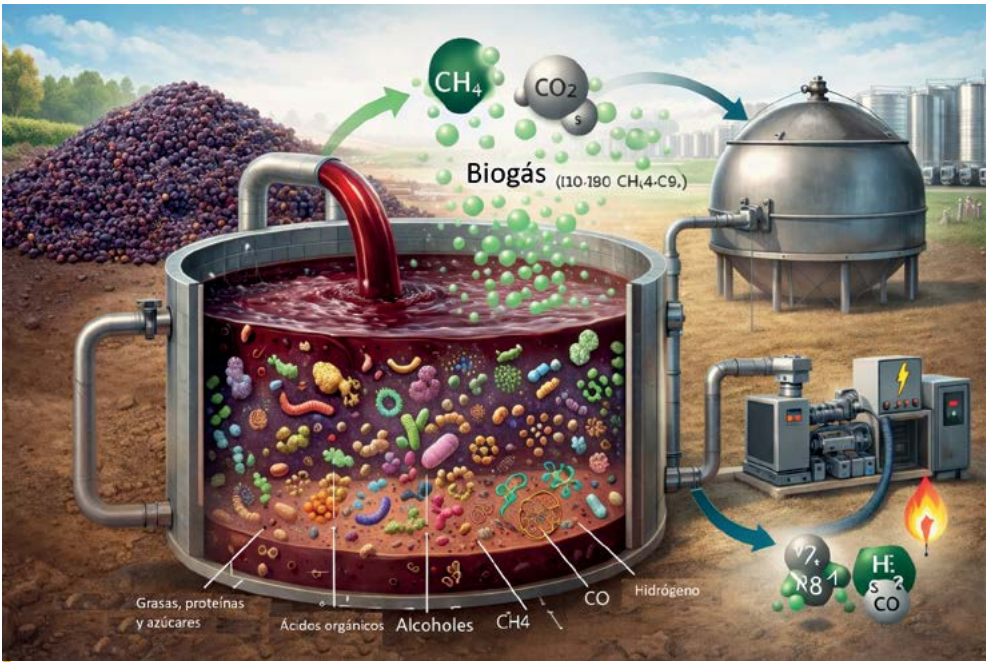


Figura 3. Valoración bioquímica del efluente vinícola. Elaboración propia.

tamente. Además, permitiría mejorar la economía del proceso, ya que su rentabilidad recae en varios productos, en lugar de en uno solo. A este esquema de procesamiento se le llama biorrefinería.

El término biorrefinería se acuñó con base en el concepto de petrorrefinerías, en donde una materia prima (el petróleo) se transforma en una serie de productos (químicos y combustibles, entre otros). Por lo que una biorrefinería es un esquema de procesamiento en el cual una materia prima –en este caso un residuo o biomasa– se transforma en productos de valor agregado, biocombustibles y bioenergía. Para ello, se emplean diversos procesos de revalorización, como los presentados en la [Tabla 1](#). Para ejemplificar y diferenciar los conceptos de tecnología de revalorización y una biorrefinería con enfoque en la revalorización, consideremos un residuo; por ejemplo, la cascarilla de café. Ésta es un residuo que se genera en la producción de los granos de café y se estima que se generan 150 gramos de cascarilla por cada kilogramo de granos de café.

Una tecnología de revalorización de la cascarilla de café podría ser un proceso termoquímico, en el cual únicamente se quemaría el residuo para la generación de calor (proceso individual). Por otro lado, de la cascarilla de café se puede extraer la ca-

feína contenida, y después el residuo sólido puede ser densificado en un *pellet* (biocombustible sólido). Al conjunto de procesos de extracción de cafeína y elaboración de *pellets* se le define como un esquema de biorrefinería. Es importante mencionar que un gran reto que tienen las biorrefinerías es la materia prima que procesan. Dado que pueden convertir cualquier tipo de biomasa es importante que ésta no compita con el alimento del ser humano; esta afectación puede ser de manera directa o indirecta (al utilizar tierras de cultivo para siembras no enfocadas a la seguridad alimentaria). De allí que las biorrefinerías que procesan residuos es un área de investigación en constante desarrollo y crecimiento.

En el caso de los efluentes vinícolas se han propuesto diversos esquemas de biorrefinerías para la generación de productos de alto valor agregado y biocombustibles. Algunos de los productos elaborados a partir de efluentes vinícolas incluyen materiales usados en la producción de plásticos biodegradables (polihidroxialcanoatos, polihidroxibutiratos), jabones (biosurfactantes), biocombustibles (biogás, bioetanol, hidrógeno renovable), productos biotecnológicos (enzimas), grasas, proteínas, así como biomasa ([Figura 4](#)). Por tanto, el aprovechamiento de los efluentes vinícolas permite generar productos



Figura 4. Esquema de biorrefinería para la conversión de efluentes vinícolas. Elaboración propia.



de valor agregado a precios más accesibles, así como biocombustibles y bioenergía; y lo más importante, contribuye a disminuir los daños al medio ambiente y a prevenir afectaciones a la salud humana. Por esa razón es importante continuar desarrollando nuevos esquemas de biorrefinerías para la revalorización de los residuos.

Aparte de las biorrefinerías, los residuos vinícolas se han revalorizado mediante otros enfoques. Hay reportes que señalan el desarrollo de productos alimenticios a partir del orujo de uva, tales como aditivos de carne para hamburguesa, sazónadores para pechuga de pollo y pastas fortificadas. En el área de la salud, se han encontrado aplicaciones bastante novedosas e interesantes. Por ejemplo, el orujo se utiliza en formulaciones de prebióticos con base en el bagazo de uva. Cabe mencionar que un prebiótico es un material no vivo que ayuda en nuestra salud; por ejemplo: los minerales. Un probiótico, por el contrario, es un microorganismo vivo que también contri-

buye a nuestra salud, como los *lactobacilos*. Además, los probióticos nos ayudan con el tránsito intestinal porque contienen fibra dietética y antioxidantes.

Por otra parte, existen investigaciones en las cuales se revalorizan los residuos vinícolas en materiales avanzados. Algunos ejemplos incluyen la formación de nanocristales de celulosa del bagazo fermentado de la uva. Los nanocristales son materiales extremadamente pequeños; si observas 1 milímetro en una regla y lo divides en un millón de partes, cada una de esas partes es un nanómetro. Estos materiales se utilizan en la producción de baterías. Otra aplicación en el área de los materiales es la producción de soportes de **fotocatalizadores**. Además, también hay investigación centrada en la elaboración de implantes médicos para personas con problemas periodontales (problemas en las encías).

Como puede observarse, los residuos vinícolas no representan un problema, sino una materia prima valiosa para generar productos en diversos sec-

Fotocatalizador

Catalizador que reacciona con la luz y se pueden aplicar para generar biocombustibles o eliminar contaminantes en el agua y aire.

tores. La investigación en torno al aprovechamiento de residuos mediante esquemas de biorrefinerías es muy interesante y posibilita contribuir al desarrollo sustentable. ¿Quieres sumarte al equipo de científicos que trabajamos en esta interesante temática? ¡Te esperamos! ¡El planeta cuenta contigo!

Carlos Eduardo Guzmán Martínez

Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Querétaro
carlos.guzman@uaq.mx

Claudia Gutiérrez Antonio

Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Querétaro
claudia.gutierrez@uaq.mx

Lecturas recomendadas

- Bastidas-Oyanedel, J. R. y J. E. Schmidt (2019), *Biorefinery: Integrated Sustainable Processes for Biomass Conversion to Biomaterials, Biofuels, and Fertilizers*, 1.ª ed., Suiza, Springer.
- Fan, Q., C. Jiang, W. Wang, L. Bai, H. Chen, H. Yang, D. Wei y L. Yang (2020), "Ecofriendly extraction of cellulose nanocrystals from grape pomace and construction of self-healing nanocomposite hydrogels", *Cellulose*, 27:2541-2553.
- Ortega-Heras, M., E. Villarroel, S. Mateos, J. García-Lomillo, J. Rovira y M. L. González-Sanjosé (2020), "Application of a seasoning obtained from red grape pomace as a salt replacer for the elaboration of marinated chicken breasts: study of their physical-chemical and sensory properties and microbiological stability", *CyTA Journal of Food*, 18(1):122-131. Disponible en: <<https://doi.org/10.1080/19476337.2019.1709558>>.
- Ratna, S., S. Rastogi y R. Kumar (2021), "Current trends for distillery wastewater management and its emerging applications for sustainable environment", *Journal of Environmental Management*, 290:112544. Disponible en: <<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112544>>.
- Tolve, R., G. Pasini, F. Vignale, F. Favati y B. Simonato (2020), "Effect of grape pomace addition on the technological, sensory, and nutritional properties of durum wheat pasta", *Foods*, 9(3):354.



Dorian Antonio Bautista-Hernández

El desarrollo orientado al transporte (DOT) y su aplicación en México

Los retos que nuestras ciudades enfrentan requieren de estrategias de planeación que integren las políticas de uso de suelo urbano y de transporte. El DOT –desarrollo orientado al transporte– es una visión que permite un avance en este sentido, pero es preciso reflexionar sobre las implicaciones institucionales y conceptuales de su adaptación a nuestro país.

El concepto DOT fue acuñado por el arquitecto Peter Calthorpe a finales de los ochenta en EE. UU., al plantear su visión de diseño barrial en las cercanías de estaciones de transporte público (me refiero al transporte masivo y semimasivo). Dicho enfoque remarcaba la importancia de incrementar la densidad, la diversidad de usos y la provisión de infraestructura para la movilidad no motorizada. La idea era crear ambientes urbanos donde el transporte público pudiera competir con el uso del carro privado y así desincentivar la motorización y la expansión de las ciudades.

El Center for Transit-Oriented Development (CTOD, 2008) define los principios del DOT en los siguientes términos: maximizar el uso del transporte público, participación comunitaria, calles completas, vivienda asequible, espacios públicos de calidad, captura de plusvalía y manejo de espacios de estacionamiento. Un proyecto de DOT regularmente considera una milla (1.6 km) alrededor de la estación. Una visión global y ambiciosa de DOT se refiere al cumplimiento cabal de dichos principios; sin embargo, es común que en la realidad ciertas zonas de interés sólo lo cumplan parcialmente.

Desde que se propuso hasta la fecha, en EE. UU. el DOT ha sido central en el diseño de políticas de transporte y ha permitido integrar las políticas de uso de suelo urbano al tema de la movilidad. Es tal su importancia en dicho país que prácticamente cada agencia de transporte metropolitano tiene su oficina de DOT. Es decir, más allá de su principal función como operadoras de transporte, dichas agencias también inciden en asuntos de uso de suelo urbano. En el ámbito de



la planeación se han publicado diversos documentos profesionales que exponen las mejores prácticas que se han identificado. Y en la academia también existe una amplia literatura enfocada a entender la relación del DOT con diversos fenómenos urbanos, como el comportamiento de viaje, la gentrificación, el valor del suelo, etc. A continuación, expongo tres aspectos centrales del DOT, junto con una reflexión sobre su aplicación en México.

Crecimiento económico y DOT

 El DOT busca maximizar los beneficios –sociales, económicos y ambientales, indirectos y no monetarios– de los proyectos de transporte urbano, los cuales suelen requerir para su construcción de inversiones cuantiosas por parte de los gobiernos e incluso, una vez en operación, es común que sigan requiriendo de recursos gubernamentales. El dinero generado por los pasajes suele ser insuficiente aun para la operación. Por esta razón, es importante maximizar dichos beneficios para justificar la ejecución de estos proyectos a través de la correcta operación y posible expansión del sistema.

La erogación de enormes recursos para la construcción de sistemas de transporte también se suele justificar con su efecto para impulsar el crecimiento económico regional. Aquí es necesario distinguir el crecimiento producto del gasto constructivo, del que se genera como producto de los beneficios de movilidad –o accesibilidad en un sentido más amplio–, una vez que está en operación el proyecto. En el primer caso, el impulso al crecimiento será temporal y directamente proporcional al gasto en construcción. En el segundo caso, el impacto será efectivo y a largo plazo en la medida en que se haya identificado la falta de accesibilidad espacial como factor limitante del crecimiento. Aquí asumimos que los otros factores que inciden en dicho crecimiento están presentes. El peor de los escenarios sería invertir grandes recursos gubernamentales en proyectos que en el largo plazo tengan un impacto muy limitado. Dadas las grandes demandas en otros rubros sociales, la identificación de las necesidades más apremiantes de transporte urbano es vital para un correcto uso de los fondos

públicos, en la búsqueda de beneficiar a la mayor cantidad posible de personas cuyos tiempos de viaje resulten excesivos. Es común que en las discusiones sobre los planes de extensión de los sistemas de transporte masivo surjan varias alternativas de rutas, las cuales podrían tener mérito propio en algún sentido. Sin embargo, dados los recursos finitos, siempre tendremos que aplicar esquemas de priorización.

Las zonas contiguas a los proyectos de transporte –en general, público o de infraestructura vial– son las más beneficiadas en términos de la mejora en la movilidad y accesibilidad; por ende, también suelen concentrar la actividad económica. Investigaciones al respecto han sugerido que más que fomentar en general el crecimiento regional, los sistemas de transporte lo redistribuyen espacialmente (Giuliano y Agarwal, 2017). Esto explica los círculos virtuosos presentes en zonas que concentran tanto oportunidades urbanas –empleo, educación, mejor vivienda, etc.– como una mejor infraestructura de transporte y, por otro lado, los círculos viciosos en zonas que quedan rezagadas en la ciudad. Las visiones tradicionales de planificación de transporte suelen minimizar en el caso de estas últimas las necesidades de transporte urbano de calidad.

Los beneficios económicos de un sistema de transporte no aparecen de manera inmediata y automática; para ello es necesaria una planificación del entorno. Aquí también es preciso identificar cómo se distribuyen dichos beneficios. Un ejemplo de esto son las plusvalías. Las mejoras en accesibilidad provocan que las empresas o individuos estén dispuestos a ofertar más dinero por la propiedad en estas zonas, por lo que existe un potencial aumento del valor de este suelo. Desde el punto de vista de las finanzas públicas, es importante que este valor creado por la infraestructura pública tenga conductos de retorno a las entidades públicas y no sólo se quede en manos de agentes privados. Un proyecto de DOT implica aplicar mecanismos para la restitución de dichas plusvalías a través de diferentes tipos de **asociaciones público-privadas**. Existe literatura que analiza los beneficios y limitaciones de dichos mecanismos.

Un problema particular en México es la conocida vendimia informal, que en caso de no ordenarse

Asociaciones público-privadas
Acuerdos a largo plazo entre el gobierno y empresas privadas para desarrollar infraestructura y servicios públicos, donde se comparten inversiones, responsabilidades y riesgos.

y regularse suele ser un elemento desalentador para que residentes y negocios formales busquen la cercanía a las estaciones de transporte, y, por lo tanto, constituye una barrera para la creación de valor para la ciudad. Por tal motivo, es importante que una visión de DOT considere la exploración de diferentes estrategias para regular el comercio informal y para hacerlo parte del diseño barrial.

■ Crecimiento urbano y DOT

■ La planeación urbana no sólo se refiere a limitar el crecimiento inmobiliario, formal o informal, en circunstancias de algún tipo de riesgo natural, sino sobre todo se trata de establecer donde sí y cómo es deseable que ocurra el crecimiento urbano. En nuestro contexto actual de dispersión del suelo urbano de baja densidad en las periferias y de falta de vivienda asequible en el centro de la ciudad, debería ser un principio de política pública, como contramedida a dicha tendencia, el fomento de la densidad residencial a lo largo de corredores de transporte público, eliminando cualquier requisito sobre lugares de estacionamiento, así como las barreras de zonificación existentes.

El alcance del DOT tiene varias implicaciones mucho más transformadoras para nuestras ciudades. Por ejemplo, también incide sobre dónde esperamos que los nuevos sistemas de transporte se construyan. Así pues, el despliegue de nuevas líneas, ya sea del metro (principalmente) o Metrobús-BRT, debería considerar la conexión de zonas de atracción de viajes —comúnmente bien abastecidas de transporte— hacia las periferias, donde se presentan las mayores necesidades y costos (tiempo y dinero) de viaje intrametropolitanos. En este sentido, a continuación hago énfasis en los matices que implicaría el DOT.

Se fomentaría que un extremo de las líneas de transporte llegara a las zonas núcleo de las áreas dormitorio, y no, como sucede actualmente en el caso del metro, sólo a las fronteras municipales —signo de falta de gobernanza metropolitana—. De hecho, se ha documentado para nuestras ciudades cómo amplias zonas de estratos socioeconómicos bajos y medio-bajos regularmente están desprovistas de la mejor in-



fraestructura de transporte. Es así como una visión de DOT debería enfatizar la necesidad de remediar esto. Desde un punto de vista de equidad, implica desplegar mejores inversiones en las zonas que más lo necesitan en el origen del viaje, y no sólo en el destino.

Las megaciudades de los países en desarrollo suelen tener zonas centrales muy dominantes como resultado del uso del principio de **economías de aglomeración**, dadas las limitantes para la expansión de la infraestructura de transporte. Por ello, ante la expansión urbana y los grandes costos de viaje de los residentes en las periferias, algunas de ellas densamente pobladas, es que la creación de subcentros hacia estas zonas debería ser a largo plazo una medida de manejo de demanda para minimizar las distancias medias de viaje.

Como el lector sabrá, la construcción de líneas de metro, o tren ligero, son mucho más costosas que las líneas de metrobuses (sistema BRT, por sus siglas en inglés). Del mismo modo, los impactos esperados —antes descritos— en el caso del metro son de mucho mayor significancia que en el caso del sistema BRT. En el debate que comúnmente emerge con relación a la decisión sobre uno u otro tipo de sistema, es fundamental entender en el caso específico (ruta proyectada) el potencial de una línea como factor de reconfiguración de la estructura económica de la metrópolis (con el metro) contra sólo el aumento de movilidad en un corredor particular (con el sistema BRT). Así pues, las diferentes opciones de rutas deben evaluarse mediante el análisis de su potencial

◀ Economías de aglomeración

Alude a los beneficios económicos (ahorro de costos y aumento de productividad) que se obtienen cuando las empresas y la población se concentran en áreas específicas de la ciudad, típicamente en el centro.



Densificación

Se refiere a permitir una alta proporción de hogares o población por superficie urbana en zonas con las condiciones adecuadas, junto con medidas de diseño, infraestructura y ordenamiento.

para reconfigurar los principales patrones de viaje, reduciendo los tiempos y distancias promedio de viaje, así como de su potencial para el desarrollo de corredores económicos. Es necesario que en México se formen mejores planeadores de transporte con relación al conocimiento del impacto del transporte en la estructura urbana y en la reducción de desigualdades. Dado que las visiones tradicionales de la planificación del transporte han sido una causa importante en la segregación social de nuestras ciudades, el DOT tiene la posibilidad de ser un eje central en las políticas de mitigación de la pobreza urbana.

Nimbysmo

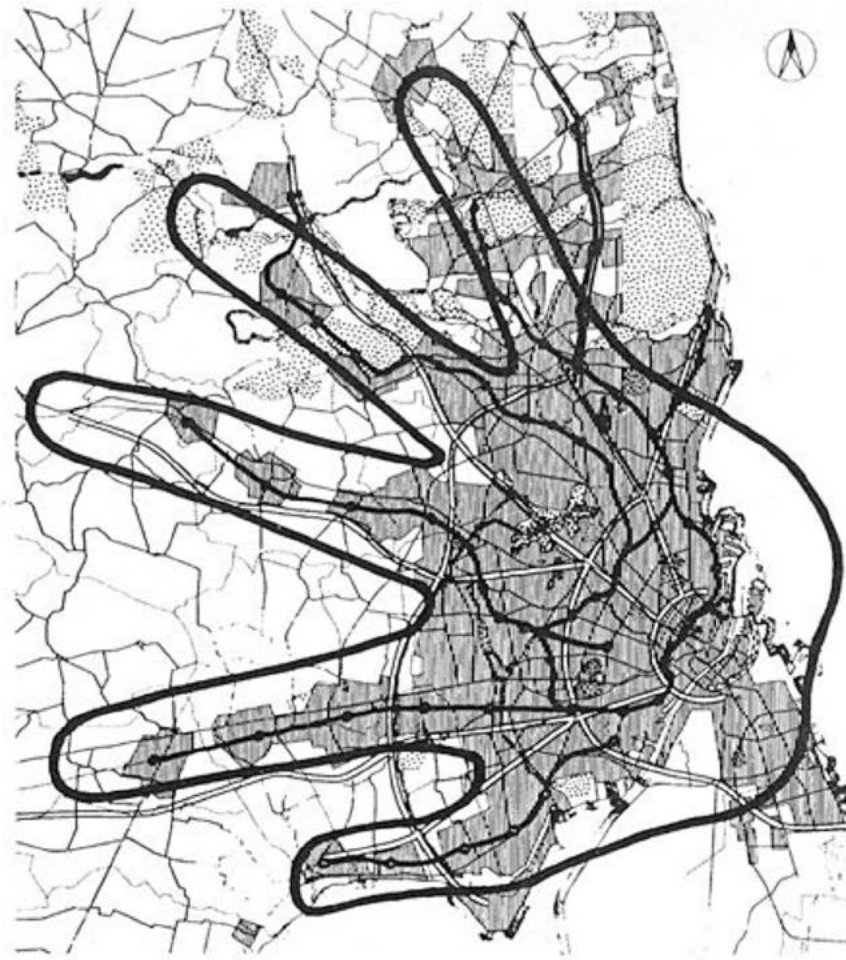
Acrónimo de la frase en inglés "Not in my back yard" ("No en mi patio trasero"). Se refiere a la oposición de residentes locales a proyectos que si bien podrían tener un beneficio público, rechazan por posibles impactos que en ocasiones están poco fundamentados.

El DOT implica incidir no sólo en lotes vacantes –privados o adquiridos por entidades públicas–, sino también explorar otras estrategias, como el uso de los derechos de "aire" para la construcción vertical sobre instalaciones existentes. El DOT ha de buscar consensos, acuerdos y entendimiento de todos los actores, ya sea pequeños propietarios o desarrolladores, para la transformación del área. El famoso *nimbysmo* y el clásico "ya no cabemos en la ciudad" son barreras para la aplicación del DOT que promueva un desarrollo compacto. Es importante comunicar que el aprove-

chamiento de las zonas con infraestructura adecuada para la *densificación* es más viable a largo plazo que proveer de servicios a una mancha urbana cada vez más dispersa. En el caso de un DOT exitoso, un problema que suele surgir es el desplazamiento de población local de bajos recursos –o que antes residía en la zona– debido al encarecimiento de los servicios locales, razón por la cual debe también tenerse presente el objetivo de evitar dicho proceso.

El DOT como integración de política de suelo urbano y transporte

En México se ha avanzado muy poco en el entendimiento de la estrecha interrelación entre el ambiente construido y el comportamiento en los traslados. Es necesario entender cómo, en nuestro contexto, las personas responden y se adaptan a diferentes sistemas de transporte disponibles y usos de suelo, para proponer medidas que incidan como pretendemos; esto es, reduciendo costos de traslado en términos de tiempo, dinero y transbordos. Lamentablemente, en la administración urbana, la de transporte y la de



uso de suelo son dos oficinas totalmente separadas y descoordinadas.

El DOT es, precisamente, una forma de integrar políticas de suelo y transporte. Regularmente, cuando en México se construye una estación de transporte, no hay una intervención, plan o programa que busque una integración adecuada de la estación con su entorno. Dicho vacío provoca que las zonas en cuestión tengan malas condiciones de accesibilidad e interconexión intermodal, hay una apropiación del espacio público, crimen y malas condiciones en general. Todo ello representa un perder-perder para todos como sociedad, de ahí la importancia de la implementación de visiones de planificación proactivas para corregir esto.

Un DOT requiere certidumbre de largo plazo para todos los actores: residentes, empresas, pequeños vendedores, gobierno, etc. Para ello se necesita un marco regulatorio que lo sustente, el cual no existe

en México actualmente. El gobierno local debe ser proactivo en cuanto a revisar zonificaciones que limiten la densificación —o el reajuste del trazo de parcelas si fuera necesario—, lo cual suele ser un trámite engorroso y tardado bajo los procesos actuales.

Una visión de DOT no significa que todas las estaciones deban tener la misma fisionomía. La ubicación de cada estación en relación con la estructura urbana determina sus características. Por ejemplo, en EE. UU. podemos identificar diferentes DOT: en zonas centrales, en barrios urbanos, en nodos suburbanos, etc. Nuestro modelo de ciudad latinoamericana es diferente, por lo que es necesario proponer tipologías de DOT adaptadas a nuestro entorno.

Conclusiones

Para nuestras ciudades mexicanas, el éxito de un DOT podría medirse de diferentes formas. Podríamos



pensar, por ejemplo, en unidades residenciales asequibles, distancias medias al trabajo, recursos provenientes de plusvalías, viajes de trabajo hacia la periferia (el llamado *reverse commuting*; es decir, en sentido contrario a la congestión del tráfico), etc. En fin, lo dejo aquí como una forma de abrir la discusión.

Los proyectos exitosos de DOT no suelen ser de corto plazo y enmarcarse exclusivamente en un periodo electoral. Por el contrario, deben ser de largo plazo y es, por tanto, necesario reconocer que no contamos con el marco institucional que los haga posibles. Tampoco tenemos agencias de transporte que articulen todos los sistemas, ello aunado a la fragmentación administrativa existente en las metrópolis mexicanas. Por último, el tema de la integración de la política de uso de suelo urbano —me refiero a la zonificación— a nivel metropolitano es prácticamente inexistente.

Espero que el presente artículo invite a la reflexión sobre cómo lograr y conceptualizar el DOT en México de cara al futuro; qué podemos hacer con el marco existente y qué sería necesario cambiar. Quisiera suscitar una discusión que nos permita establecer estrategias de planeación más allá de lo que se ha logrado con los CETRAM (centros de transferencia modal) en el caso de la CDMX. Necesitamos mejores debates, fuera de la lucha partidista que suele demonizar cualquier asociación del gobierno con la iniciativa privada criticándola como privatización de lo público, o que tacha de cartel inmobiliario a cualquier iniciativa por densificar. La transparencia y el correcto entendimiento de los mecanismos y acuerdos establecidos será de suma importancia para evitar que los beneficios se queden sólo en agentes privados y lleguen a la ciudad.

Organizaciones como el Instituto de Políticas para el Transporte y el Desarrollo (ITDP, 2013) han

ofrecido algunas ideas sobre el DOT para el país, mientras que la Secretaría de Desarrollo Agrario, Territorial y Urbano (SEDATU, 2023) ha publicado una guía para proyectos piloto. Sin embargo, el debate público al respecto es aún incipiente y no tiene la presencia que debería. Hasta ahora no existe alguna experiencia de DOT en México que sirva como punto de partida para un aprendizaje colectivo. Estamos décadas atrás en relación con otras regiones donde el tema ha alcanzado mayor madurez.

Para mayores referencias, se recomiendan al lector los trabajos de Rodríguez (2021) para el caso de América Latina, y el de Abdi y Lamíquiz-Daudén (2020) para el contexto más general de países en vías de desarrollo.

Dorian Antonio Bautista-Hernández

Instituto de Investigaciones Económicas, Universidad Nacional Autónoma de México.

dobautistah@gmail.com

Lecturas recomendadas

Abdi, M. H. y P. J. Lamíquiz-Daudén (2020), “Transit-oriented development in developing countries: A qualitative meta-synthesis of its policy, planning and implementation challenges”, *International Journal of Sustainable Transportation*, 16(3):195-221.

CTOD (2008), *Station Area Planning: How to Make Great Transit-Oriented Places*, Oakland, Reconnecting America y Center for Transit-Oriented Development. Disponible en: <https://todresources.org/resources/tod-202-station-area-planning-how-to-make-great-transit-oriented-places/>, consultado el 26 de enero de 2026.

Giuliano, G. y A. Agarwal (2017), “Land Use Impacts of Transportation Investments”, en G. Giuliano y H. Susan (eds.), *The Geography of Urban Transportation*, 4.ª ed., Nueva York, The Guilford Press.

ITDP (2013), *Desarrollo Orientado al Transporte. Regenerar las ciudades mexicanas para mejorar la movilidad*, reporte

elaborado por Salvador Medina Ramírez y Jimena Veloz Rosas, México, Instituto de Políticas para el Transporte y el Desarrollo.

Rodríguez, D. A. (2021), *Desarrollo Orientado al Transporte: una evaluación de tendencias y oportunidades para América Latina*, Banco Interamericano de Desarrollo. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.18235/0003802>.

SEDATU (2023), *Proyectos de desarrollo urbano orientado al transporte. Guía de Criterios Técnicos para Seleccionar Proyectos Piloto de Desarrollo Orientado al Transporte* [en línea], Secretaría de Desarrollo Agrario, Territorial y Urbano. Disponible en: <https://www.gob.mx/sedatu/documentos/guia-de-criterios-tecnicos-para-la-seleccion-de-proyectos-piloto-de-desarrollo-orientado-al-transporte?state=published>, consultado el 26 de enero de 2026.

Tales de Mileto: uno de los siete sabios de Grecia

El inicio del pensamiento racional y sistemático para explicar los fenómenos de la naturaleza aparece en el siglo VI a. n. e. en las colonias jonias del Asia Menor. Tales de Mileto es un personaje representativo de este periodo. Predijo un eclipse de Sol en el año 585 a. n. e. y fue el primero en establecer un conjunto de proposiciones geométricas de carácter abstracto y general.

Introducción

El firmamento y los fenómenos naturales captaron la atención de las primeras civilizaciones humanas ([Figura 1](#)), llevándolas a inventar historias para tratar de explicar cómo estaba construido el Universo. Aparecen así las primeras cosmologías, utilizando dioses antropomórficos para este propósito.

En la antigua cosmología sumeria, por ejemplo, el gran Enlil, el dios del aire, aparece arrancando la montaña que contiene al cielo y a la Tierra. La cosmología egipcia ([Figura 2](#)), por otra parte, nos muestra un universo circundado por Nut, la diosa del firmamento, quien aparece en la parte superior con el cuerpo cubierto de estrellas. Los antiguos egipcios creían que noche a noche Nut se tragaba al Sol y lo devolvía a la mañana siguiente. Debajo de ella, está Shu, dios del aire, quien muestra en las manos los atributos de la inmortalidad, y debajo de él, con el cuerpo cubierto de hojas, descansa Geb, dios de la Tierra. Las barcas que aparecen a los lados del dibujo conducían al Sol en su viaje por el firmamento. En otra parte del mundo, una cosmología india suponía que la Tierra se hallaba sostenida por elefantes cuyos movimientos causaban los terremotos; debajo de ellos, había una gran tortuga, encarnación del dios Visnú, que descansaba sobre una cobra, símbolo del agua.

Ahora bien, los pensadores griegos adoptaron una actitud hacia la naturaleza totalmente nueva. Fue un enfoque racional que trascendía el pensamiento mágico y la mitología. Y uno de los puntos clave de este viraje fue que vieron que detrás del incesante cambio había un orden y la posibilidad de entender los fenómenos naturales mediante la razón.

Los fenómenos de la naturaleza eran inexplicables o se atribuían a la voluntad y el capricho de los dioses, quienes sólo podían ser aplacados con oraciones, sacrificios y otros ritos. Los babilonios y los egipcios, cuyas civilizaciones ya eran notables desde el año 3000 a. n. e., observaron algunas periodicidades en los movimientos del Sol y la Luna. Con estos datos, construyeron sus calendarios, pero no fueron capaces en aquel entonces de ver en tales periodicidades significaciones más profundas.

De todos los triunfos del pensamiento especulativo de los griegos, el más novedoso fue su concepción de que el **cosmos** opera de acuerdo con unas leyes matemáticas al alcance del pensamiento humano.

Por otra parte, las matemáticas antiguas de los babilonios y egipcios, en su empleo de números y figuras geométricas, son anteriores en miles de años a la obra de los griegos clásicos. Muchas civilizaciones pasadas, además de las ya mencionadas, contribuyeron a las matemáticas en este sentido amplio. Pero es intere-

Cosmos

En griego *kosmos* significa, además de "mundo", orden y armonía.



Figura 1. El firmamento.

sante el hecho de que en todas estas civilizaciones, a excepción de la griega, estas matemáticas casi no estaban diferenciadas de otras disciplinas, no tenían



Figura 2. Cosmologías antiguas.

una metodología propia ni un interés para algo más allá que las actividades inmediatas y prácticas. Eran sólo una herramienta, un conjunto de reglas sencillas y desconectadas que permitían que la gente resolviera problemas de la vida diaria, como los relacionados con la agricultura, el calendario y el comercio. Estas reglas se obtenían mediante el tanteo, el ensayo y error; además de que muchas de ellas sólo eran aproximadamente correctas. Se puede decir, por ejemplo, que estos conocimientos o prácticas en el caso de los babilonios y egipcios eran una especie de matemáticas empíricas y fueron un antecedente importante del trabajo en este ámbito de los griegos.

Tales de Mileto

La forma nueva de enfrentar y tratar de entender la naturaleza que adoptaron los griegos se inició en las ricas y prósperas colonias jonias, a orillas del mar Mediterráneo, en el Asia Menor, en lo que actualmente es Turquía. Figura emblemática de este proceso fue Tales (624-546 a. n. e.), quien nació en la ciudad de Mileto (**Figura 3**), próspera colonia jonia en el

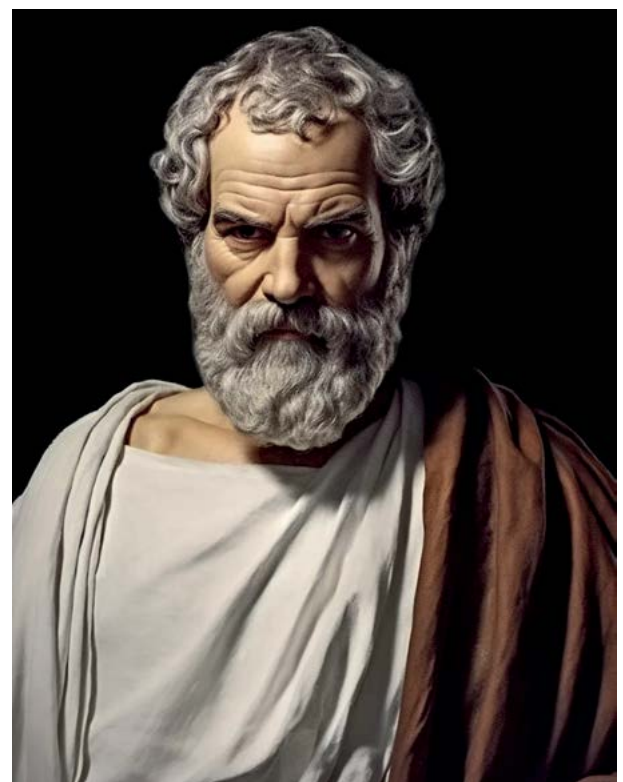


Figura 3. Tales de Mileto.



GRECIA

ATENAS

CRETA

TURQUÍA

MILETO
624 a. C.

Asia Menor. Fue hijo de Examio y Cleóbula, ambos originarios de Fenicia. Junto con Anaximandro (610-546 a. n. e.) y Anaxímenes (590-525 a. n. e.), todos ellos de Mileto, los tres constituyen la Escuela de los Milesios o de Mileto, cuyo pensamiento se caracterizaba por la idea de que lo más importante era conocer de qué estaba hecho el Universo. Consideraron que éste estaba hecho de una materia primigenia *arché* (ἀρχή), que era el origen de todo. Tales pensaba que ese principio era el agua; Anaximandro, que era una sustancia que no tenía límites, exteriores ni interiores, llamada *ápeiron* (que significa literalmente “sin límites”), y Anaxímenes, que era el aire. Es por ello que su filosofía se conoce como **monismo** materialista.

Monismo ► Doctrina filosófica que sostiene que el origen del Universo consiste de una sola sustancia, principio o realidad fundamental.

En el caso de Tales, el argumento para elegir el agua como la materia primigenia del Universo parecía muy razonable, ya que las nubes, la niebla, el granizo, el rocío y la lluvia son formas del agua y ésta es necesaria para la vida: nutre las plantas y es indispensable para la vida animal, incluso el cuerpo humano está constituido en buena medida de agua. Tales construyó una cosmovisión que consistía en considerar la Tierra como un disco plano que flotaba en el agua sempiterna, de la que había surgido. Señalaba que el agua nutría a la vida en la Tierra, e infirió también que el firmamento —donde se origina la lluvia— debía estar formado por agua evaporada. Es decir, el agua no solamente circundaba la Tierra, sino que cercaba la bóveda celeste, un vasto hemisferio que contenía al Sol, la Luna, los planetas y las estrellas. Tales sacó sus deducciones de observaciones sencillas, y al parecer razonables, sin invocar a los dioses para explicar su universo.

Tales fue uno de los Siete Sabios de Grecia y participaba activamente en el gobierno de su ciudad. Se le atribuyen estudios en temas de filosofía, matemáticas, astronomía y física. Amasó una fortuna considerable mediante el comercio del aceite de oliva. Viajó mucho por todo el Mediterráneo y tuvo estrechos contactos con las viejas matemáticas y la astronomía de las culturas egipcia y babilonia, civilizaciones en las que se había utilizado una geometría rudimentaria para el deslinde de los terrenos y las construcciones,

simplemente como herramientas prácticas de recuento y medición. También se tenían registros sobre fenómenos astronómicos como eclipses de Luna y de Sol, que muy probablemente conocía Tales, dados los frecuentes y extensos viajes que realizaba. Estos registros sólo eran listas ordenadas de fenómenos astronómicos, pero no representaban ningún modelo del Universo, teoría o reflexión sobre cómo estaba formado, y no tenían ninguna significación más profunda.

A Tales se le atribuye la predicción de un eclipse de Sol en el año 585 a. n. e. (**Figura 4**). Si bien en algún momento hubo dudas sobre la veracidad de esta predicción, se encontró que Tales sí pudo haber realizado este pronóstico, dada la información que poseía sobre los ciclos de los eclipses lunares y solares, la cual había obtenido de sus estudios con sacerdotes egipcios.

Tales también es protagonista de algunas leyendas que hablan de su personalidad y de sus intereses. Una de ellas es la que nos narra que por caminar mirando las estrellas se cayó en un pozo, en cuyo fondo pasó varias horas, hasta que lo rescató una esclava tracia.

Otra leyenda relativa a Tales, y que también habla de sus intereses, es la que narra el origen de su fortuna, adquirida con el comercio de aceite de oliva. Aristóteles relata cómo en una ocasión le reprocharon a Tales su pobreza y falta de interés por los asuntos materiales —recuérdese la anécdota del pozo—, y para dejar de ser objeto de burlas por parte de sus conciudadanos previó, gracias a sus conocimientos astronómicos y meteorológicos, que habría una abundante cosecha de aceite en la siguiente temporada, de modo que compró durante el invierno todas las almazaras o prensas de aceite de Mileto y Quíos y, con ese monopolio, obtuvo grandes beneficios alquilándolas al llegar la época de recolección; acumuló una gran fortuna y mostró que los filósofos podían ser ricos si lo desearan, aunque sus ambiciones estaban en otra dirección.

Es sabido que los egipcios registraban con mucho celo todo evento astronómico o meteorológico excepcional, siempre por motivos religiosos, de modo que contaban, en consecuencia, con copiosa in-



Figura 4. Eclipse de Sol en el año 585 a.n.e.

formación al respecto. Los egipcios también poseían técnicas que desarrollaron a nivel práctico con la finalidad de medir y delinear parcelas de tierra cuyos límites se borraban con las frecuentes crecidas del río Nilo.

Una fuente vincula a Tales con Pitágoras, a quien recomendó viajar a Egipto y educarse con los sacerdotes de Menfis y Dióspolis. Según Heródoto, Tales logró desviar el río Halys para que el ejército de Creso pudiera cruzarlo (los especialistas modernos no descartan esa posibilidad).

Además de todo lo anterior, una de las obras más importantes que distinguen a Tales como el primer filósofo de Occidente es aquella donde enuncia un conjunto de proposiciones geométricas de carácter abstracto y general —que más tarde aparecerán en los

Elementos de Euclides—, a diferencia del conocimiento previo que era empírico y concreto dada su aplicación a cuestiones específicas y cotidianas.

Éstas fueron cinco proposiciones geométricas abstractas y generales (**Figura 5**):

- Un círculo es bisectado por cualquiera de sus diámetros.
- En un triángulo isósceles los dos ángulos opuestos a los lados iguales son iguales.
- Al intersectarse dos líneas rectas, los ángulos opuestos son iguales.
- Todo ángulo inscrito en un semicírculo es un ángulo recto.
- Dos triángulos que tienen dos lados iguales y el ángulo entre ellos es igual son congruentes.

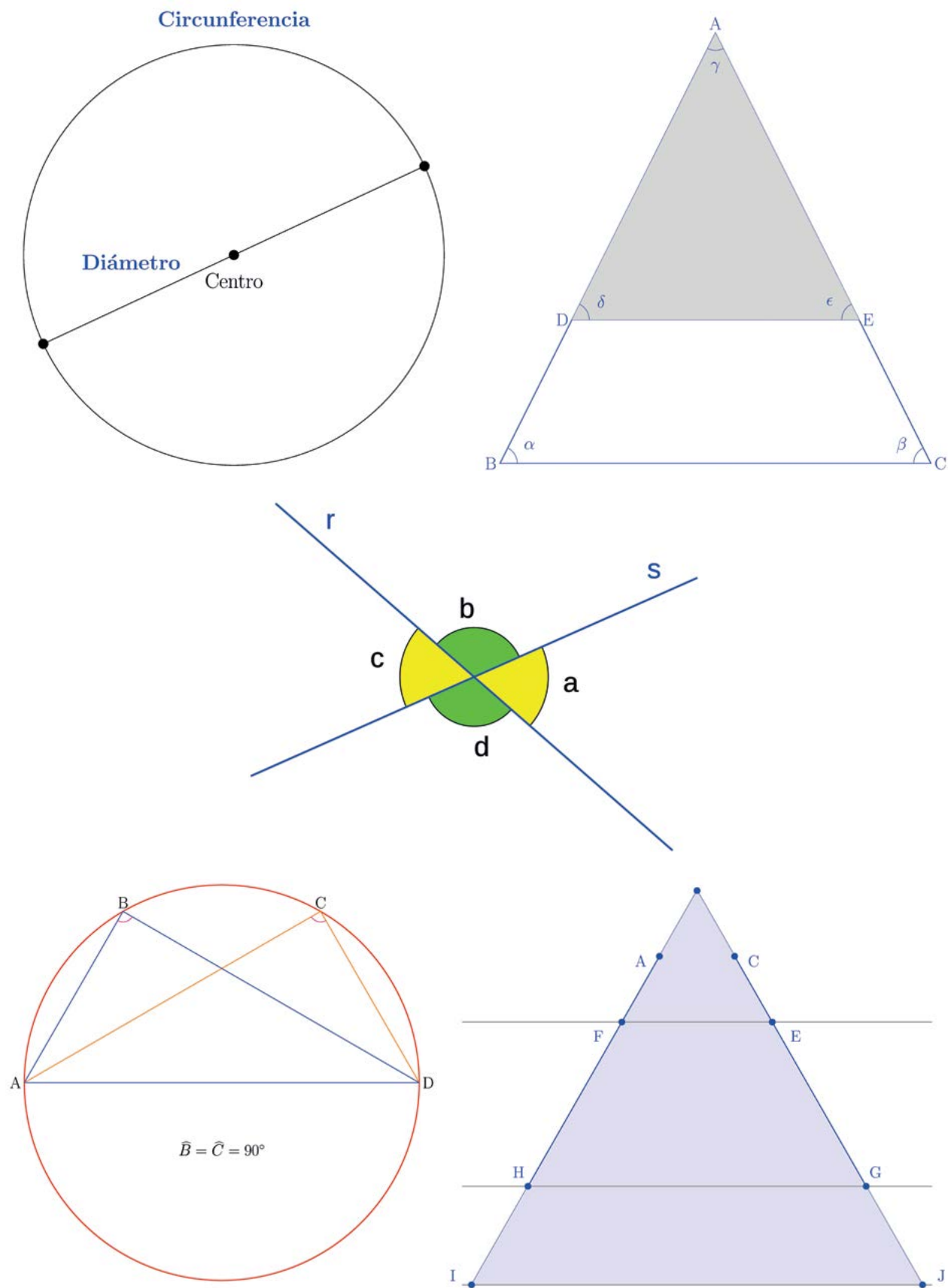


Figura 5. Cinco proposiciones geométricas abstractas y generales enunciadas por Tales.

Es también conocida la leyenda de que Tales se percató de que, a cierta hora del día, la longitud de su sombra era igual a su estatura. Utilizando este hecho calculó la altura de las pirámides cuando sabía que su sombra tenía la misma longitud que su altura.

Respecto a la fecha de su muerte existen diferentes versiones. Apolodoro señala que murió a la edad de 78 años. Sosícrates, que murió en la LVIII Olimpiada a los 90 años. Sin embargo, comúnmente se acepta que murió en el año 546 a. n. e.

En las civilizaciones antiguas, las respuestas generalmente aceptadas para intentar entender la diversidad de los fenómenos naturales eran dadas por los dirigentes religiosos. La antigua civilización griega es la excepción. Lo que los griegos descubrieron fue la fuerza de la razón. Esta idea alcanzó su apogeo durante los años que van del 600 al 300 a. n. e.

A partir de los filósofos jonios son rechazadas la mitología y la creencia de que los dioses manejaban a los seres humanos y al mundo físico de acuerdo con sus caprichos. Y aunque la cultura griega tuvo

influencias externas —ya que los pensadores griegos viajaron y estudiaron en Egipto y Babilonia, como se ha referido fue el caso de Tales de Mileto—, pasó por un periodo de gestación en la favorable atmósfera intelectual de Grecia. Tal como señala el matemático Morris Kline: “Lo que los griegos crearon difiere tanto de lo que aprendieron de los demás como el oro de la hojalata”.

José Luis Álvarez García

Departamento de Física, Facultad de Ciencias, UNAM.

josel.alvarezgarcia@gmail.com

Lecturas recomendadas

Bergamini, D. (1971), *Matemáticas*, 3.ª ed., México, Colección Científica de Time-Life.

Guthrie, W. K. C. (1982), *Los filósofos griegos. De Tales a Aristóteles*, México, Fondo de Cultura Económica.

Klein, M. (2000), *Matemáticas. La pérdida de la certidumbre*, 5.ª ed., México, Siglo XXI.

Koestler, A. (1981), *Los sonámbulos*, México, Conacyt.



Casa abierta al tiempo

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA METROPOLITANA

Estimadas personas lectoras de la revista *Ciencia*, el Premio a la Investigación de la Universidad Autónoma Metropolitana (UAM) es el reconocimiento más importante al trabajo académico que otorga esta casa de estudios por la elaboración de trabajos de investigación originales publicados entre 2023 y 2024.

En la categoría de Ciencias Básicas e Ingeniería, el doctor Carlos Castillo-Araiza y el equipo del Laboratorio de Ingeniería de Reactores Catalíticos de la Unidad Iztapalapa nos invitan a conocer cómo pasan los descubrimientos de un tubo de ensayo a producir las toneladas de materiales que mueven al mundo. Durante décadas, la industria química priorizó la producción masiva ignorando el inmenso impacto ecológico. Hoy, la crisis climática exige procesos sostenibles. Sin embargo, escalar una reacción de un pequeño laboratorio a una “megafábrica” es un reto colosal donde la eficiencia suele colapsar. Aquí interviene la ingeniería de reactores: uniendo ciencia experimental y simulaciones computacionales, la disciplina rediseña las fábricas para crear productos indispensables gastando menos energía y reduciendo la contaminación.

En las Ciencias Biológicas y de la Salud, el doctor Silvestre Alavez Espidio, junto con el grupo de Intervenciones Farmacológicas en el Envejecimiento de la UAM, investigan cómo ante el aumento global de la esperanza de vida, se puede lograr un envejecimiento saludable y evitar el deterioro cognitivo o físico. La clave podría estar en los *geroprotectores*, sustancias naturales capaces de retrasar el envejecimiento a nivel celular. Un prometedor candidato es el ácido vanílico, un compuesto natural presente en frutas, cereales e incluso en la cerveza. Investigaciones recientes revelan que este metabolito logra prolongar la vida de gusanos de laboratorio (*C. elegans*) en casi un 50 % y frena las proteínas tóxicas asociadas a enfermedades neurodegenerativas como la del Alzheimer.

La idea de la desaparición del libro impreso se aborda en la investigación premiada en la categoría de Ciencias y Artes para el Diseño. El doctor Gerardo Kloss Fernández del Castillo relata cómo, desde la génesis del cine hasta los albores de la inteligencia artificial, cada nueva tecnología revive el temor de que la palabra impresa se extinga. Sin embargo, un análisis del sector editorial revela que hoy leemos y escribimos más que hace veinte años, sólo que de formas distintas. El debate no debe centrarse en qué dispositivo reemplazará al papel, sino en cómo cambian nuestras prácticas sociales de lectura en un mundo donde pasamos de lectores pasivos a creadores de contenido. En definitiva, el libro no está muriendo; simplemente se está transformando su formato, su soporte y el lugar simbólico que ocupa en nuestra sociedad.

“La evaluación de las políticas públicas significa valorar los cursos de acción de las decisiones de gobierno, por ello es un tema con un alto contenido técnico y político”, puntualiza la doctora Santizo Rodall en la investigación premiada en el área de las Ciencias Sociales y Humanidades. Al evaluar la educación, los gobiernos no sólo miden calificaciones, sino que reflejan sus valores, conflictos y prioridades sociales. El libro premiado analizó cómo Brasil, Colombia y Estados Unidos evalúan sus políticas educativas a largo plazo, demostrando que este proceso va mucho más allá de una revisión técnica. El verdadero propósito de estas evaluaciones es entender cómo se toman las decisiones públicas para mejorar el sistema, fomentar la equidad, incluir a la sociedad y adaptar las políticas a la realidad de cada país.

La Universidad Autónoma Metropolitana, como universidad pública, autónoma y de carácter nacional, genera investigación de vanguardia que mejora la calidad de vida, impulsa la innovación tecnológica, fortalece la cultura y contribuye a la construcción de sociedades más justas y sostenibles. Con este Premio a la Investigación, la Universidad no sólo reconoce la excelencia académica de su comunidad, sino que reafirma su compromiso con el conocimiento que transforma realidades, dialoga con los grandes desafíos de nuestro tiempo y pone las ciencias, las artes, el diseño y las humanidades al servicio de la sociedad. Así la UAM transforma el conocimiento en bienestar y prosperidad, para, desde el presente, con capacidad de agencia, diseñar y construir el futuro deseable.

In Calli Ixcahuicopa – Casa abierta al tiempo

Prof. Dr. Gustavo Pacheco López
RECTOR GENERAL



Carlos O. Castillo Araiza, José Guillermo Rivera de la Cruz y José F. Durán Pérez



De moléculas a megafábricas. ¿Cómo se diseñan las transformaciones químicas que mueven el mundo?

La ingeniería de reactores adapta transformaciones químicas del laboratorio a la escala industrial. Usando simulaciones y experimentos, busca optimizar la eficiencia energética y el aprovechamiento de materias primas. Su meta es diseñar megafábricas seguras y sostenibles para reducir el impacto ambiental frente a la actual urgencia climática.

Introducción

La manera en que se obtienen productos químicos en la industria está cambiando. Durante décadas, el desarrollo tecnológico se apoyó en procesos muy eficientes desde el punto de vista económico, pero costosos para el medio ambiente. Altos consumos de energía, emisiones de gases de efecto invernadero y grandes volúmenes de residuos se aceptaron como el precio inevitable del crecimiento industrial. Hoy sabemos que ese enfoque ya no es viable. La urgencia climática y el uso acelerado de los recursos naturales obligan a repensar cómo se diseñan las transformaciones químicas que sostienen nuestra vida cotidiana.

En este nuevo escenario, no basta con “descubrir” nuevas transformaciones químicas, también hay que aprender a estudiarlas mejor. Se requieren rutas que funcionen a temperaturas más bajas, que aprovechen mejor las materias primas, que generen menos **subproductos** y que puedan integrarse con fuentes de energía más limpias. La ciencia ofrece muchas alternativas, pero su impacto real depende de una condición clave: que puedan operar de forma estable y eficiente en un **sistema de producción industrial**.

En el pizarrón y en el laboratorio, una transformación química puede parecer ideal. Con equipos pequeños es posible controlar con facilidad la temperatura, ajustar la mezcla de **reactivos** y observar resultados prometedores. Sin embargo, cuando esa misma transformación debe producir toneladas del producto cada día, la realidad cambia de manera drástica. Lo que era eficiente a pequeña escala puede volverse inestable, perder selectividad o incluso generar riesgos en una planta industrial. En ese punto, el reto deja de ser únicamente científico y se vuelve un desafío de ingeniería.

Subproductos

Sustancias no deseadas que se forman además del producto principal.

Sistema de producción industrial

Conjunto de equipos y operaciones que permiten fabricar un producto a gran escala.

Reactivos

Sustancias que entran al proceso y se consumen durante la transformación.

Aquí entra en escena la **ingeniería de reactores**. Su objetivo es transformar una idea planteada en el pizarrón en un sistema de producción industrial responsable con el planeta, y para lograrlo estudia cómo se comportan los fluidos, cómo se transportan la materia y la energía, cuánto tiempo deben permanecer los reactivos dentro del **reactor** y bajo qué condiciones de operación se alcanza el mejor desempeño. La meta no es sólo que la transformación ocurra, sino que ocurra con el menor consumo de energía posible, con el máximo aprovechamiento

de la materia prima y con el menor impacto ambiental.

Esta disciplina opera en un punto de encuentro: conecta termodinámica, química, física y matemáticas para diseñar reactores industriales (**Figura 1**). Esa integración permite unir el comportamiento de las moléculas a nivel conceptual con su implementación en condiciones reales. Por eso, el reactor se convierte en el corazón de la producción industrial: su diseño afecta el costo, la seguridad y la huella ambiental del proceso, desde cuánta energía se consume hasta cuántos residuos se generan.

Ingeniería de reactores

Disciplina que diseña y optimiza reactores para operar de forma estable, segura y eficiente a escala industrial.

Reactor

Equipo donde ocurre una transformación química bajo condiciones controladas.

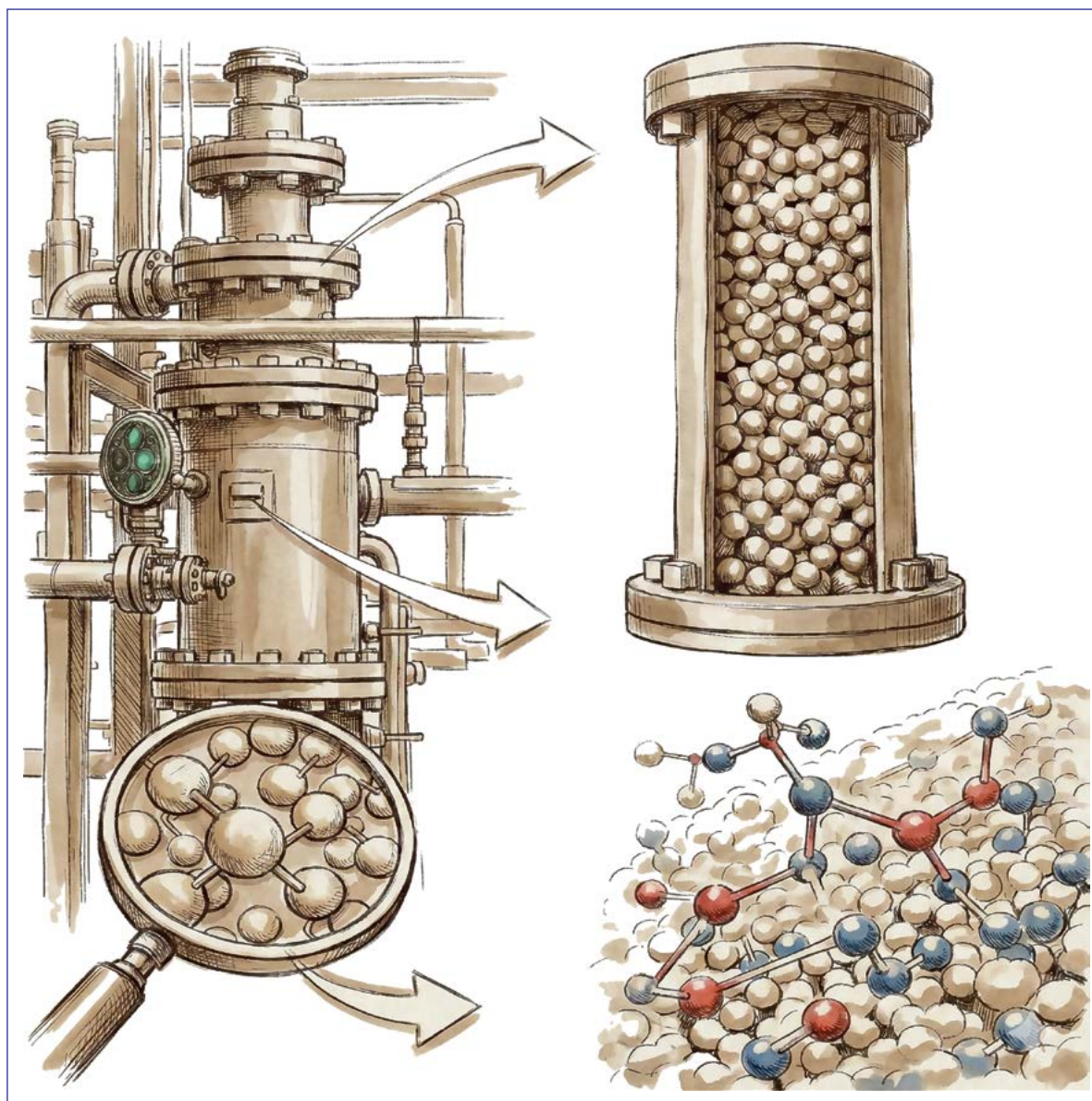


Figura 1. Representación esquemática de un reactor catalítico en el que tiene lugar una transformación química. Se ilustra la configuración macroscópica del sistema de reacción y, a escala microscópica, la estructura del catalizador y las moléculas que participan en la reacción para obtener el producto deseado. Crédito: Joaquín González Vázquez, con apoyo de inteligencia artificial.

■ Objetivos de la investigación

■ El objetivo de esta investigación es explicar, de manera clara y accesible, cómo una transformación química pasa del pizarrón a un sistema de producción industrial a gran escala. Se busca mostrar que no basta con saber “qué reacciona con qué”, sino que es necesario comprender cómo esa transformación se vuelve viable cuando debe operar de forma continua y producir grandes cantidades sin perder eficiencia ni seguridad.

En este contexto, la ingeniería de reactores funciona como el puente entre la idea científica y la megafábrica, con una meta central: obtener el producto con mayor eficiencia, menor consumo de energía y menor impacto ambiental. Como ejemplo de estudio se considera la oxidación de moléculas específicas en el etano para producir etileno, compuesto de interés social, ya que es esencial para la fabricación de plásticos y numerosos productos de uso cotidiano.

■ Metodologías de la investigación

■ Llevar una transformación química del pizarrón a la industria requiere entenderla en distintas etapas y escalas. El proceso comienza con el análisis conceptual: se identifican rutas químicas posibles, se definen los productos deseados y se anticipan subproductos. Después, estas ideas se prueban y depuran en el laboratorio, combinando experimentos instrumentales y simulaciones computacionales.

En el laboratorio experimental se realizan pruebas con sistemas reales: mezclas de gases o líquidos alimentan reactores donde ocurre la transformación bajo condiciones controladas de temperatura, presión y composición. Se miden el porcentaje y la efectividad de obtención del producto deseado, la eficiencia de la operación y se observa cómo responde el sistema cuando se ajustan variables como el flujo, la proporción de mezclas o el **tiempo de contacto** con el equipo de laboratorio.

En paralelo, el laboratorio computacional permite explorar lo que no se ve directamente en un experimento: por ejemplo, cómo interactúan moléculas y superficies, qué pasos son más lentos o qué rutas favorecen la obtención de productos no deseados. Las

simulaciones pueden hacerse a distintos niveles; en algunos casos se trabaja a escala atómica con métodos basados en mecánica cuántica. Estas herramientas ayudan a responder preguntas clave: ¿qué rutas son posibles?, ¿qué pasos controlan la velocidad a la que ocurre la transformación química?, ¿qué cambios podrían mejorar la obtención del producto deseado sobre otros?

Un concepto central que conecta ambas aproximaciones es la cinética química; es decir, los parámetros y modelos matemáticos que permiten calcular la velocidad a la que se forman los productos y, con ello, predecir cuánto se producirá en un día, una semana o un año. Una analogía útil es la aceleración de la gravedad: conocer un valor físico permite estimar el tiempo de caída de un objeto; de manera similar, contar con un **modelo cinético** permite estimar la producción a lo largo del tiempo. Sin embargo, estos modelos deben validarse con experimentos, porque el comportamiento real puede diferir del comportamiento idealizado en simulaciones. Este proceso de refinamiento no es un lujo, ya que facilita la obtención de parámetros confiables que permiten dimensionar reactores industriales con mayor certidumbre, reducir riesgos operativos y evitar diseños ineficientes. En otras palabras, conocer la química no basta: hay que entender cómo se comporta cuando se enfrenta a las condiciones reales de operación industrial.

■ Innovación de la investigación

■ La innovación de este enfoque consiste en conectar, desde el inicio, dos perspectivas que a menudo se tratan por separado: lo que ocurre a nivel molecular y lo que ocurre cuando esa misma transformación debe operar de manera continua y producir toneladas al día. En lugar de estudiar primero la química y después adaptarla a la ingeniería, se integran directamente los experimentos en reactores de laboratorio con modelos matemáticos y simulaciones. Esta integración es necesaria porque el mundo real de una planta industrial no se parece al laboratorio.

Al combinar información de distintas escalas, es posible una identificación temprana de las rutas que

Modelo cinético

Conjunto de parámetros y ecuaciones que describen qué tan rápido ocurre una transformación y permiten predecir producción en función del tiempo.

Tiempo de contacto (o residencia)

Tiempo promedio que los reactivos permanecen dentro del reactor.

favorecen el producto deseado, qué condiciones disparan la creación de otros productos no deseados y otros límites físicos que dominarán en el desempeño final del reactor. Además, las simulaciones permiten explorar escenarios antes de construir equipos costosos, reduciendo el número de pruebas por ensayo y error. Así, el diseño del reactor deja de ser un ajuste final y se vuelve parte central del desarrollo tecnológico, facilitando procesos más robustos y compatibles con metas de eficiencia y economía circular.

■ **Incidencia social**

■ El diseño de reactores no es un tema lejano: determina cómo se producen combustibles, fertilizantes, plásticos, fármacos y una gran parte de lo que usamos a diario. Cuando un proceso se diseña mejor, no sólo aumenta la producción, también puede reducirse el consumo de energía y, con ello, disminuirse las emisiones asociadas a la fabricación. En un contexto de urgencia climática, esa diferencia importa.

La incidencia social aparece en varios niveles. Procesos más eficientes aprovechan mejor las materias primas y generan menos residuos, reduciendo el impacto sobre agua, aire y suelo. Una operación más estable y segura disminuye riesgos para trabajadores y comunidades cercanas. Además, optimizar condiciones de operación evita que la transformación derive hacia subproductos que complican el tratamiento de efluentes y aumentan la huella ambiental.

Finalmente, este enfoque contribuye a formar especialistas capaces de tomar decisiones responsables. Comprender el puente entre laboratorio, simulación

y planta industrial permite diseñar tecnologías más limpias y acelerar su adopción. En otras palabras, mejorar reactores es una vía concreta para avanzar hacia una industria más sostenible.

■ **Equipo de trabajo y laboratorio**

■ El equipo de investigación está conformado por los doctores Carlos O. Castillo Araiza, José Guillermo Rivera de la Cruz y José F. Durán Pérez, adscritos al Laboratorio de Ingeniería de Reactores Catalíticos (LIRC) del Departamento de Ingeniería de Procesos e Hidráulica de la Universidad Autónoma Metropolitana-Iztapalapa. Fundado en 2010, el LIRC integra dentro de la ingeniería de reactores, el análisis experimental y el modelado computacional para desarrollar metodologías que acerquen transformaciones químicas prometedoras a condiciones industriales, con énfasis en la **eficiencia energética**, la estabilidad operativa y la sostenibilidad.

Carlos O. Castillo Araiza

Universidad Autónoma Metropolitana.
coca@xanum.uam.mx

José Guillermo Rivera de la Cruz

Universidad Autónoma Metropolitana.
jorivera@xanum.uam.mx

José F. Durán Pérez

Universidad Autónoma Metropolitana.
josefedupe@hotmail.com

Eficiencia energética
Capacidad del proceso para producir lo deseado usando la menor energía posible.



Silvestre Alavez, Ixchel Osorio Paz y Xareni Raquel Valle Jiménez



¿Pueden los productos naturales contribuir al envejecimiento saludable?

El caso del ácido vanílico

Este estudio evalúa el ácido vanílico como un *geroprotector* natural a partir de la utilización del nematodo *C. elegans*. Los resultados revelan que este compuesto aumenta la supervivencia y la resistencia de este organismo al estrés térmico, además de que disminuye la agregación proteica ligada a la neurodegeneración, perfilándose como un candidato prometedor para el envejecimiento saludable.

Introducción

El envejecimiento es un proceso natural al que los humanos nos enfrentamos y en el que nuestras células acumulan alteraciones, como proteínas malformadas, sistemas de reparación que fallan y respuestas al estrés que se debilitan. Con el tiempo, el daño se acumula y puede favorecer el desarrollo de enfermedades crónico-degenerativas, como la enfermedad de Alzheimer, la enfermedad de Parkinson, la demencia o problemas cardiovasculares, entre otros. Para entender el proceso de envejecimiento y su relación con la enfermedad, surgen las *gerociencias*, un enfoque multidisciplinario que busca contrarrestar los efectos negativos del envejecimiento y promover un envejecimiento saludable.

El problema no es envejecer, sino cómo envejecemos

La tendencia poblacional en México, y en el mundo, indica que la edad promedio seguirá aumentando en los próximos años. Por esto, la calidad de vida en edades avanzadas es un tema de vital importancia.

De acuerdo con la Encuesta Nacional Sobre Salud y Envejecimiento en México, realizada en 2021, el 62.3 % de la población mexicana mayor a 53 años percibía tener un estado de salud de regular a malo. Las enfermedades más reportadas fueron: hipertensión arterial (43.3 %), diabetes (25.6 %) y artritis (10.7 %). En 2023, la Encuesta de Evaluación Cognitiva realizada por el INEGI mostró que alrededor del 30 % de este grupo etario también presenta un deterioro cognitivo avanzado, basándose en preguntas de orientación temporal. Esto indica que

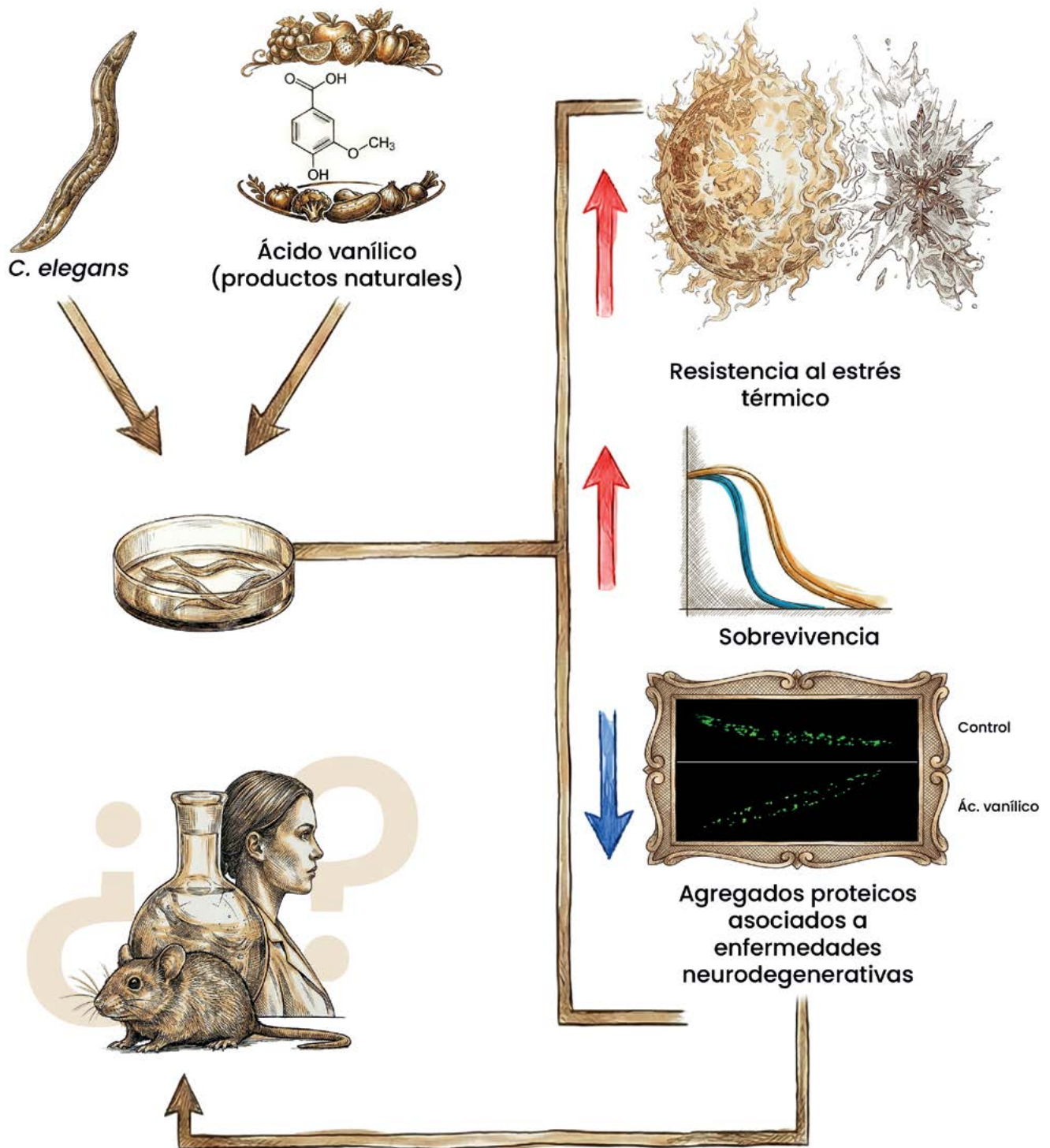
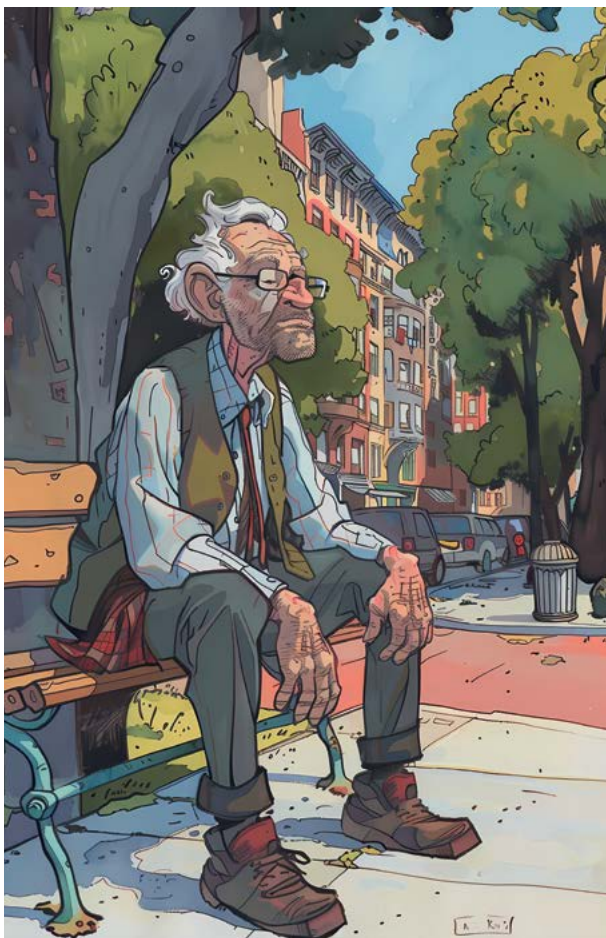


Figura 1. El ácido vanílico incrementa la sobrevivencia y la resistencia al estrés térmico en *Caenorhabditis elegans*; además disminuye el desarrollo de agregados proteicos asociados a enfermedades neurodegenerativas. Aunque el potencial como geroprotector de este compuesto es evidente, se requieren más ensayos en mamíferos. Diagrama elaborado por el autor y Joaquín González Vázquez, con elementos de inteligencia artificial.

una proporción significativa de adultos mayores en México padece enfermedades crónico-degenerativas y puede desarrollar trastornos neurodegenerativos, con el consecuente impacto personal, social y económico. Adicionalmente, esto tiene un fuerte impacto en los ámbitos personal, familiar, social, político y económico. Por lo tanto, promover un envejecimiento sano en nuestra sociedad es un desafío que debe abordarse de manera multidisciplinaria.

■ **Relevancia de *Caenorhabditis elegans* en el envejecimiento**

■ El estudio del envejecimiento requiere modelos biológicos económicos, accesibles y de corto periodo de vida que reproduzcan aspectos clave de la fisiología de organismos más complejos. El nematodo *Caenorhabditis elegans* (*C. elegans*) cumple con todas estas características y ha sido el modelo más utilizado para el estudio del envejecimiento.



Caenorhabditis elegans es un nematodo microscópico (de alrededor de 1 mm en etapa adulta), con un ciclo de vida corto; la vida media es de unos 14 días a 20 °C. Los adultos presentan 905 células somáticas (las que conforman el crecimiento de los tejidos y órganos) y 302 neuronas. Su genoma fue el primero en secuenciarse por completo en el mundo, lo que ha facilitado su manipulación genética para crear variaciones que nos ayudan a estudiar procesos biológicos básicos, incluyendo el envejecimiento, y enfermedades complejas como la de Alzheimer o la de Parkinson. Gracias al uso de *C. elegans* se han identificado más de 500 genes capaces de regular la longevidad, conocidos como *gerontogenes*, lo que ha permitido comprender algunos mecanismos moleculares del envejecimiento e identificar estrategias plausibles para el desarrollo de intervenciones farmacológicas.

■ **Intervenciones farmacológicas para un envejecimiento saludable**

■ Actualmente existe una búsqueda intensa de compuestos que modulen los procesos biológicos del envejecimiento; sin embargo, aún no existe una terapia antienvjecimiento funcional y clínicamente validada. Muchas intervenciones siguen en fases experimentales y persisten dudas sobre su seguridad en personas mayores, debido a enfermedades crónicas y a cambios en la disposición de los diferentes compuestos en el organismo asociados a la edad. Además, ciertas aproximaciones podrían implicar riesgos, ya que se asocian con procesos tumorales. Por ello, los compuestos geroprotectores se consideran una estrategia prometedora más segura.

■ **Geroprotectores**

■ Se da el nombre de *geroprotector* a sustancias que pueden reducir, retrasar o modular los mecanismos del envejecimiento, incrementando la esperanza de vida y disminuyendo la aparición de enfermedades relacionadas con la edad. Estos compuestos actúan mejorando la reparación molecular, regulando vías asociadas a la preservación de los mecanismos que mantienen la estabilidad celular y, probablen-

te, modulando los procesos inflamatorios. Por tanto, un compuesto geroprotector debería disminuir la mortalidad, mejorar los biomarcadores de envejecimiento y tener efectos secundarios mínimos, mejorando así la calidad de vida y retrasando la aparición de patologías degenerativas asociadas a la edad. Entre los ejemplos más estudiados se encuentran fármacos como la rapamicina y la metformina, y compuestos naturales tales como la espermidina, la curcumina, la acarbosa y la quercetina. Estos compuestos han mostrado efectos geroprotectores en modelos experimentales y son objeto de investigación para promover un envejecimiento saludable.

La búsqueda de compuestos geroprotectores se ha dirigido a los productos naturales, donde la diversidad química es especialmente amplia. Plantas, hongos e incluso animales producen una gran variedad de metabolitos que, aunque cumplen funciones biológicas específicas, pueden interactuar con rutas celulares asociadas al envejecimiento. Además, si estos compuestos son seguros para el consumo humano, su evaluación en estudios clínicos resulta más viable. Compuestos como la rapamicina, la acarbosa y la espermidina ya se estudian en ensayos clínicos en humanos.

■ El ácido vanílico como posible geroprotector

■ El ácido vanílico es un compuesto químicamente relacionado con la vainillina, aunque se encuentra de forma natural en muchas plantas y en alimentos comunes, incluidos frutas, verduras, cereales y bebidas como la cerveza y el vino. En la industria alimentaria se emplea principalmente como saborizante/aromático y como intermediario en la producción de vainillina, debido a su aroma similar al de la vainilla.

El interés en este compuesto surge de estudios previos que sugieren beneficios asociados al consumo moderado de cerveza. Al ser una bebida fermentada, la cerveza contiene una amplia diversidad de compuestos bioactivos, especialmente compuestos fenólicos, entre los que se encuentra el ácido vanílico. En este contexto, nuestro grupo de investigación se propuso evaluar si este compuesto podría actuar como geroprotector. Para esto, utilizamos poblacio-

nes de *C. elegans* para explorar resistencia a estrés, sobrevivencia y utilizamos modelos de neurodegeneración diseñados genéticamente en este modelo.

■ El ácido vanílico incrementa la resistencia al estrés térmico y la sobrevivencia de *C. elegans*

■ Para evaluar la resistencia al estrés térmico, se determinó la resistencia de *C. elegans* a una temperatura elevada: poblaciones de la cepa silvestre, crecidas a 20 °C, fueron tratadas con ácido vanílico y posteriormente sometidas a 35 °C, una temperatura letal para los nematodos. La supervivencia de los individuos se registró cada dos horas hasta que no quedó ningún gusano vivo. Estos ensayos demostraron que el ácido vanílico incrementa en un 29 % la resistencia de los nematodos al estrés térmico.

Realizamos también ensayos de longevidad, poblaciones homogéneas se mantuvieron a 20 °C con y sin ácido vanílico, registrando periódicamente el número de individuos sobrevivientes para evaluar la sobrevivencia. Con este enfoque, se observó que el ácido vanílico prolonga la vida de los nematodos en casi un 50 %, lo que respalda su potencial geroprotector.

■ El ácido vanílico disminuye la agregación proteica en modelos de neurodegeneración en *C. elegans*

■ Dado que *C. elegans* se ha estudiado ampliamente, se han generado cepas con mutaciones específicas que nos permiten simular modelos de enfermedades presentes en humanos. En el laboratorio utilizamos las cepas identificadas como AM141 y CL4176 que, al crecerse a 25 °C, activan mecanismos moleculares que promueven la formación de agregados proteicos que forman placas asociadas con la enfermedad de Huntington, o de β -amiloides, asociados con la enfermedad de Alzheimer. Conforme se van acumulando los agregados, los gusanos pierden su movilidad hasta paralizarse por completo. Evaluamos este fenotipo de parálisis para verificar el efecto del ácido vanílico; si se mejora la movilidad, se asume que no se formaron muchos agregados proteicos. La cepa AM141 tiene la particularidad de que los agregados

que produce están unidos a una proteína que emite luz fluorescente verde, por lo que, utilizando un microscopio de fluorescencia, podemos observar la acumulación de estos agregados.

Nuestros resultados sugieren que ciertas concentraciones de ácido vanílico reducen la formación de agregados de estas proteínas, por lo que este compuesto tiene el potencial de retrasar el desarrollo de enfermedades asociadas con la agregación proteica.

Conclusiones

La inclusión de geroprotectores naturales en la dieta es una estrategia prometedora para reducir la vulnerabilidad asociada al envejecimiento, mejorar la calidad de vida y retrasar las enfermedades relacionadas con la edad. El ácido vanílico ha demostrado aumentar la supervivencia y la resistencia al estrés, así como reducir la agregación de proteínas asociada a enfermedades neurodegenerativas en *C. elegans*, lo que lo perfila como un candidato a geroprotector. No obstante, es indispensable evaluar estos efectos en modelos más complejos y, posteriormente, en estudios clínicos en humanos. La búsqueda de geroprotectores naturales abre nuevas oportunidades para diseñar estrategias dietéticas y terapéuticas que promuevan un envejecimiento saludable, una prioridad central del grupo de Intervenciones Farmacológicas en el Envejecimiento de la UAM.

Silvestre Alavez

Universidad Autónoma Metropolitana.
s.alavez@correo.ler.uam.mx

Ixchel Osorio Paz

Universidad Autónoma Metropolitana.
i_osorio@correo.ler.uam.mx

Xareni Raquel Valle Jiménez

Universidad Autónoma Metropolitana.
x_valle@correo.ler.uam.mx

Referencias

- INEGI (2023), Encuesta Nacional sobre Salud y Envejecimiento en México (Enasem) 2021 [documento técnico], Instituto Nacional de Estadística y Geografía. Disponible en: https://www.inegi.org.mx/contenidos/programas/enasem/2021/doc/enasem_2021_nota_tecnica.pdf, consultado el 20 de febrero de 2026.
- INEGI (2023), Encuesta de Evaluación Cognitiva integrada en la Encuesta Nacional sobre Salud y Envejecimiento en México (Enasem) 2021 [comunicado de prensa núm. 394/23], Instituto Nacional de Estadística y Geografía. Disponible en: https://www.inegi.org.mx/contenidos/saladeprensa/boletines/2023/ENASEM/ENASEM_21.pdf, consultado el 20 de febrero de 2026.

Lecturas recomendadas

- Alavez, S. (2022), "Intervenciones contra el envejecimiento y enfermedades asociadas guiadas por la gerociencia", en R. Cordera, H. Pasantes y S. Molina (eds.), *La vejez en México en el siglo XXI: Desafíos individuales y sociales*, México, Seminario de Cultura Mexicana, pp. 191-203.
- Valle-Jiménez, X., I. Osorio-Paz y S. Alavez (2023), "*Caenorhabditis elegans* como modelo para el estudio del envejecimiento", *Revista Fesahanccl*, 9(1):4-11.

Gerardo Kloss Fernández del Castillo



¿Van a desaparecer los libros?

Cambio, resistencia y futuros posibles del mundo editorial

La investigación cuestiona si los libros desaparecerán por la tecnología. A partir de entrevistas, se hace evidente un sector editorial con roles estereotipados y resistencia al cambio. Es claro que el libro no morirá, sólo se transforma su formato, y partiendo de ello el autor propone enfocar el debate en las prácticas sociales de lectura y no en el soporte tecnológico.

Breve introducción al tema

Desde hace décadas, cada vez que avanza alguna tecnología de comunicación se repite la misma pregunta, que ya es casi un rito cultural: ¿van a desaparecer los libros? En 1898 el poeta Amado Nervo asistió a una función de cine y quedó fascinado por las mágicas sombras flotando en el espacio. Días después escribió: “este espectáculo me ha sugerido lo que será la historia en el futuro: no más libros”.

La palabra escrita lleva tiempo amenazada de muerte por el cine, la radio, la televisión, el libro electrónico, la computadora personal, la internet y, más recientemente, el teléfono celular, las redes sociales, las plataformas de *streaming* y la inteligencia artificial generativa. Cada vez el libro, la revista, el periódico y hasta el ensayo académico han sido presentados como especies al borde de una inminente extinción. Al menos desde los años sesenta nos bombardean con artículos, conferencias, seminarios, libros, programas, películas, *blogs* y *posts* acerca de la inminente muerte de la palabra impresa.

■ ¿Van a desaparecer los libros?

■ El libro electrónico existe desde el *Project Gutenberg*, en 1971; la *autoedición* desde 1984, y la *autopublicación* en HTML desde 1993. A partir de 2003, la Web 2.0 sacó al lector de su papel de receptor pasivo y le permitió interactuar con otros emisores, comentar, responder y producir sus propios contenidos. También en 2003 los telé-

fonos dejaron de ser sólo para hablar y se volvieron terminales de información donde el universo cabe en el bolsillo y publicar es apretar un botón. Los tradicionales esquemas teóricos de *cadena*, ese circuito unilateral que iba de un *autor* o un *emisor* hacia un *lector* o un *receptor*, se quedó corto frente a la complejidad del rizoma donde todos somos iguales, la comunicación se mueve en múltiples direcciones y somos, al mismo tiempo, productores y consumidores: *prosumidores*.

El trabajo editorial se centra cada vez más en la capacidad para gestionar flujos de contenidos; se parece más a una nube de partículas gaseosas, y menos a una cadena lineal de producción, con perfiles laborales y profesionales fijos, procesando paquetes discretos de información con fechas ciertas de cierre. Pero la tradición editorial y la sociología de la literatura todavía retratan a los trabajadores del **campo editorial** con estampas arquetípicas de siglos atrás: “el editor”, “el corrector”, “el impresor”, “el librero”. Este desfase, entre otras causas, facilita la precarización laboral de los trabajadores editoriales, que subjetivan e idealizan, pero no sistematizan ni cuestionan las funciones reales de cada puesto.

Todavía hay una especie de reverencia por el libro, la literatura, la edición y la **lectura** en sus formas canónicas de los últimos doscientos años, como si éstas fueran las únicas formas posibles de realizar tales prácticas. Mientras tanto, se diversifican velozmente las opciones narrativas y de entretenimiento, y la sociedad exige prácticas cada vez más variadas de producción, recepción, consumo, uso y apropiación de contenidos. Si unos relatos fluyen en espacios electrónicos y otros se quedan en papel es porque les dicen cosas diferentes a públicos distintos. La gente lee y escribe más hoy que hace veinte años, pero de maneras distintas; y, a medida que la vía electrónica se va volviendo la opción por *default*, el esfuerzo adicional por producir o consumir un objeto hecho de papel se convierte en una decisión estética. Los jóvenes que nacieron totalmente inmersos en el mundo digital revaloran los objetos físicos, analógicos y artesanales que les resultan novedosos.

El asunto requiere replantearse. Algunas interfaces de lectura ya “desaparecieron”, como el directo-

rio telefónico o el plano callejero urbano, pero las necesidades que les dieron origen siguen existiendo. Más que investigar el futuro de las interfaces tecnológicas de lectura, conviene investigar el futuro de las prácticas de lectura, de las funciones que cumple cada una de las diferentes interfaces en la vida social, de sus condiciones de producción y consumo, y de las transformaciones que atraviesa, o necesitaría atravesar, el campo editorial como espacio social y laboral para dejar de vivir en crisis permanente.

■ Objetivos de la investigación

■ El objetivo principal del proyecto es comprender qué piensan los trabajadores del campo editorial —autores, editores, gerentes editoriales, correctores, diseñadores, ilustradores, libreros, promotores de lectura y gestores culturales— en qué consisten, qué hacen, cómo interactúan y por qué son importantes desde su perspectiva estos oficios, y qué opiniones manifiestan sobre su propio valor social y su futuro. A partir de esta base empírica se analizan los discursos dominantes sobre la lectura, el libro, el diseño y la edición, identificando los numerosos mitos que aún se sostienen en este sector sobre qué soportes, modos, prácticas, objetos, sujetos y canales son legítimos o no. Esto nos permite explorar cómo y por qué estos imaginarios generan resistencia al cambio dentro del sector editorial.

■ Metodologías de la investigación

■ La investigación se apoya en una metodología cualitativa, basada en veinticuatro entrevistas profundas semiestructuradas con distintos agentes del campo editorial, en el contexto de la Feria Internacional del Libro de Guadalajara (**Figura 1**). El análisis se centra en los relatos profesionales, las historias de vida, el proceso formativo, las prácticas cotidianas, los conflictos laborales y los discursos de legitimación del trabajo editorial, apoyándose en herramientas de la sociología de la cultura.

En todos los casos se partió de un cuestionario base y se permitió que cada entrevista tomara su propio rumbo, de acuerdo con los intereses del infor-

Campo editorial ▶
Espacio social donde interactúan los actores del libro bajo reglas propias, conforme a lo descrito por la sociología bourdiana.

Lectura ▶
Conjunto diverso de prácticas culturales de consumo de contenidos con fines concretos.



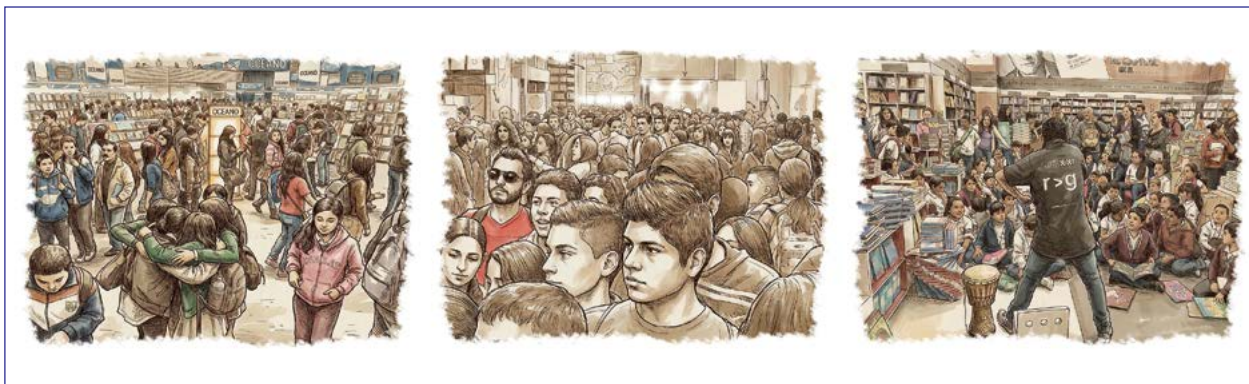


Figura 1. Diversas vistas de la FIL de Guadalajara. Crédito: Gerardo Kloss Fernández del Castillo y Joaquín González Vázquez con apoyo de inteligencia artificial.

mante. Hay temas y preguntas que surgieron durante la propia conversación y no aparecen en todos los casos, por lo que rescatamos todas las expresiones espontáneas que aportaran información de interés para el tema de la investigación.

Las definiciones de *editor* y de *diseñador editorial* se les preguntaron a todos los informantes por igual, así como lo que cada informante hace, la forma en la que aprendió a hacer lo que hace, su opinión sobre sus relaciones y conflictos con los diferentes oficios, la fragmentación de la cadena productiva, el trabajo en equipo, la invisibilidad social, la percepción social del valor agregado, el cambio tecnológico, la desmaterialización y la profesionalización editorial. A quienes declararon pertenecer a otros perfiles que no fueran de *editor* o de *diseñador editorial* (autor, corrector, ilustrador, gerente o director, librero, gestor, promotor) se les pidió también una autodefinición de su perfil. Los perfiles laborales en el campo editorial están estereotipados y, en primera instancia los informantes tendieron a autodefinirse usando estereotipos; esto se puso en evidencia al insistir con esta nueva formulación: “¿qué cosas hace usted exactamente o qué tipo de problemas resuelve en su día a día durante la jornada laboral?”. El contraste entre los perfiles autodefinidos y las respuestas a esta pregunta puso en evidencia una diversidad de funciones laborales y una fragmentación insospechada del campo, que el **imaginario** no refleja y más bien tiende a ocultar.

Los perfiles profesionales son más híbridos y la movilidad más grande de lo que parece. La mayoría

de los informantes se autorrepresentan con la mezcla de varios perfiles y su labor editorial raras veces se ha limitado a realizar una sola función. Algunas trayectorias se presentan con más frecuencia, como egresar de humanidades, ser corrector y luego editor.

Preguntarle al informante cómo se formó evoca anécdotas, vivencias infantiles, primeros contactos con libros o con imprentas, gratitud hacia sus maestros, recuerdos juveniles, vuelcos vocacionales y un muro de lamentaciones laborales. Hay consenso de que el trabajo editorial se aprende haciendo, pero se anhela tener una mayor validación institucional y se considera importante que las universidades abran programas de educación y estudios editoriales.

Si hubiera que resumir las conclusiones en una sola frase, es altísimo el grado de subjetivación de los deberes aprendidos y de ahí parece provenir la resistencia a cuestionar lo que se ha hecho siempre. Incluso es prestigioso mostrarse reticentes ante la innovación y no está muy extendida la noción de que son más importantes los lectores y las prácticas de lectura que los soportes y las interfaces.

Innovación de la investigación

La principal innovación de este trabajo consiste en desplazar la discusión sobre el futuro del libro del plano tecnológico al terreno sociológico, cultural y laboral. En lugar de preguntar qué tecnología sustituirá al libro, se analizan las transformaciones de las prácticas sociales de lectura, edición, diseño, producción, circulación y consumo de textos. Además,

Imaginario editorial
Conjunto de creencias
y valores compartidos
dentro y sobre el oficio
del libro.

se cuestiona la metáfora tradicional de la “cadena editorial”, proponiendo modelos más fluidos y descentralizados.

■ Incidencia social

■ Este enfoque permite repensar las políticas editoriales, de fomento a la lectura, de formación, capacitación y profesionalización editorial, y de diseño de contenidos culturales. Reconocer la diversidad de prácticas lectoras y soportes textuales contribuye a formular estrategias más incluyentes y acordes con la realidad contemporánea. Desde esta perspectiva, los libros no están desapareciendo; lo que cambia es su forma, su soporte, su interfaz y su lugar simbólico.

Gerardo Kloss Fernández del Castillo

Universidad Autónoma Metropolitana.

lucas@correo.xoc.uam.mx

Lecturas recomendadas

- Adler, M. y C. Van Doren (2000), *Cómo leer un libro*, Madrid, Debate.
- Bhaskar, M. (2014), *La máquina de contenido. Hacia una teoría de la edición desde la imprenta hasta la red digital*, México, FCE.
- Borsuk, A. (2018), *The Book*, Cambridge, The MIT Press.
- Bourdieu, P. (1990), “Algunas propiedades de los campos”, en P. Bourdieu, *Sociología y cultura*, México, Conaculta, pp. 135-141.
- Bourdieu, P. y R. Chartier (2010), “La lectura, una práctica cultural”, en P. Bourdieu, *El sentido social del gusto*, México, Siglo XXI, p. 253.
- Chartier, R. y C. A. Scolari (2019), *Cultura escrita y textos en red*, Barcelona, Gedisa.
- Eco, U. y J.-C. Carrière (2010), *Nadie acabará con los libros*, Barcelona, Lumen.
- Febvre, L. y H.-J. Martin (2005), *La aparición del libro*, México, FCE/Libraria.
- Nunberg, G. (1998), *El futuro del libro. ¿Esto matará eso?*, Barcelona, Paidós.
- Zschirnt, C. (2004), *Libros. Todo lo que hay que leer*, México, Taurus.





Claudia A. Santizo Rodall y Laura Flamand Gómez



La evaluación de políticas públicas: el caso de la educación

La investigación aborda la evaluación de políticas educativas como un proceso tanto técnico como político. Compara los modelos de Brasil, Colombia y Estados Unidos, destacando cómo el contexto de cada nación define las dimensiones éticas, políticas y funcionales de sus evaluaciones. Este análisis busca mejorar el debate público y optimizar la planeación gubernamental a largo plazo.

Introducción

La evaluación de las políticas públicas significa valorar los cursos de acción de las decisiones de gobierno; por ello es un tema con un alto contenido técnico y político. En la evaluación, las preguntas qué, cómo, cuándo, para qué y quiénes evalúan se establecen en contextos legales, sociales y políticos específicos, a los cuales hay que agregar un sistema de valores y creencias de las partes involucradas.

En la política de educación se expresa abiertamente el debate, la negociación o el conflicto entre grupos políticos y sociales alrededor de la definición de qué, cómo y para qué se enseña. Las mismas preguntas se formulan en la evaluación cuyo alcance y orientación también se define por el contexto político.

Un primer aspecto para considerar es que el estudio de la evaluación como política pública, sujeta a su contexto político, implica explorar ángulos de los arreglos políticos donde se desarrolla la política educativa. Éste es el propósito de la investigación presentada en el libro: *Análisis comparado de las políticas de evaluación educativa. Propuesta metodológica y aplicaciones (Brasil, Colombia y Estados Unidos)*. Las estructuras de organización sectorial y los arreglos políticos en estos tres países moldean las características de sus políticas educativas y de sus políticas de evaluación.

El propósito de la investigación que aquí se comenta no es discutir cuál es el mejor modelo para evaluar las políticas públicas dirigidas a la educación, sino ponderar sus alcances y limitaciones a través de un marco analítico que considera los aspectos técnicos y políticos de la evaluación.

Los estudios de las políticas públicas son contextuales por naturaleza, se realizan en un marco legal y político específicos. Si consideramos las interacciones

entre representantes de gobierno y actores sociales, el marco de análisis es el de gobernanza que centra la atención en cómo y quiénes toman decisiones.

Una primera aproximación de esta investigación fue comparar la evaluación de políticas de educación básica en varios países. Dentro de éstos destacó un grupo de países que desarrollan políticas que trascienden a las administraciones de gobierno; es decir, no son políticas de gobierno, sino políticas de Estado. Esto es, planean intervenciones de largo plazo que se acompañan con esquemas de evaluación.

■ Objetivos de la investigación

■ El propósito de este estudio fue analizar la racionalidad del proceso de evaluación como política pública. Es decir, determinar qué, quién, cómo y cuándo se evalúa la política educativa y, de esta manera, contrastar y aprender de las formas de organización del sector educativo en varios países. Este proceso de evaluación tiene características que derivan del contexto político de cada país.

Un segundo propósito fue destacar el papel de la evaluación como mecanismo para valorar el curso de acción de las políticas públicas. Es evidente su relevancia en la planeación educativa de largo plazo, cuyo curso de acción puede conducir a diferentes resultados. La evaluación de un plan en distintos momentos (líneas punteadas verticales en la **Figura 1**) indica qué tan cerca o lejos se está de cumplir con el plan educativo; es decir, sus posibles resultados.

■ Metodologías de investigación

■ En el campo de los estudios comparados se distinguen dos enfoques: el primero está presente en estudios a profundidad con algunos casos y muchas variables; el segundo, en estudios de regularidades de muchos casos con pocas variables; ésta es una distinción entre estudios cualitativos y cuantitativos.

Esta investigación realizó un estudio comparado a profundidad de tres países que realizan planeación de largo plazo para sus políticas educativas y que se evalúan en diferentes momentos. En la selección de

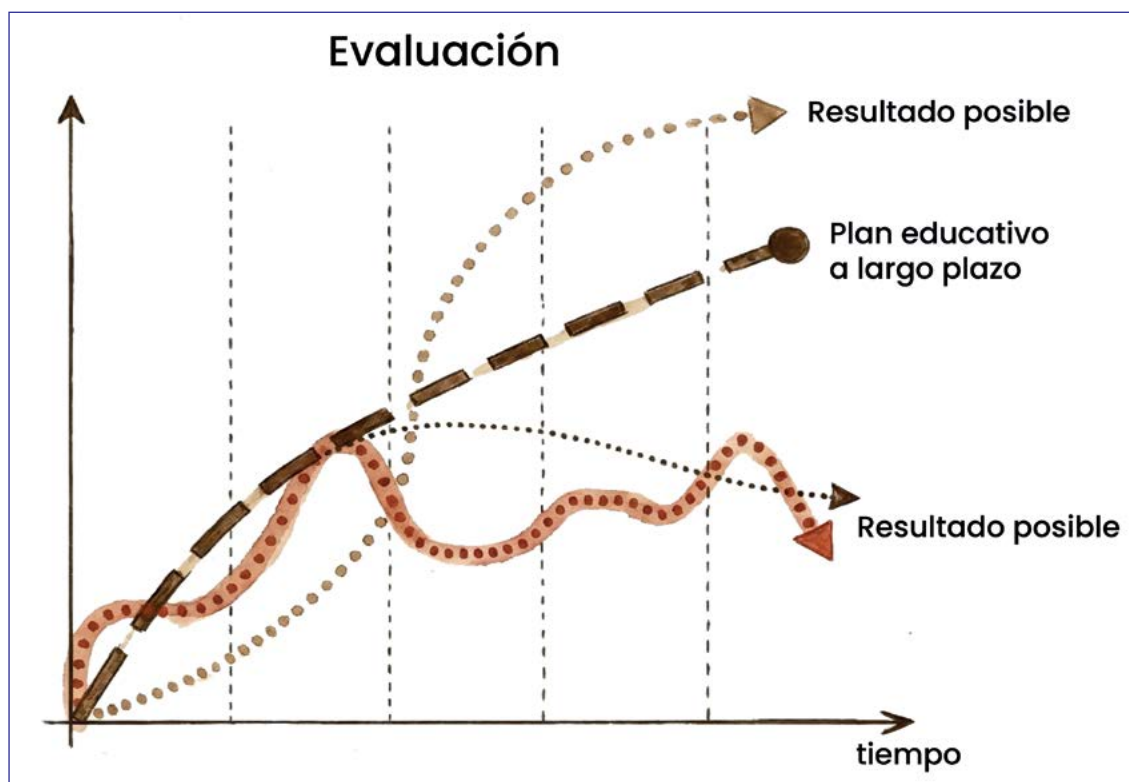


Figura 1. Plan educativo y sus momentos de evaluación en el largo plazo. El futuro planeado y los resultados posibles. Crédito: Claudia Santizo, Laura Flamand y Joaquín González Vázquez, con apoyo de la inteligencia artificial.



Nueva Gestión Pública

Enfoque que conjunta prácticas de gobierno y de gestión inspiradas en prácticas del sector privado como la de evaluar la gestión con base en el desempeño y resultados en lugar del control; subcontratar servicios en lugar de proveerlos, y una inversión privada complementaria a la pública. Sus principios se basan en descentralizar decisiones, delegar y separar lo estratégico de lo operativo.

países se consideró la disponibilidad de documentos de política educativa y sus correspondientes evaluaciones. En Brasil se consideró el Plan Decenal 2014-2024; en Colombia, el Plan Decenal 2006-2016 y para Estados Unidos, el programa federal No Child Left Behind (Ningún Niño con Rezago) en el periodo 2002-2009.

Para realizar este estudio comparado se elaboró un modelo que recoge los criterios utilizados en las prácticas de evaluación de diversos países y organizaciones. Conjuntar estos criterios en un modelo permite destacar las perspectivas de gestión y de gobernanza en los países seleccionados en diversas dimensiones: a) *dimensión funcional*, preocupada por la efectividad y eficiencia de los procesos, así como por el impacto de resultados; b) *dimensión política*, que trata de la inclusión o participación de partes interesadas en las decisiones; c) *dimensión ética*, que se enfoca a los objetivos de equidad y, por tanto, asigna re-

ursos de manera preferente a la población en desventaja, con atención, también, a la diversidad poblacional; finalmente, d) la *dimensión instrumental*, que establece la forma en que se recaba y procesa la información.

Innovación en esta investigación

El modelo de análisis establece 20 criterios de evaluación, los cuales se asocian a perspectivas de la gestión pública establecidas en diferentes momentos. En la década de 1980, en Europa y Estados Unidos, en el gobierno se aplicaron prácticas inspiradas en la administración de empresas que se identifican como la **Nueva Gestión Pública**; con ello adquirió relevancia evaluar la efectividad y la eficiencia de la política pública. Una de esas prácticas fue la colaboración del gobierno con empresas y sociedad, lo que llevó, en la década de 1990, a formular un enfoque

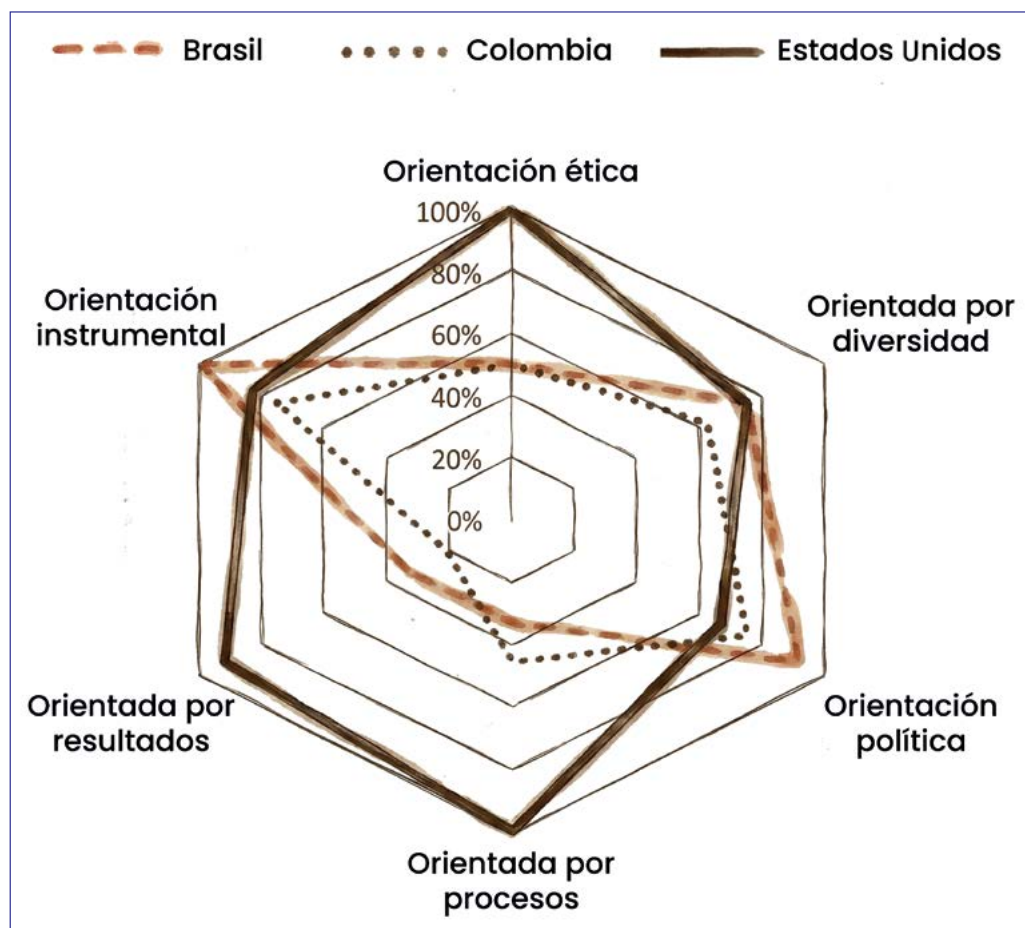


Figura 2. Polítics de evaluaci3n ponderadas en funci3n de orientaciones: 3tica, diversidad, pol3tica, de procesos, de resultados e instrumental. Crédito: Claudia Santizo, Laura Flamand y Joaquín González Vázquez, con apoyo de la inteligencia artificial.

de la **Nueva Gobernanza Pública**. Otra perspectiva se basa en el *enfoque de derechos*, donde adquieren relevancia los criterios de equidad, o bien la asignaci3n de recursos a quien más los necesita, y la diversidad, o bien la atenci3n a diferentes grupos de poblaci3n; es decir, criterios que valoran el componente ético de las políticas públicas.

Los principios y valores de las perspectivas de gesti3n se pueden contraponer, pero también se complementan, pues enfocan la atenci3n en diversos ángulos de una política pública. De esta manera, el modelo utilizado para analizar las políticas de evaluaci3n de Brasil, Colombia y Estados Unidos ofrece una perspectiva ponderada que identifica la orientaci3n de las políticas educativas. La **Figura 2** muestra los resultados de esta investigaci3n, donde se pueden destacar los siguientes. En Estados Unidos, la evaluaci3n del Programa Federal Ningún Niño con Rezago se-

ñala una orientaci3n ética por sus objetivos específicos para atender a estudiantes en desventaja social y a diversos grupos de poblaci3n, además de la importancia de evaluar resultados y procesos. En Brasil destaca la orientaci3n política por la participaci3n de sindicatos, empresas, asociaciones profesionales, académicos y organizaciones de la sociedad civil, tanto en la planeaci3n como en la evaluaci3n de la política sectorial. En Colombia, el plan educativo nacional no tuvo un carácter obligatorio, razón por la cual, la evaluaci3n se enfocó en revisar si los objetivos nacionales se consideraban en los planes locales.

Incidencia social

La evaluaci3n educativa es un tema de debate público, por la forma en que se realiza y por el uso e interpretaci3n de sus resultados. La organizaci3n de la

Nueva Gobernanza Pública

La gobernanza alude a las acciones para dirigir la sociedad. Desde esta perspectiva, los propósitos y el diseño de las acciones de gobierno no son responsabilidad única de los actores gubernamentales, sino que implican abrir espacios para el concurso de actores privados y sociales en la elaboraci3n y ejecuci3n de políticas para atender asuntos públicos.

evaluación, sus momentos y las formas de participación de los interesados expresan el tipo de relaciones políticas en cada país. La interpretación de los resultados es un tema de debate político, no sólo técnico. En particular, por la valoración de aprendizajes del alumnado y por el desempeño de los docentes.

Discutir la evaluación de la política pública en sus dimensiones ética, política y funcional contribuye a ordenar el debate público y a reducir el ruido causado, en muchas ocasiones, por la confusión en el uso de conceptos, momentos y objetivos de la evaluación. Así, por ejemplo, la efectividad en el cumplimiento de objetivos es un criterio de gestión que no excluye propósitos éticos o de participación. De igual manera, evaluar procesos es diferente a evaluar personas o, en otros términos, los instrumentos de evaluación cumplen propósitos operativos y no políticos.

Los objetivos de la evaluación ayudan a centrar el debate público en torno a temas de fondo. El objetivo ético en cuanto a equidad y diversidad para cerrar brechas causadas por desventajas sociales y culturales, o bien la participación como mecanismo para mejorar las decisiones de gobierno, son temas para los que hay múltiples formas de implementación, pero lo relevante es transparentar las consecuencias de las decisiones.

El estudio de las políticas de evaluación tiene como propósito identificar las condiciones políticas y funcionales que facilitan la implementación de las prácticas más efectivas, y constituye un medio para aprender y mejorar la elaboración de las políticas educativas. En el fondo, permite adaptarlas a las condiciones políticas, económicas, legales, sociales y culturales de México.

Claudia A. Santizo Rodal

Universidad Autónoma Metropolitana.

csantizo@cua.uam.mx

Laura Flamand Gómez

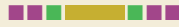
El Colegio de México, A. C.-Centro de Estudios Internacionales.

lflamand@colmex.mx

Lecturas recomendadas

- Aguilar, L. F. (2010), *Gobernanza: El nuevo proceso de gobernar*, Fundación Friedrich Naumann para la Libertad. Disponible en: http://red.sevilladolid.mx/pdf/20150713120009871783Aguilar%20Luis_Gobernar%20el%20nuevo%20proceso%20de%20gobernar.pdf, consultado el 23 de febrero de 2026.
- Mesa de monitoreo, seguimiento y evaluación de la Comisión Gestora del PNDE 2016-2026 (2019), *Estrategia de Monitoreo y Evaluación del Plan Nacional Decenal de Educación 2016-2026*, Bogotá, Ministerio de Educación Nacional. Disponible en: https://www.mineducacion.gov.co/1759/articles-392916_recurso_1.pdf, consultado el 23 de febrero de 2026.
- Iaies, G. (2003), *Evaluar las evaluaciones. Una mirada política acerca de las evaluaciones de la calidad educativa*, París, IIEP-UNESCO. Disponible en: <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000142330/PDF/142330spa.pdf.multi>, consultado el 23 de febrero de 2026.
- NCEE (2007), *National Assessment of Title I. Final Report. Summary of Key Findings*, Washington D. C., Institute of Education Sciences, National Center for Education Evaluation and Regional Assistance. Disponible en: <https://ies.ed.gov/ncee/2025/01/20084014rev-pdf>, consultado el 23 de febrero de 2026.
- Ribeiro da Silva, M. y C. Barcelos M. Abreu (2008), "Política educativa: La reforma brasileña y sus resultados según el rendimiento de los estudiantes", *Theoria*, 18:141-155. Disponible en: <https://www.redalyc.org/pdf/124/12401810.pdf>, consultado el 23 de febrero de 2026.

José Eduardo González Reyes



Desde las redes

Multivitamínicos contra el envejecimiento

En algún momento de la vida, todos hemos recibido la sugerencia de consumir algún multivitamínico. Una nueva investigación, publicada por los integrantes del Cocoa Supplement and Multivitamin Outcomes Study (COSMOS, por sus siglas en inglés), sugiere que esta práctica puede retrasar ciertos marcadores del envejecimiento biológico.

Las vitaminas, minerales y otros compuestos presentes en los alimentos son fundamentales para el

funcionamiento normal del cerebro; su deficiencia en adultos mayores puede aumentar el riesgo de deterioro cognitivo. COSMOS ha buscado determinar si el uso de multivitamínicos y extracto de cacao reduce el riesgo de desarrollar enfermedades cardíacas, accidentes cerebrovasculares y cáncer, además de, en este caso particular, frenar el envejecimiento biológico.

Para calcular la edad biológica, el equipo de investigación analizó muestras de sangre de 958 parti-



Consumir un suplemento diario durante dos años ralentizó el reloj biológico interno en adultos mayores en alrededor de cuatro meses, en comparación con aquellos que no lo hicieron. Crédito: Freepik.

cipantes sanos, con una edad promedio de 70 años, en tres momentos distintos a lo largo de dos años.

Utilizaron cinco relojes epigenéticos, que son marcas en el ADN que permiten estimar la edad biológica de una persona independientemente de su edad cronológica. Individuos de la misma edad pueden mostrar marcadas diferencias en sus perfiles epigenéticos debido a factores como la alimentación, el ambiente o condiciones de salud. Una edad epigenética menor de lo esperado sugiere un envejecimiento más lento, mientras que una mayor puede indicar un envejecimiento acelerado influenciado por el estilo de vida y el entorno.

La investigación reveló que consumir un suplemento diario durante dos años ralentizó el reloj interno en adultos mayores en alrededor de cuatro meses, en comparación con aquellos que no lo hicieron. El efecto fue más pronunciado en las personas que ya mostraban signos de envejecimiento biológico acelerado; es decir, cuando su edad biológica calculada era superior a su edad cronológica.

Descubrieron también que el consumo diario de un multivitamínico retrasó significativamente los marcadores en dos de esos cinco relojes, ambos utilizados para indicar riesgos de mortalidad. Aunque el

efecto beneficioso a nivel individual puede parecer pequeño, la consistencia de los datos sugiere que, a escala poblacional, estas diferencias pueden volverse sumamente significativas.

Aún no está claro el mecanismo exacto por el cual los suplementos logran este efecto, pues podrían influir otros factores, como una dieta saludable. El campo de la epigenética sigue evolucionando, y el siguiente paso en la investigación será comprender cómo estos cambios moleculares se traducen en la salud clínica real de las personas.

El objetivo de este tipo de investigaciones no es sólo identificar cómo vivir más tiempo, sino cómo vivir con una mejor calidad de vida.

Nota: Te recordamos que es importante acudir con un profesional de la salud antes de iniciar el consumo de cualquier multivitamínico.

Más información

S. Li, R. Hamaya, H. Zhu y cols. (2026), "Effects of daily multivitamin-multimineral and cocoa extract supplementation on epigenetic aging clocks in the cosmos randomized clinical trial", *Nature Medicine*. Disponible en: <https://doi.org/10.1038/s41591-026-04239-3>.

Una avalancha astronómica

El Observatorio Vera C. Rubin inició operaciones en junio del año pasado, capturando impresionantes vistas panorámicas de nuestro universo con la cámara digital más grande jamás construida, de 3 200 megapíxeles, con la que puede detectar objetos tenues y lejanos.

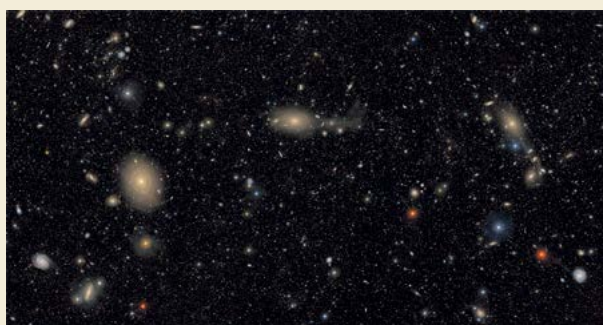
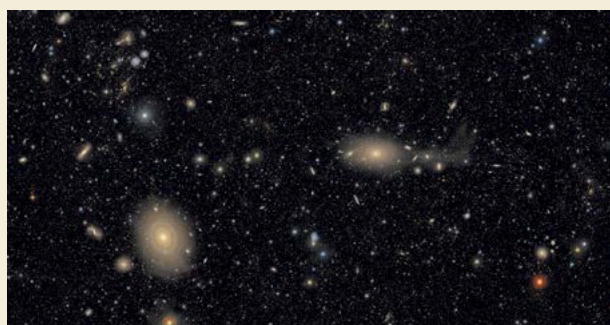
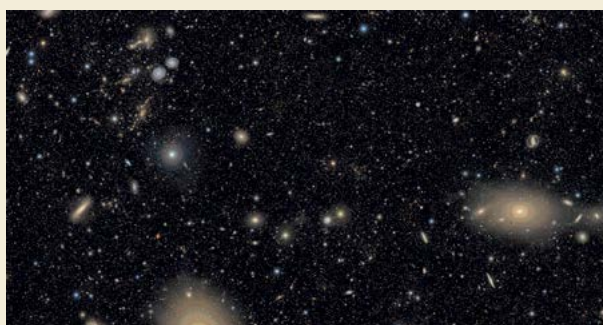
Sin embargo, el pasado 24 de febrero, una avalancha de datos provenientes del observatorio, ubicado en el Cerro Pachón de Chile, comenzó a llegar a cientos de astrónomas y astrónomos alrededor del mundo.

En su primera noche de acceso público, el sistema creó y distribuyó unas 800 mil alertas sobre asteroides en movimiento, explosiones estelares, agujeros negros supermasivos en erupción y otros eventos ce-

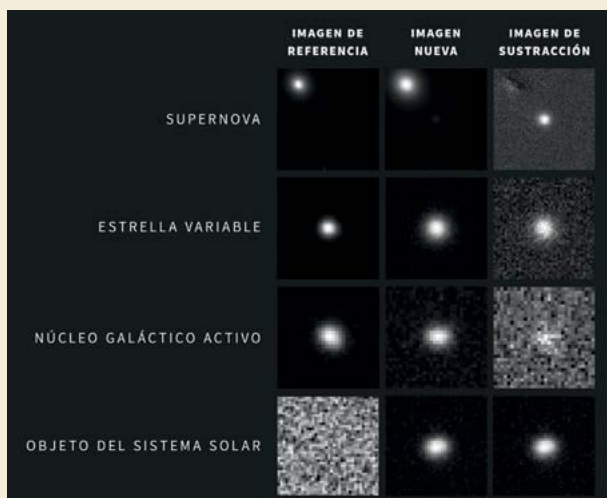
lestes transitorios. Y eso es sólo el comienzo, pues se espera que esa cifra aumente a millones de notificaciones cada noche.

¿Cómo lo hace? Durante su primer año de operación, el observatorio construyó una imagen estática del cielo, una especie de plantilla del universo. Luego, cada noche, tras corregir los efectos que puedan distorsionar las imágenes, el algoritmo del observatorio compara las nuevas tomas con la imagen base y alerta sobre cada pequeña diferencia.

A medida que se obtienen nuevas capturas, el *software* las compara automáticamente con las de referencia. La imagen de referencia se “resta” de la nueva, dejando visibles sólo los cambios detectados y obteniendo lo que se denomina *imagen de sustrac-*



Primeras capturas del observatorio. Crédito: Observatorio Vera C. Rubin de la NSF-DOE.



Crédito: Observatorio Rubin de la NSF-DOE.

ción. Las pequeñas imágenes individuales que se muestran en la siguiente figura están centradas en objetos observados por el Rubin que cambiaron de brillo entre una observación y otra. En el caso de la supernova de la fila superior, los puntos brillantes en la esquina superior izquierda de las imágenes de referencia y nueva corresponden al centro de la galaxia anfitriona; la supernova en sí, que no se ve en las primeras dos imágenes, se revela con claridad en el centro de la imagen de sustracción.

Cada 40 segundos durante las observaciones nocturnas, el Rubin captura una nueva región del cielo. Los datos viajan en cuestión de segundos desde Chile hasta el Centro de Datos ubicado en California, Estados Unidos, donde se realiza su procesamiento.

Cada variación activa una alerta en un plazo de dos minutos tras la captura.

Para interpretar el enorme volumen de datos que genera este sistema, la comunidad científica recurre a una red de plataformas de *software* inteligentes conocidas como *brokers*. Estos sistemas utilizan algoritmos de aprendizaje automático para filtrar, ordenar y clasificar las alertas antes de distribuirlas a los equipos científicos y observatorios.

Se prevé que esta inundación de información continúe durante diez años consecutivos mientras el Vera Rubin ejecuta su proyecto insignia, denominado Legacy Survey of Space and Time (LSST). Durante este periodo, el telescopio recorrerá el cielo para producir la mejor película de alta definición del firmamento jamás concebida por la humanidad.

Las alertas del Rubin son públicas para todo el mundo, lo que significa que cualquiera, desde investigadores profesionales hasta estudiantes, científicos y ciudadanos, podrá acceder a ellas y explorarlas. Se pueden consultar en el siguiente enlace: <<https://rubinobservatory.org/es/news/first-alerts>>.

Más información

Rubin Observatory (2026), "NSF-DOE Vera C. Rubin Observatory Launches Real-Time Discovery Machine for Monitoring the Night Sky". Disponible en: <<https://www.nsf.gov/news/nsf-doe-vera-c-rubin-observatory-launches-real-time>>.

La IA como coautora fantasma de la ciencia

Cuando investigadores e investigadoras emplean herramientas de inteligencia artificial (IA) generativa, como ChatGPT, para facilitar tareas en la redacción de sus artículos académicos, muchas revistas les exigen que revelen esta asistencia. El objetivo es mantener la transparencia en las publicaciones.

Sin embargo, un nuevo estudio realizado por Yongyuan He y Yi Bu, del Departamento de Gestión de la Información de la Universidad de Pekín, revela que gran parte de los científicos no reconocen el uso de la inteligencia artificial.

Para llegar a estas conclusiones, analizaron más de 5 millones de artículos publicados en 5 114 revistas entre 2021 y 2025. Tras revisar las políticas editoriales sobre el uso de IA, descubrieron que aproximadamente el 70 % de las revistas de la muestra ya cuentan con normativas al respecto y, en su mayoría, exigen que se transparente su empleo.

Para comprobar si estas reglas realmente se cumplían, los autores analizaron el estilo de redacción de los artículos mediante diversos métodos estadísticos, como la estimación de máxima verosimilitud que busca indicios de participación automatizada, por medio de la repetición inusual de ciertas palabras. Los resultados mostraron un aumento generalizado en la escritura asistida por IA en todas las disciplinas, independientemente de si la revista tenía políticas al respecto o no. El mayor crecimiento se registró en las ciencias físicas y en países de habla no inglesa, como China y Brasil.

El dato más alarmante del estudio evidencia una enorme brecha de transparencia: de una muestra de 75 000 artículos analizados a texto completo y publicados desde 2023, apenas 76 (aproximadamente el 0.1 %) declararon explícitamente el uso de IA.

Los autores sugieren que quizá los investigadores



De una muestra de 75 000 artículos científicos publicados entre 2023 y 2025, sólo 0.1 % declararon explícitamente el uso de IA. Crédito: Freepik.

temen que admitir el uso de IA lleve a los revisores a dudar sobre la originalidad y rigor de su trabajo, lo que podría dañar su reputación. Además, las reglas suelen ser confusas: si alguien usa la IA únicamente para revisar su gramática, podría pensar que la norma no le aplica, por ejemplo.

Los hallazgos sugieren que las políticas declarativas actuales han fracasado en su intento de promover la transparencia. Es por ello que los autores proponen reevaluar los marcos éticos y desarrollar lineamientos verificables que fomenten una integración verdaderamente responsable de la IA en la investigación científica.

Más información

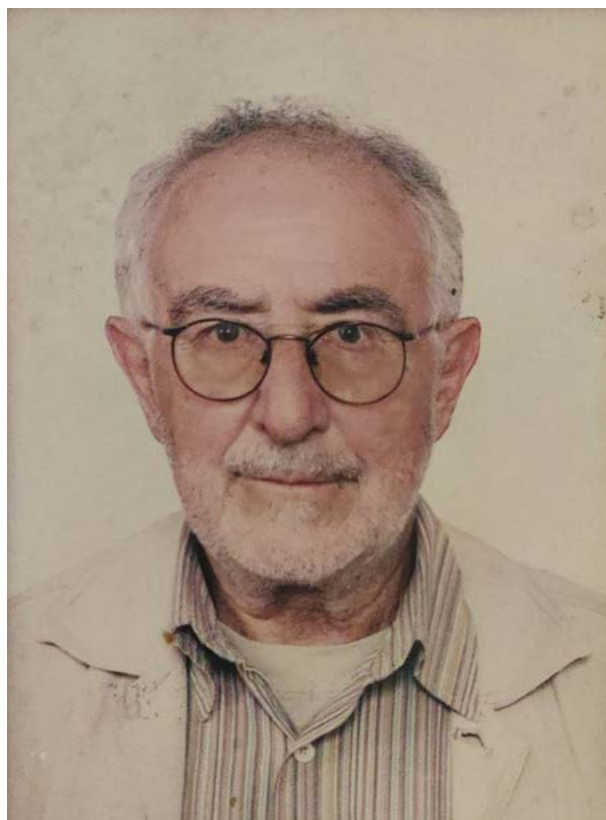
Y. He y Y. Bu. (2026), "Academic journals' AI policies fail to curb the surge in AI-assisted academic writing", *Proceedings of the National Academy of Sciences*. Disponible en: <<https://doi.org/10.1073/pnas.2526734123>>.

Noticias de la Academia Mexicana de Ciencias



Falleció el doctor Raúl Ávila, miembro destacado de la AMC y de El Colegio de México

La Academia Mexicana de Ciencias (AMC) y en particular el Comité Editorial de la revista *Ciencia*, órgano oficial de divulgación de la AMC, lamenta profundamente el sensible deceso del doctor Raúl Ávila, miembro prominente del comité de la revista incluso antes del nacimiento de su última época, allá por el año 2000. Aparte de uno de los artífices del programa del libro de texto gratuito en México, fue un adalid de la defensa de la plasticidad de las lenguas, impulsor de los derechos de sus hablantes a expresarse, así como de la riqueza lingüística del español que se habla en nuestro país.



La AMC dio a conocer a los ganadores de los Premios de la Academia a las mejores tesis de doctorado en ciencias sociales y humanidades 2025

La AMC dio a conocer los nombres de las y los ganadores de los Premios de la Academia a las mejores tesis de doctorado en ciencias sociales y humanidades de 2025, los cuales se otorgan desde 1996 a investigadores e investigadoras que no hayan cumplido 38 años, en el caso de los hombres, y 40 años en el de las mujeres, y cuyas tesis se hayan realizado en el país, en alguna institución acreditada.

La convocatoria anual de este premio se lleva a cabo en conjunto con nueve instituciones representativas de las ciencias sociales y las humanidades en México: la Universidad Nacional Autónoma de México, la Universidad Autónoma Metropolitana, El Colegio de México, la Facultad Latinoamericana de Ciencias Sociales, el Centro de Investigación y Docencia Económicas, el Instituto José María Luis Mora, el Centro de Investigaciones y Estudios Superiores en Antropología Social, el Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del IPN y el Instituto Nacional de Antropología e Historia.

Las ganadoras y el ganador de 2025 son:

Ciencias sociales

- Laura Candelaria García Navarro**
 Título de la tesis: *Estado social y pobreza en el siglo xx mexicano: las claves de su interacción*
 Doctorado en Ciencias Sociales
 Centro de Investigaciones y Estudios Superiores en Antropología Social, Unidad Occidente
 Tutor: Agustín Escobar Latapí
- Delmar Ulises Méndez Gómez**
 Título de la tesis: *Antsil winik. Afectividad, cuerpo y alteridad sexual en la juventud tseltal en Chiapas*
 Doctorado en Ciencias Antropológicas
 Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Iztapalapa
 Tutor: Rodrigo Díaz Cruz

Humanidades

- Leidy Jazmín Torres Cendales**
 Título de la tesis: *Entre silencio y sospecha: violación de mujeres en el Virreinato de la Nueva Granada, 1779-1808*
 Doctorado en Historia

Facultad de Filosofía y Letras e Instituto de Investigaciones Históricas, Universidad Nacional Autónoma de México
 Tutora: Estela Roselló Soberón

- Miriam García Apolonio**
 Título de la tesis: *El ritual postridentino y su música durante la labor misional jesuita en América*
 Doctorado en Historia
 Centro de Estudios Históricos, El Colegio de México
 Tutor: Bernd Hausberger

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 Tagüeña 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:



- 25 de noviembre de 2025**
 "Miradas cruzadas sobre mujeres en prisión: justicia, salud y arte"
 Marisa Belausteguigoitia
 Proyecto Mujeres en Espiral: Sistema de Justicia, Perspectiva de Género y Pedagogías en Resistencia, CIEG, UNAM
https://www.youtube.com/live/1KE1_Uob79g

Al término de la conferencia, se invitó a un panel de especialistas para comentar sobre el tema. Participaron Herlinda Aguilar Zavala de la Universidad de Guanajuato; Notza Alejandra Cruz Aburto del Programa Universitario de Gobierno; María Patricia Domínguez Echeverría de la UAM-Xochimilco, y Lorena Méndez Barrios, artista visual y activista de La Lleca, con Julia Tagüña, coordinadora de CITA, como moderadora.



- **24 de febrero de 2026**
"Mujeres y niñas en las ciencias: miradas que transforman aulas y espacios de investigación"
Norma Blázquez Graf
Centro de Investigaciones Interdisciplinarias en Ciencias y Humanidades-UNAM y Coordinación para la Igualdad de Género de la UNAM (CIGU).
<https://www.youtube.com/live/x5iLlmi6ccY>

Al término de la conferencia, se invitó a un panel de especialistas para comentar sobre el tema. Participaron Telma Castro, del Instituto de Ciencias de la Atmósfera y Cambio Climático de la UNAM y vicepresidenta de la Academia Mexicana de Ciencias; Tatiana Fiordelisio Coll, del Lansbiodyt de la Facultad de Ciencias de la UNAM, y Rubén Hernández Duarte de la Dirección de Políticas de Igualdad y No Discriminación de la CIGU-UNAM, con Julia Tagüña, coordinadora de CITA, como moderadora.

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. Las charlas más recientes han sido:



- **27 de enero de 2026**
Presentación del número dedicado a "Embarazo adolescente"
Héctor Borboa y Reyna Sámano
Instituto Nacional de Perinatología
<https://www.youtube.com/live/9MYggs575yY>
- **10 de febrero de 2026**
"Familia, afecto e identidad en el embarazo adolescente"
Reyna Sámano, del Instituto Nacional de Perinatología
David Robichaux, de la Universidad Iberoamericana
María del Carmen Hernández, del Instituto Nacional de Perinatología
https://www.youtube.com/live/n9JrB_LPEUM



- **3 de marzo de 2026**
"Hormonas, genes y hábitos en el embarazo adolescente"
Héctor Borboa Olivares, Irma Eloísa Monroy y Andrea Luna Hidalgo
Instituto Nacional de Perinatología
<https://www.youtube.com/live/BK0LaPimtXc>

Webinar "Tu mundo con ciencia"

Continúa el ciclo de conferencias "Tu mundo con ciencia", impartido por exbecarias ganadoras de las Becas para Mu-

jes 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. Las conferencias más recientes son:



- 13 de noviembre de 2025
"Los beneficios de oxigenar el agua"
Refugio Rodríguez Vázquez
Cinvestav
<https://www.youtube.com/live/HLo41uPpaWc>



- 11 de diciembre de 2025
"Insectos benéficos: entre abejas y avispas"
María de Lourdes Ramírez Ahuja
Universidad Autónoma de Nuevo León
<https://www.youtube.com/live/ZwnImYkxzyQ>
- 15 de enero de 2026
"La sustentabilidad y las energías renovables en 2026"
Julia Tagüña Parga
Centro de Ciencias de la Complejidad e Instituto de Energías Renovables, UNAM
<https://www.youtube.com/live/cw1RNwk-50E>



- 12 de febrero de 2026
"De las plantas a los materiales y la farmacéutica"
María Antonieta Fernández Herrera
Cinvestav
<https://www.youtube.com/live/vsYpg1qkFsg>



- 12 de marzo de 2026
"Nanobiosensores para detectar infecciones"
Shirley Elizabeth Martínez Tolibía
Instituto de Investigaciones en Materiales, UNAM
<https://www.youtube.com/live/Yct56MI2III>

En nuestro próximo número de
julio-septiembre de 2026

EL DENGUE, UNA AMENAZA GLOBAL



Casa abierta al tiempo

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA METROPOLITANA

