

Revista de
divulgación
científica

iBIO

Biotechnología a la vanguardia



Ciencia que se
transforma en
soluciones

Revista de divulgación científica iBIO,
Año 7, No. 2, julio 2025 - octubre 2025,
es una publicación electrónica cua-
trimestral. Insurgentes norte 1260
509, Capultitlán, Gustavo A. Madero
CP:07370, Ciudad de México, México.
Página electrónica de la revista: [www.
revistaibio.com](http://www.revistaibio.com) y dirección electróni-
ca: jessica.sanchezvarg@gmail.com.
Editor responsable: Jessica Sánchez
Vargas. Certificado de Reserva de De-
rechos al Uso Exclusivo de Título: 04-
2023-010910182600-102. ISSN: 2954-
4890. Ambos otorgados por el Instituto
Nacional del Derecho de Autor.

Responsable de la última actualiza-
ción de este número: M. en B. Jessica
Sánchez Vargas. Fecha de última mo-
dificación: 26 de junio de 2025. Tama-
ño del archivo: 28.8 MB.

Los derechos de publicación y distri-
bución de los artículos pertenecen a la
Revista de divulgación científica iBIO.
Los artículos se publican bajo un li-
cenciamiento de tipo:

Reconocimiento - No Comercial - Sin
Obra Derivada (CC BY-NC-ND 4.0).

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

Las portadas utilizadas en este núme-
ro fueron generadas por inteligencia
artificial en InDesign.

Directorio

Editor en jefe

Jessica Sánchez Vargas

Editor subjefe

Isauro Guzmán Cortez

Editores asociados

Olga B. Benítez López
Francisco J. Valdés Parada
Viridiana W. Velázquez Vázquez
Briseida Flores Tufiño
Claudia Sinahi Ortega Aguilar
Jesús Torres Rizo

Galerado

Jessica Sánchez Vargas

Redes sociales

Bryan A. Polito Palma



revistaibio.com



[/revista.ibio](https://www.facebook.com/revista.ibio)



[ibio.revista](https://www.instagram.com/ibio.revista)

Contenido

Artículo	Pág.	Dificultad de la lectura
Hot Science El abuelo virus: la inesperada herencia que podría salvar vidas. <i>Francisca Villanueva-Flores, Ashley Gutierrez-Onofre, Igor Garcia-Atutxa</i>	4	
Guardaespaldas de la salud: aceites esenciales <i>Dulce del Carmen Velásquez-Reyes, José Haro-González</i>	10	
La química del vino tinto: compuestos responsables del color, aroma y sabor <i>Miguel Ángel Hernández-Carapia, José Ramón Verde-Calvo, Frida Pura Malpica-Sánchez</i>	17	
Biotecnología aplicada al patrimonio cultural: estrategias para la preservación del patrimonio edificado <i>Benjamín Otto Ortega Morales, Juan Carlos Camacho-Chab, José Alberto Narváez-Zapata</i>	23	
Biotecnología al rescate: ¿el fin de las invasiones de sargazo? <i>Enrique Salgado-Hernández, Mayela Martínez-Cano</i>	30	
¿Cómo funciona? ¿Vacunas comestibles? El futuro de la vacunación <i>Francisca Villanueva-Flores, Igor Garcia-Atutxa</i>	36	
Brilla, brilla, estrellita: Técnicas de microscopía de superresolución para iluminar el nanomundo <i>Josue David Hernández-Varela, Susana Dianey Gallegos-Cerda, José Jorge Chanona-Pérez</i>	42	
El ATAC-seq, la llave para abrir los secretos del genoma <i>Jaqueline Hersch-González, Víctor Julián Valdés</i>	50	
Concientifica El futuro de los materiales antimicrobianos <i>Ravichandran Manisekaran, Veronica Campos-Ibarra</i>	57	
Hongos patógenos de insectos, nuestros aliados en la producción de alimentos <i>Gerardo Suárez-Vergel, Paulina Gómez-Flores, Marcos López-Pérez</i>	63	
Bioemprendimientos El papel del financiamiento gubernamental para incentivar la biotecnología en las empresas <i>Lilia Itzel Álvarez-León</i>	69	



Nivel
bachillerato

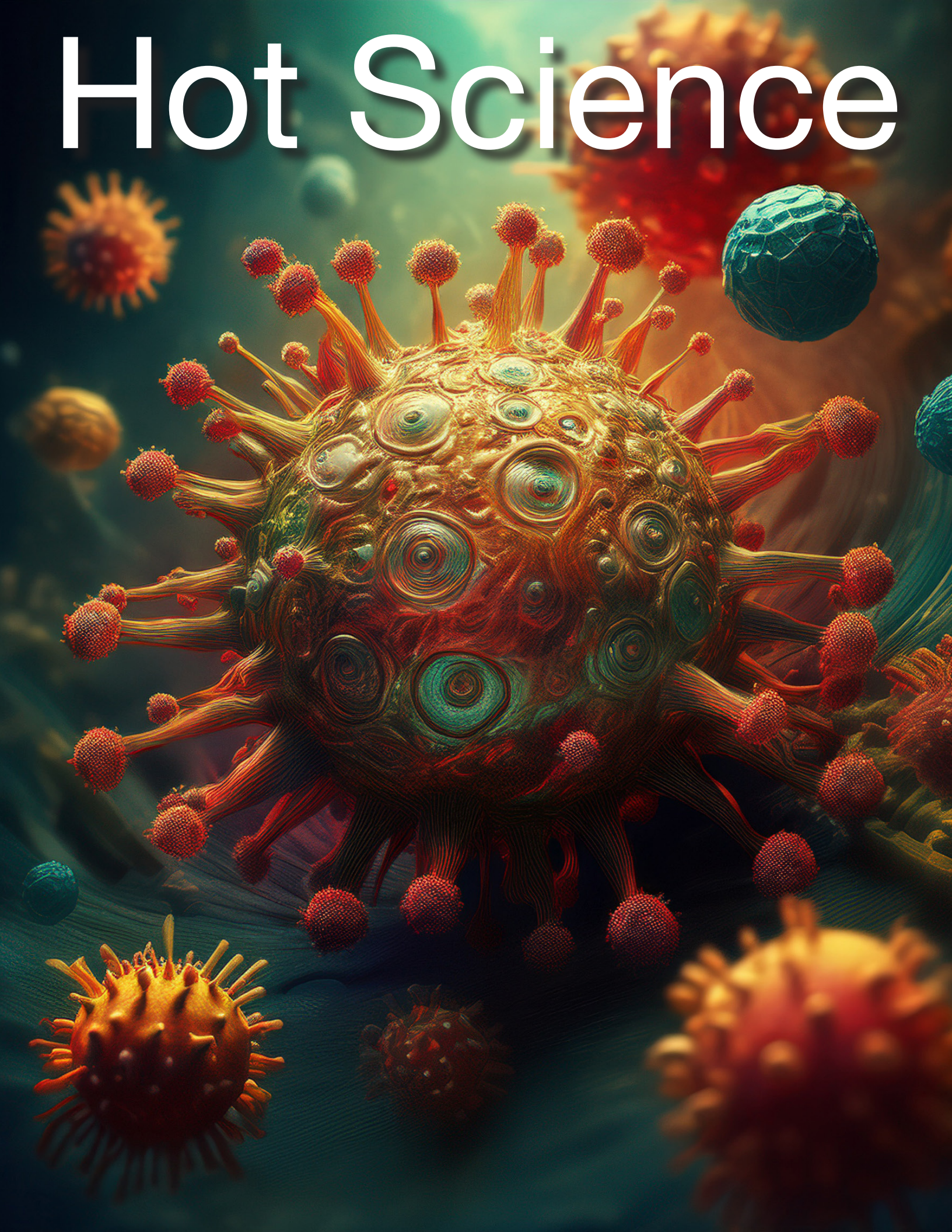


Nivel
licenciatura



Nivel
maestría

Hot Science



El abuelo virus: la inesperada herencia que podría salvar vidas

The grandfather virus: the unexpected legacy that could save lives

Francisca Villanueva-Flores^{1*}
Ashley Gutierrez-Onofre¹
Igor García-Atutxa²

Resumen

¿Sabías que en nuestro ADN hay pequeños vestigios de virus antiguos con los cuales nos infectamos hace millones de años? Curiosamente, el cuerpo aprendió a hacer entonces uso de ellos. Científicos identificaron un gen llamado PEG10, el cual proviene específicamente de un virus ancestral, e hicieron el descubrimiento de que es capaz de crear pequeñas cápsulas naturales para transportar mensajes genéticos en células objetivo. Este descubrimiento inspiró el desarrollo de SEND, un tipo de “Uber molecular” para enviar la información genética donde es necesaria, abriendo la puerta para terapias génicas e inmunes más seguras y personalizadas, específicas para cada población.

Palabras clave: Retrotransposones, retrotranscrito, partículas similares a virus.

Summary

Did you know our DNA contains small traces of ancient viruses that infected us millions of years ago? Interestingly, our bodies eventually learned to make use of them. Scientists identified a gene called PEG10, which originates from an ancestral virus, and discovered that it can create small natural capsules to transport genetic messages to target cells. This discovery inspired the development of SEND, a “molecular Uber” type designed to deliver genetic information precisely where needed, opening the door to safer and more personalized gene and immune therapies, explicitly tailored to each population.

Keywords: Retrotransposons, reverse-transcribed, virus-like particles.

¹Centro de Investigación en Ciencia Aplicada y Tecnología Avanzada, Instituto Politécnico Nacional, Boulevard de la Tecnología, 1036 Z-1, P 2/2, 62790, Xochitepec, Morelos, México.

²Departamento de ciencias de la computación. Universidad Católica de Murcia (UCAM), Av. de los Jerónimos, 135, 30107, Murcia, España.

*Autor para la correspondencia:
fvillanuevaf@ipn.mx

Introducción

Imagina que los virus son como pequeños ninjas microscópicos capaces de infiltrarse en nuestras células y dejar instrucciones para reproducirse dentro de ellas, causando enfermedades. Sin embargo, no todos los virus han sido dañinos para la humanidad, algunos dejaron su huella en nuestro ADN y se convirtieron en aliados biológicos (Figura 1).

La virotecnología, es el área favorita de la biotecnología para algunos grupos de trabajo, incluidos el nuestro, pues aprovecha las capacidades virales para desarrollar herramientas médicas únicas. Un ejemplo es el uso de partículas similares a virus (VLPs), estructuras hechas de las proteínas de la cápside de los virus que carecen de material genético, lo que impide que puedan infectarnos y su uso es seguro en medicina como la generación de vacunas o máquinas moleculares fantásticas conocidas como nanobiorreactores [1,2]. En la Figura 2 se muestran algunas de las aplicaciones más sobresalientes de las VLPs.

La virotecnología, es el área favorita de la

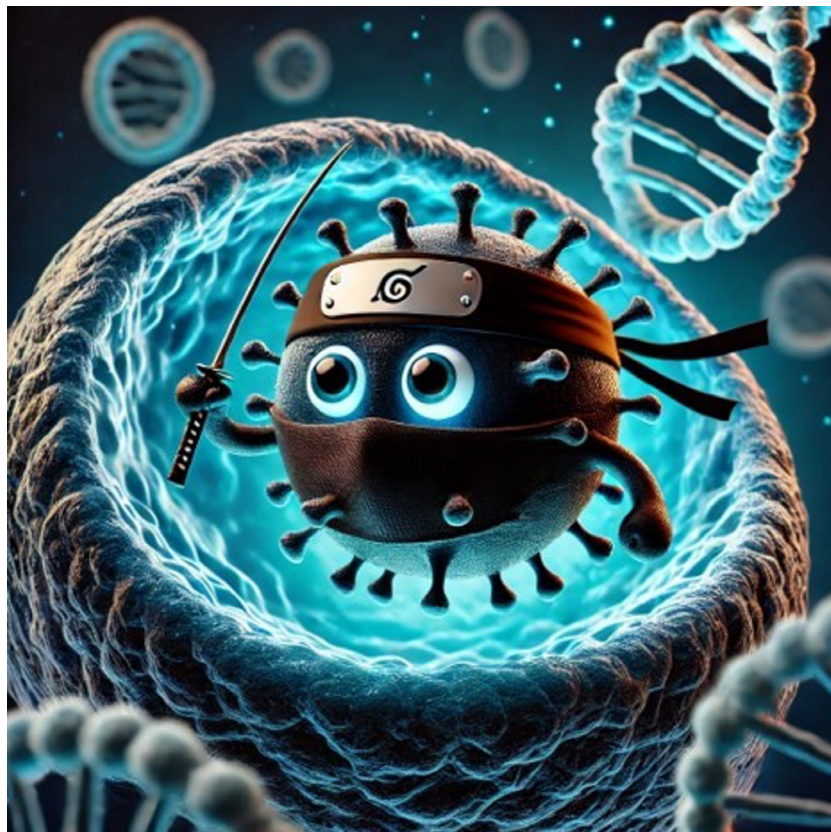


Figura 1. Caricatura de un virus representado como un pequeño ninja microscópico que silenciosamente es capaz de infectar nuestras células. Dibujo realizado con ChatGPT 4.0.

ción genética en nuestro ADN, que fueron heredados generación tras generación a lo largo de la evolución. Estos fragmentos atrapados en nuestro genoma se conocen como retrotransposones, que son elementos genéticos móviles que pueden copiarse y moverse dentro del genoma. Algunos retrotransposones evolucionaron hasta desempeñar funciones benéficas en lugar de perjudiciales [3].

Uno de los elementos esenciales en este proceso es la secuencia GAG, un segmento de ADN derivado de virus retrotranscritos, es decir, virus que convierten su ARN en ADN para integrarlo en el genoma del huésped. En los virus, esta región codifica proteínas estructurales que permiten la formación de la cápside viral, una especie de “envoltorio” que protege su material genético. En el caso de PEG10, la

biotecnología para algunos grupos de trabajo, incluidos el nuestro, pues aprovecha las capacidades virales para desarrollar herramientas médicas únicas. Un ejemplo es el uso de partículas similares a virus (VLPs), estructuras hechas de las proteínas de la cápside de los virus que carecen de material genético, lo que impide que puedan infectarnos y su uso es seguro en medicina como la generación de vacunas o máquinas moleculares fantásticas conocidas como nanobiorreactores [1,2]. En la Figura 2 se muestran algunas de las aplicaciones más sobresalientes de las VLPs.

Recientemente se ha descubierto una nueva clase de VLPs basadas en la proteína humana PEG10, un vestigio genético heredado de antiguos virus. Hace millones de años, ciertos virus integraron fragmentos de su informa-

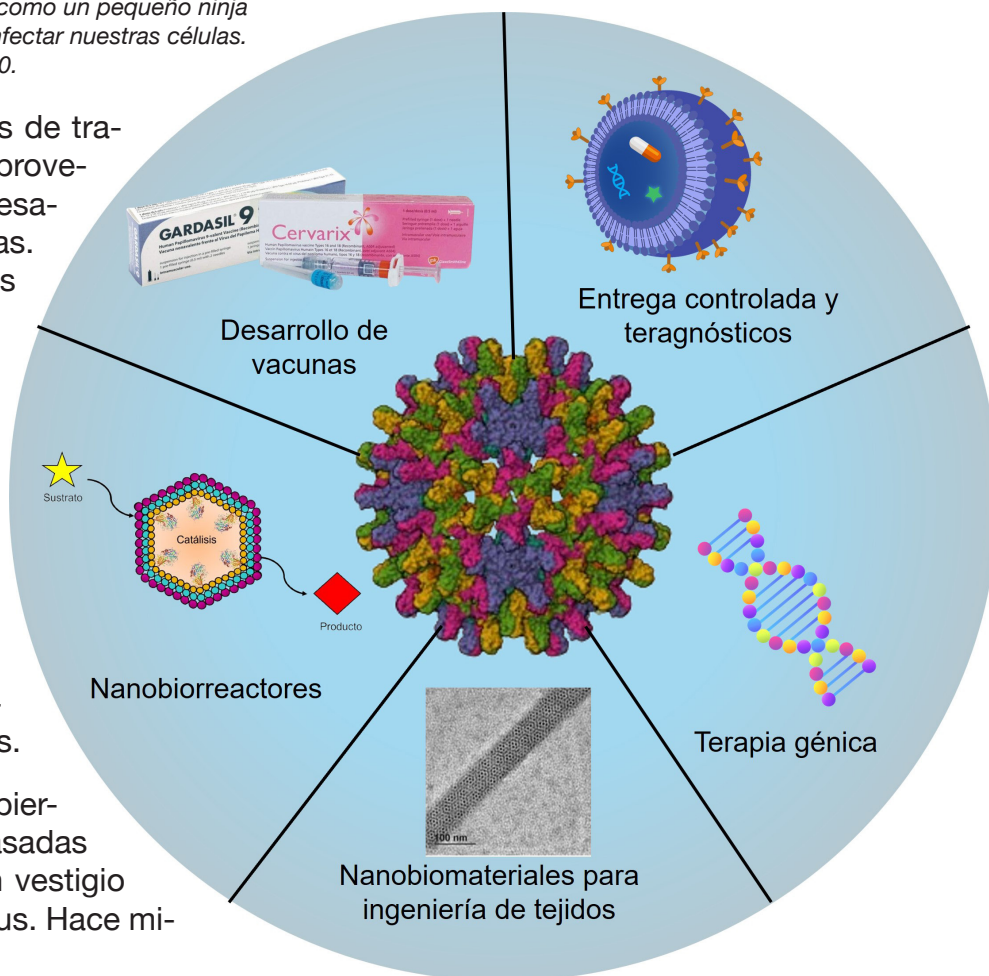


Figura 2. Aplicaciones de las VLPs en medicina y biotecnología. Se emplean en vacunas (como Gardasil y Cervarix contra el VPH), en la entrega de medicamentos de manera precisa y para diagnóstico, en terapia génica para tratar enfermedades hereditarias, en la creación de materiales para regenerar tejidos y como minifábricas de reacciones químicas para producir sustancias útiles (nanobiorreactores).

secuencia GAG se conservó y adaptó para empaquetar ARN, lo que la convierte en una herramienta ideal para desarrollar sistemas de transporte de genes sin la necesidad de usar virus activos. Se sabe que la proteína PEG10 juega un papel clave en el desarrollo de la placenta y la implantación del embrión durante el embarazo, aunque se expresa tanto en hombres como en mujeres. También está presente en otros tejidos como el cerebro y el hígado, participando en la regulación del crecimiento celular [3].

Los primeros que describieron de esta poderosa herramienta fueron el grupo del Dr. Zhang del Broad Institute del MIT y Harvard ellos observaron que PEG10 puede formar una nueva clase de nanopartículas humanas hasta ahora desconocidas, las cuales son capaces de transportar ARN mensajero dentro de las células. Inspirados por esta capacidad, desarrollaron SEND (*Selective Endogenous eNcapsidation for cellular Delivery*), una plataforma que utiliza este mecanismo natural para entregar ARN con precisión, lo que podría revolucionar las terapias génicas al reducir riesgos y aumentar la eficacia de las mismas [3].

Protección de la propiedad intelectual en la plataforma SEND

La plataforma SEND fue patentada en 2020 (WO2021055855A1). Sin embargo, la proteína PEG10 y su secuencia GAG no están patentadas, ya que forman parte natural del ADN de los mamíferos, incluido el humano. Esto significa que otros equipos de investigación pueden explorar su uso en terapias génicas y adaptarlo con enfoques distintos, siempre y cuando no infrinjan los detalles específicos del sistema SEND que tiene protección de propiedad intelectual.

¿Cómo funciona la plataforma SEND?

Imagina que quieres enviar un archivo muy importante a un amigo tuyo, pero en lugar de subirlo a una nube donde cualquiera podría acceder o hackearlo, tienes una tecnología que lo envía directamente, de forma segura a su teléfono, sin que nadie más pueda interceptarlo. Eso es lo que hace SEND, pero en lugar de ar-

chivos, transporta información genética dentro del cuerpo.

En la Figura 3 se muestra un esquema de cómo funciona el sistema SEND. Primero, se crea el mensaje: para que el mensaje llegue a la célula correcta, se necesita un conjunto de instrucciones que colocamos en plásmidos, fragmentos circulares de ADN que incluyen la secuencia del gen que codifica la proteína PEG10, la proteína que “empaqueta” el ARN cargo (el mensaje genético que queremos entregar) y el “fusógeno”, un gen que funciona como una contraseña para que el mensaje entre en la célula objetivo. Esta información se introduce en una célula productora, que es como un servidor encargado de generar y preparar los paquetes. Luego, dentro de la célula, PEG10 encapsula el ARN cargo formando pequeñas VLPs. Estas nanopartículas funcionan como un sistema de transferencia súper eficiente, asegurando que el mensaje llegue intacto a su destino sin filtraciones ni errores. A continuación, los paquetes están listos, la célula productora los libera y comienzan a viajar por el cuerpo, buscando su destino. Finalmente, cuando las VLPs de PEG10 llegan a la célula correcta, la proteína fusógena actúa como la contraseña necesaria para permitir la entrada. Una vez dentro, el mensaje se “descarga” y la célula lo interpreta, permitiéndole producir la proteína necesaria para realizar la función que se buscaba. ¡Este es un sistema increíblemente eficiente de encriptación molecular de mensajes!

La revolución SEND en el desarrollo de nuevas terapias y vacunas

A diferencia de otros métodos que usan virus modificados para enviar información genética, SEND aprovecha herramientas naturales del propio cuerpo humano para hacer entregas precisas y seguras. Esto podría cambiar la forma en que se tratan enfermedades genéticas. Imagínate que hay un error en el manual de instrucciones de una célula (su ADN), con estas VLPs podríamos corregir este error y curar enfermedades genéticas.

Las VLPs tienen una gran ventaja: pueden

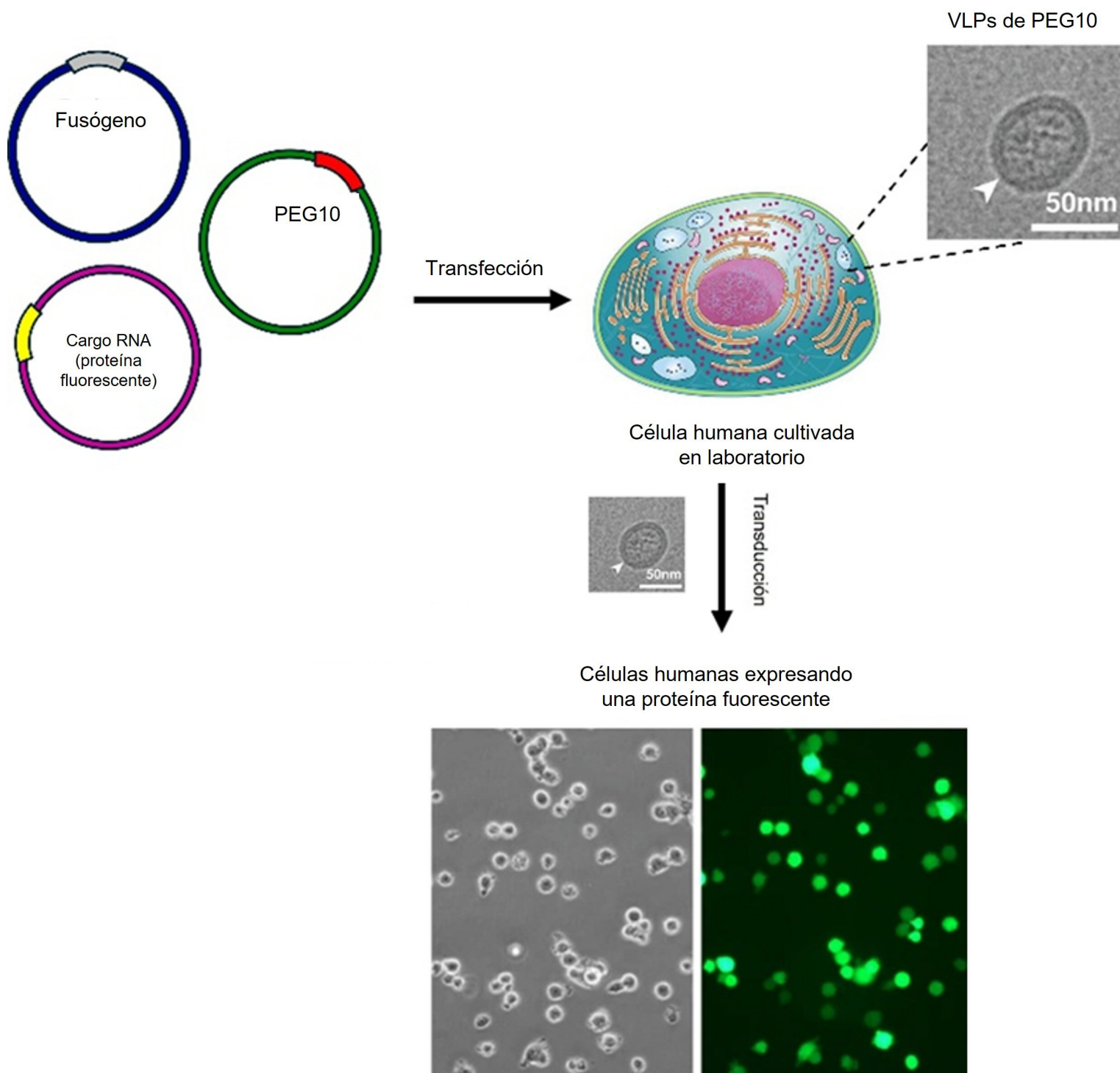


Figura 3. Proceso de empaquetamiento y entrega de ARN utilizando partículas similares a virus (VLPs) basadas en PEG10 mediante el sistema SEND. Primero, se realiza la transfección, un proceso en el que se introducen en una célula productora tres elementos clave: PEG10 (una proteína que ayuda a formar las partículas), ARN de carga (que en este caso es un modelo diseñado para expresar una proteína fluorescente), y una proteína fusógena (que facilita la entrada del mensaje en las células objetivo). Dentro de la célula productora, PEG10 empaqueta el ARN en VLPs, que luego son liberadas. Estas VLPs pueden ingresar a las células objetivo en un proceso llamado transducción, en el cual las partículas entregan su contenido genético sin necesidad de virus infecciosos. Una vez dentro, la célula objetivo utiliza el ARN entregado para producir la proteína fluorescente, lo que permite visualizar y evaluar la eficiencia del sistema de entrega. Modificado de Segel et al., 2021.

llevar los medicamentos justo donde se necesitan, como si fueran drones de entrega ultra precisos dentro del cuerpo. Esto permite usar dosis mucho menores, evitando que el fármaco se disperse innecesariamente. Además, al estar hechas de una proteína natural en nuestro organismo, el riesgo de efectos secundarios sería mínimo o incluso nulo [4]. Aunque esta tecnología no se ha evaluado en humanos, el impacto de ella en la medicina del futuro es muy prometedor.

Retos actuales y perspectivas futuras hacia la aplicación clínica de la plataforma SEND

Los avances recientes en la plataforma SEND han mostrado un tremendo potencial para revolucionar las terapias génicas e inmunes en la medicina del futuro. Sin embargo, todavía falta realizar ensayos clínicos en humanos que confirmen su seguridad y eficacia. También se requiere optimizar la especificidad en la entrega del ARN, el control preciso de la dosis administrada y la estandarización del proceso de fabricación de las VLPs basadas en PEG10, garantizando así resultados reproducibles y confiables.

Para abordar estos desafíos, deberá perfeccionarse todavía el diseño molecular para mejorar la eficiencia del transporte celular, la evaluación rigurosa de posibles respuestas inmunes no deseadas, y la validación en modelos animales. Atender estos puntos clave facilitará la transición de SEND hacia aplicaciones clínicas seguras y efectivas, impulsando tratamientos personalizados que podrían transformar significativamente la práctica médica actual. Y, ¿quién sabe?, tal vez seas tú, querido lector o lectora quien podría ser el que lo haga realidad.

Conclusiones

A lo largo de millones de años, los virus han dejado su huella en nuestro ADN, como si fueran un abuelo transmitiendo su legado a las nuevas generaciones. Hoy, SEND es la prueba de que esa herencia puede convertirse en una herramienta poderosa para la medicina. Esta tecnología, basada en procesos biológicos naturales, nos abre la puerta a tratamientos más

seguros y personalizados. Aún hay retos por superar, pero el potencial de SEND para mejorar la salud humana es inmenso. A medida que la investigación avanza, podríamos estar presenciando una transformación en la forma en que tratamos las enfermedades genéticas, con soluciones innovadoras que antes parecían imposibles. **iBIO**

Agradecimientos

Se agradece el financiamiento otorgado por los proyectos SIP20242814, SIP20250306 y SIP20251096 del Instituto Politécnico Nacional para la realización de este trabajo. Se declara que se utilizó la herramienta ChatGPT 4.0 únicamente como apoyo para la revisión ortográfica, el diseño conceptual de una figura y mejoras en la claridad del estilo de redacción en algunas secciones del texto, sin comprometer la originalidad ni rigor científico del manuscrito.

Referencias

- [1] Comas-García M, Colunga-Saucedo M, Rosales-Mendoza S. The Role of Virus-Like Particles in Medical Biotechnology. *Mol Pharmaceutics*. 2020 Dec 7;17(12):4407–20. <https://doi.org/10.1021/acs.molpharmaceut.0c00828>
- [2] Villanueva-Flores F, Parra-González M, Nájera-Maldonado L. Nanobioreactores: Unidad mínima de la ingeniería bioquímica. *Conversus*. 2025 (170):38–41.
- [3] Segel M, Lash B, Song J, Ladha A, Liu CC, Jin X, et al. Mammalian retrovirus-like protein PEG10 packages its own mRNA and can be pseudotyped for mRNA delivery. *Science*. 2021 Aug 20;373(6557):882–9. <https://doi.org/10.1126/science.abg6155>
- [4] Villanueva-Flores F, Pastor AR, Palomares LA, Huerta-Saquer A. A Novel Formulation of Asparaginase Encapsulated into Virus-like Particles of Brome Mosaic Virus: In Vitro and In Vivo Evidence. *Pharmaceutics*. 2023 Aug 31;15(9):2260. <https://doi.org/10.3390/pharmaceutics15092260>



Hot Science

Guardaespaldas de la salud: aceites esenciales

Health bodyguards: essential oils

Resumen

No hay enfermedad que supere el poder de los remedios caseros de nuestras abuelas, hoy respaldados por la ciencia, especialmente los aceites esenciales. El eucalipto alivia la congestión, el clavo es un analgésico natural, la citronela protege contra mosquitos y la lavanda reduce el estrés. Cargados de compuestos bioactivos, sus propiedades sorprenden. Además de favorecer el bienestar, su potencial biológico abre nuevas puertas en la industria farmacéutica, alimentaria y cosmética, ofreciendo productos que podrían convertirse en los remedios del futuro.

Palabras clave: Aceites esenciales, compuestos bioactivos, herbolaria

Summary

No illness surpasses the effectiveness of our grandmothers' home remedies, now supported by science, especially essential oils. Eucalyptus alleviates congestion, clove is a natural pain reliever, citronella wards off mosquitoes, and lavender calms stress. Packed with bioactive compounds, their benefits are remarkable. Beyond promoting well-being, their biological potential paves new avenues in the pharmaceutical, food, and cosmetics industries, providing products that could evolve into future innovations and remedies.

Keywords: Essential oils, bioactive compounds, herbalism.

Dulce del Carmen Velásquez-Reyes^{1,2*}
José Haro-González²

¹Universidad Veracruzana, Veracruz, México.

²Centro de investigación y Asistencia en Tecnología y Diseño del Estado de Jalisco, Jalisco, México.

*Autor para la correspondencia:
dcvr94@hotmail.com

■ Mi abuelita no es una mentirosa! Eso le digo a cada persona cuando le recomiendo los remedios caseros de mi abuelita y casi siempre me hacen caras como de “Guacala”, “¡Qué asco, no me tomare eso!”, “No creo que eso funcione”, etc. Pero imagínate como cuestionas la sabiduría de una persona ¡con más de 80 años de experiencia! (Figura 1).

Por mucho tiempo nos hemos cuestionado si los remedios son solo eso, un simple remedio, o qué hay detrás de ellos que nos hacen tanto bien. Recuerdo un día en el que corrí a casa de mi abuelita para pasar el día completo con ella y que me contara de los remedios caseros más efectivos que ella usaba. Cuando llegué a la casa de mi abuelita, la encontré en su jardín regando las plantas. Dándome cuenta de la gran variedad de flores, plantas y arbustos, cada una de ellas con letreros que indicaban sus nombres como menta, eucalipto, manzanilla y otras más. Siempre cuidando su jardín con mucho cariño y dedicación. Mientras ella me relataba sus secretos, yo buscaba información científica para respaldar no solo los beneficios de los remedios sino también la reputación de mi sabia abuelita. En cuanto le conté mis intenciones y que venía en modo detective, ella me

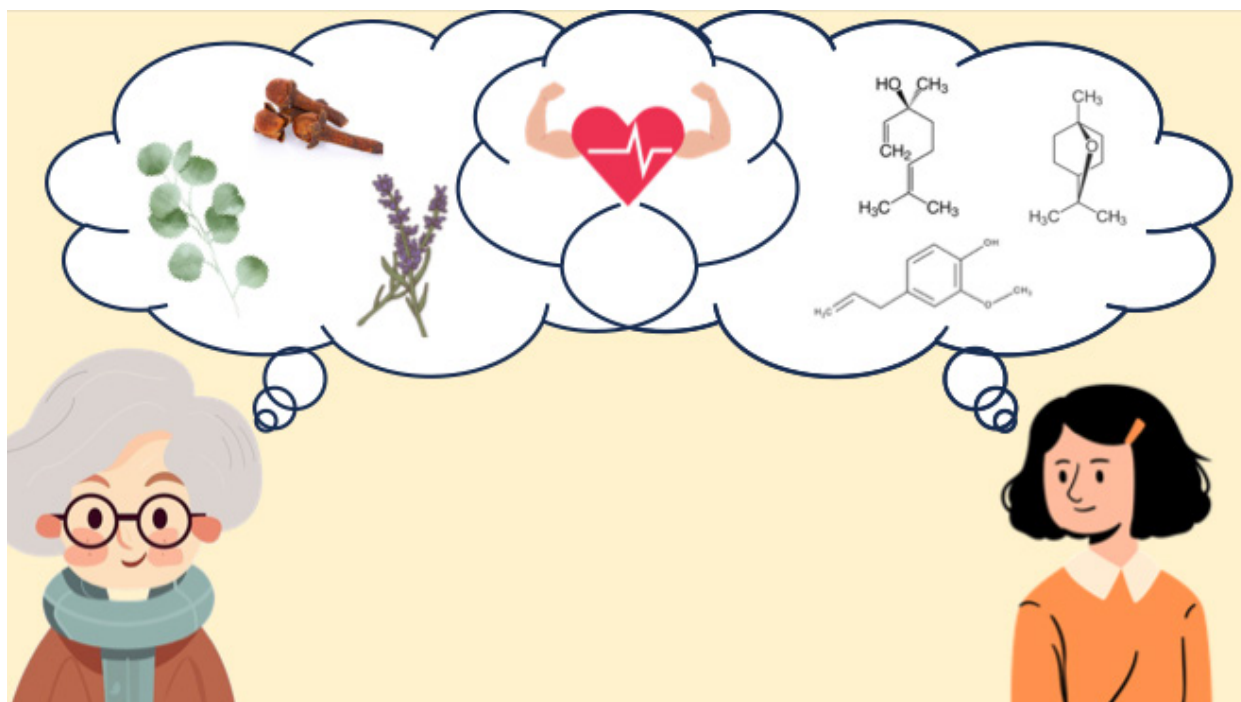


Figura 1. Experiencias y saberes de mi abuelita y yo compartidos.

dio una libretita y comencé a anotar todos sus secretos. Fue tanto mi emoción de poder trabajar con mi abuelita para respaldar sus conocimientos, que hasta hice una tabla con los compuestos mayoritarios o presentes en los aceites esenciales de las plantas que usa mi abuelita, para poder identificar cómo se representan sus estructuras químicas (Tabla 1). Los compuestos bioactivos son moléculas que, más allá de proporcionar beneficios nutricionales como calorías, proteínas o vitaminas, contribuyen al cuidado de la salud mediante acciones preventivas y terapéuticas específicas.

Me comentó que, aunque muchas personas para hacer sus remedios caseros suelen utilizar partes de plantas como hojas, tallos y flores de especies como la menta, naranja, limón, canela, comino, pimienta, romero, té de limón, lavanda, eucalipto, citronela o clavo. Ella prefería comprar los aceites esenciales por dos razones: su practicidad de uso y su riquísimo olor.

Ella me contó que cuando era pequeña y me enfermaba de gripe, con tos, fiebre y dolor en el pecho, rápidamente iba a su cocina y regresaba con un recipiente oscuro, lo que siempre indicaba la llegada de su remedio casero. Su solución consistía en aplicar aceite esencial

de eucalipto en mi pecho y un poco más junto a mi cama para que el aroma continuara actuando durante la noche. Para confirmar este remedio, busqué cuáles compuestos le confieren ese poder antigripal al aceite esencial de eucalipto. Para nada me sorprendió encontrar que se ha documentado que el aceite esencial de eucalipto contiene diversos compuestos bioactivos con propiedades antisépticas, descongestionantes y expectorantes (Figura 2). Los compuestos bioactivos principales presentes en el aceite esencial de eucalipto son el eucaliptol, el limoneno y el alfa-pineno. De hecho, investigaciones recientes han permitido aislar estos compuestos para evaluar de manera individual su potencial en la prevención y tratamiento de diversas enfermedades. El aceite esencial de eucalipto tiene otras actividades biológicas valiosas, como antimicrobianas, antisépticas, antioxidantes y quimioterapéuticas, así como su aplicación en el tratamiento de enfermedades digestivas, la mejora en la cicatrización de heridas y como repelente de insectos. Además, de utilizarse en la producción de perfumes, jabones, desengrasantes y como herbicida, acaricida y nematocida (Figura 2) [1].

Después, me hizo recordar que cuando me extrajeron las muelas del juicio, para calmar

Tabla 1. Compuestos mayoritarios presentes en los aceites esenciales de las plantas.

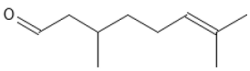
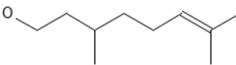
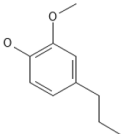
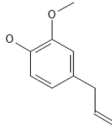
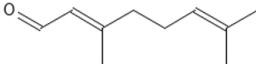
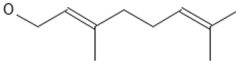
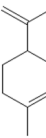
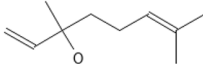
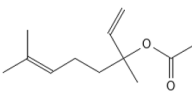
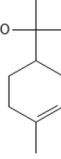
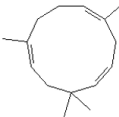
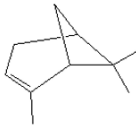
Compuesto	Estructura	Clavo de olor	Citronela	Lavanda	Eucalipto
Eucaliptol					✓
Citronelal			✓		
Citronelol			✓		
Dihidro-eugenol					✓
Eugenol		✓	✓		
Geranio			✓		
Geraniol			✓		
Limoneno			✓	✓	
Linalol			✓	✓	
Acetato de linalilo				✓	
Terpineol					✓
α -humuleno		✓			
α -pineno				✓	✓



Figura 2. Propiedades de los aceites esenciales para la salud humana [1-4].

el dolor intenso y la inflamación, ella me aplicaba aceite esencial de clavo de olor en las encías para aliviar el malestar. olvidarme del dolor y ayudar en la cicatrización. Así es, el mismo clavo de olor que consumimos en platillos como el pozole o en agua de horchata. Sé que esto puede sonar extraño, pero mi abuelita siempre tenía aceite de clavo en su cocina y solía decir que su madre le había transmitido el siguiente consejo: “Si el dolor de dientes quieres calmar, el aceite de clavo te puede ayudar”. Tras recordar la historia busqué y corroboré que el bioactivo principal del aceite esencial de clavo es el eugenol, el cual que posee propiedades analgésicas, anestésicas, anti nociceptivas, antiinflamatorias y antisépticas, lo que lo convierte en un remedio efectivo para el dolor dental [2]. Además de sus efectos sobre el dolor, el aceite esencial de clavo también contribuye a la prevención de caries y control del crecimiento de microorganismos en la cavidad bucal. Curiosamente, el eugenol se encuentra en algunas formulaciones de pasta dental, lo que evidencia su eficacia. Su mecanismo de acción se basa

en la capacidad de bloquear ciertos canales de comunicación en las membranas celulares de la boca, lo que interrumpe la transmisión de la sensación dolorosa entre las células, reduciendo así la percepción del dolor [2]. Además, se ha demostrado que el aceite esencial de clavo posee otras actividades beneficiosas, tales como antivirales, insecticidas, repelentes, anti-diarréicas y antipiréticas (Figura 2) [2].

Por la tarde cuando pasamos del jardín a la casa, mi abuelita se puso a cerrar todas las ventanas de la casa, ya que durante el día habían entrado muchos mosquitos. Y si hay algo que realmente me molesta por no decir más feo, son los mosquitos. En eso mi abuelita me dijo cierra los ojos y me roció con un atomizador que dispersaba un aceite con notas cítricas; sin embargo, no se trataba de un aceite esencial de naranja o limón, como podría esperarse, sino de un aceite extraído de una planta denominada *Cymbopogon nardus*, conocida comúnmente como citronela. Cuando investigué los principales compuestos bioacti-

vos presentes en el aceite esencial de citronela, descubrí que son el alcanfor, eucaliptol, eugenol, linalol, citronelal y citral [3] (Tabla 1). Estos compuestos desempeñan un papel clave en la protección y repulsión de los mosquitos (Figura 2). Aunque experimenté cierta efectividad con el aceite esencial de citronela, sentí que necesitaba algo más, algo mejor, así que decidí buscar una crema o gel que fuera más fácil de aplicar y que, al mismo tiempo, ofreciera una sensación refrescante. A lo largo de los años, estas fórmulas han mejorado propiedades que el aceite esencial de citronela por sí solo no podía ofrecer, como una protección más duradera (gracias a que se volatiliza menos) y una menor irritación en la piel, algo importante para mí. Aunque el efecto del aceite esencial de citronela no dura tanto como el de los repelentes comerciales que contienen DEET (N,N-Dietil-meta-toluamida), una sustancia química que se ha utilizado durante décadas debido a su alta eficacia para repeler mosquitos y otros insectos por su acción prolongada y efectividad en entornos con una alta exposición a insectos, se ha comprobado que la citronela también es eficaz contra mosquitos que transmiten enfermedades como el dengue, Zika, Chikungunya, fiebre amarilla, fiebre del virus del Nilo Occidental y malaria (paludismo) [3]. El DEET es preferido en los repelentes comerciales, sin embargo, el aceite esencial de citronela, que es natural, sigue siendo una opción popular para quienes buscamos alternativas más suaves y ecológicas. Personalmente, mis productos favoritos son los que combinan citronela con vainillina, ya que además de repeler los mosquitos, tienen un aroma mucho más agradable.

Al acercarse la noche y yo sin haber comprado la cartulina para mañana y con la temporada de exámenes finales en el horizonte, el estrés y la ansiedad comenzaban a aumentar ante la carga de materias y proyectos pendientes. En estos días antes de que el estrés me dejara sin cabello, mi abuelita siempre me rellenaba un frasco de aceite de lavanda que ella misma preparaba de manera artesanal. Este aceite artesanal de lavanda también conocido como oleato, se obtiene por maceración, un

proceso en el que partes de la planta se deja reposar durante varios días en un aceite base, como el aceite de coco extra virgen o el de almendras. Para su elaboración, es recomendable secar previamente las flores de lavanda al sol, asegurándose de que no conserven humedad para evitar el crecimiento de bacterias y hongos. Luego, se colocan en un frasco de vidrio limpio y seco, y se cubren completamente con el aceite. Tras un periodo de maceración de 4 a 6 semanas en un lugar oscuro, como la alacena, el aceite se filtra y se transfiere a un frasco limpio para su almacenamiento y uso. Aunque el proceso es relativamente largo, los beneficios hacen que valga la pena. Hasta el día de hoy uso y recomiendo el aceite de lavanda en situaciones de estrés, ya que contiene compuestos bioactivos como el linalol y el acetato de linalilo, que actúan como sedantes naturales, promoviendo la relajación y reduciendo la ansiedad [4]. Además, diversos estudios han demostrado su eficacia en la reducción del dolor de parto y la dismenorrea, en la mejora de la cicatrización, en la disminución de los síntomas de la depresión, mejorando la calidad del sueño y, en algunos casos, ayudando a reducir los niveles de glucosa en sangre (Figura 2) [4].

Pero ¿hay algún inconveniente o problema con los aceites esenciales? En general, los aceites esenciales son considerados seguros para las personas por la FDA (Administración de Alimentos y Medicamentos de EE. UU.). Sin embargo, su composición puede variar dependiendo de varios factores, como la etapa de crecimiento de la planta, las condiciones en que se cultiva, el tratamiento previo, el procesamiento y los métodos de extracción. Aunque los métodos tradicionales de obtención tienen algunas limitaciones, se están desarrollando nuevas técnicas que permiten extraer de manera más precisa los compuestos bioactivos que realmente aportan los beneficios para la salud. Estos compuestos tienen propiedades antioxidantes, antimicrobianas, antiinflamatorias, analgésicas, antivirales y hasta anticancerígenas, por solo mencionar algunas. También es importante tener en cuenta cómo interactúan entre sí los diferentes aceites esenciales,

ya que ciertas combinaciones pueden potenciar su efectividad, mientras que otras podrían generar efectos no deseados.

Por otro lado, aunque los aceites esenciales tienen muchos beneficios, aún tienen algunas limitaciones, especialmente en área alimentaria. Recuerdo que ella me decía que, aunque estos aceites esenciales son muy buenos para cuidar la salud, lo difícil es incorporarlos en alimentos sin que alteren su sabor, olor o aroma. Por esta razón, los científicos investigan nuevas estrategias para encapsular estos aceites esenciales en sistemas especiales que los protejan, para que preserven sus propiedades sin alterar el sabor y olor del producto final [5]. Además, se está investigando cómo estos métodos de protección influyen en la absorción y aprovechamiento de los aceites esenciales por el organismo, así como en su estabilidad y comportamiento ante distintas condiciones, como la temperatura y la luz. El objetivo es que los aceites esenciales preserven todo su potencial y garanticen su actividad en los productos alimentarios que consumimos [5].

Al final, en la noche mientras mi abuelita se hacía una infusión de canela para cenar, yo terminaba de anotar lo que me había contado mi abuelita, le comenté cómo había investigado científicamente todos los remedios que me había dicho. Le expliqué que, aunque ella siempre había usado aceites esenciales como de clavo o citronela (quizás porque su mamá se lo inculco), ahora era posible comprender mejor los beneficios a la salud humana. Mi abuela, con su característica sonrisa me dijo: “Hija, muchas veces el conocimiento popular es el punto de partida de la ciencia. Lo que las generaciones anteriores han descubierto con la experiencia, la investigación lo confirma y lo explica”. Nos reímos juntas y, aunque mi investigación solo había confirmado lo que ella ya sabía, comprendí que el conocimiento tradicional y el científico no están en oposición, sino que se complementan.

Me encanto poder ser detective y defensor de los conocimientos y experiencia de mi abuelita. Porque además de confirmar sus saberes,

pude identificar que, a pesar de los avances significativos en el estudio de los aceites esenciales, todavía existen numerosas propiedades y aplicaciones que requieren ser exploradas. Esto representa una oportunidad para investigar su potencial en el tratamiento de diversas enfermedades, males y condiciones, así como explorar aplicación en industrias como la farmacéutica, alimentaria, cosmética, y agrícola, entre otras. **iBIO**

Referencias

- [1] Dhakad, A. K., Pandey, V. V., Beg, S., Rawat, J. M., & Singh, A. (2018). Biological, medicinal and toxicological significance of Eucalyptus leaf essential oil: a review. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 98(3), 833-848. <https://doi.org/10.1002/jsfa.8600>
- [2] Haro-González, J. N., Castillo-Herrera, G. A., Martínez-Velázquez, M., & Espinosa-Andrews, H. (2021). Clove essential oil (*Syzygium aromaticum* L. Myrtaceae): Extraction, chemical composition, food applications, and essential bioactivity for human health. *Molecules*, 26(21), 6387. <https://doi.org/10.3390/molecules26216387>
- [3] Kongkaew, C., Sakunrag, I., Chaiyakunapruk, N., & Tawatsin, A. (2011). Effectiveness of citronella preparations in preventing mosquito bites: systematic review of controlled laboratory experimental studies. *Tropical Medicine & International Health*, 16(7), 802-810. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3156.2011.02781.x>
- [4] Ghavami, T., Kazeminia, M., & Rajati, F. (2022). The effect of lavender on stress in individuals: A systematic review and meta-analysis. *Complementary therapies in medicine*, 68, 102832. <https://doi.org/10.1016/j.ctim.2022.102832>
- [5] Douglas Rodrigues Reis, Alan Ambrosi, Marco Di Luccio. (2022). Encapsulated essential oils: A perspective in food preservation. *Future Foods*. Volume 5. <https://doi.org/10.1016/j.fufo.2022.100126>.



Hot Science

La química del vino tinto: compuestos responsables del color, aroma y sabor

Wine chemistry: compounds responsible for color, aroma, and flavor

Resumen

El vino es una bebida que se obtiene de la fermentación alcohólica de los mostos de las uvas *Vitis vinífera* y posee una gran cantidad de compuestos químicos que son responsables de los diferentes atributos sensoriales como color, aroma, gusto, sabor y sensaciones en boca. Entre los compuestos más destacables están las antocianinas como responsables del color de los vinos tintos y rosados, los taninos como las moléculas que producen amargor y astringencia, la glucosa y la fructosa como causantes del dulzor y diversos compuestos volátiles como los norisoprenoides, los alcoholes superiores y los ésteres como responsables de diferentes aromas.

Palabras clave: *Vino tinto, perfil sensorial, fermentación.*

Summary

Wine is a beverage obtained from the alcoholic fermentation of *Vitis vinífera* grape musts. It contains many chemical compounds responsible for various sensory attributes such as color, aroma, taste, flavor, and mouthfeel. Among the most remarkable compounds are anthocyanins, which are responsible for color of red and rosé wines; tannins, which are the molecules that produce bitterness and astringency; glucose and fructose, which cause sweetness; and various volatile compounds such as norisoprenoids, higher alcohols, and esters, which are responsible for different aromas.

Keywords: *Red wine, sensory profile, fermentation.*

Miguel Ángel Hernández-Carapia
José Ramón Verde-Calvo*
Frida Pura Malpica-Sánchez

Laboratorio de Enología y Alimentos Fermentados,
Departamento de Biotecnología,
Universidad Autónoma Metropolitana-Iztapalapa,
CDMX, México.

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

El vino es una bebida alcohólica cuyo consumo en México se ha incrementado de manera considerable durante las últimas dos décadas. De acuerdo con la Organización Internacional de la Viña y el Vino (OIV), su consumo per cápita en México pasó de 0.5 L en 2005 a 1.5 L en 2023. Este incremento refleja un mayor interés por parte de los mexicanos por esta bebida, por lo que se considera necesario poner a disposición de los consumidores información que complemente la ofrecida por los expertos del vino en el ámbito gastronómico, los *sommeliers*.

El vino se define como una bebida que se obtiene de la fermentación alcohólica de los mostos (jugos) de uvas de la especie *Vitis vinífera*, con o sin la presencia de sus hollejos (pieles) [1]. Esta definición abarca tanto a los vinos tintos, que se fermentan en presencia de los hollejos de las uvas, como a los vinos blancos y rosados, que se fermentan sin estos.

Las variedades de uva de la especie *Vitis vinífera* pueden clasificarse en tres grupos: blancas (pulpa blanca y hollejos amarillentos o

verdosos), tintas (pulpa blanca y hollejos púrpuras, rojizos o azulados) y tintoreras (pulpa púrpura-rojiza y hollejos pigmentados como las uvas tintas). Si bien una misma variedad, hablando de uvas tintas, puede emplearse para obtener los tres tipos de vino mencionados, el proceso de elaboración es diferente, lo cual impacta en el perfil sensorial de cada uno de ellos. Pero ¿qué compuestos son los responsables del color, aroma y gusto del vino tinto?

1. Color

Uno de los primeros aspectos que se evalúa en una cata de vino es el color (Figura 1). Las antocianinas son el grupo de pigmentos responsables del color de las uvas tintas y, por consecuencia, de los vinos tintos y rosados. Estos mismos compuestos son responsables del color de productos vegetales como las fresas, las zarzamoras, la col morada, el maíz azul y rojo, y de flores tales como las rosas rojas o las violetas, por mencionar algunas. El que un vino tenga tonalidades púrpuras o rojizas dependerá, principalmente, de la antocianina prevaleciente, así como del pH. En términos generales, la antocianina que se encuentra en mayor proporción en las uvas tintas es la malvidina-3-glucósido. Por otro lado, la intensidad del color dependerá, en mayor medida, de su concentración en el vino.

2. Aroma

Los aromas del vino se clasifican en tres grupos: primarios o varietales, que provienen de la uva, secundarios o de fermentación y terciarios o de maduración. Entre los primarios tenemos a un grupo de moléculas conocidas como norisoprenoides que, dependiendo del compuesto y de su concentración en el vino, pueden producir aromas a flores o bayas; ejemplo de estos compuestos son la β -ionona y la β -da-



Figura 1. Evaluación del color en un vino tinto.

mascenona. Otros compuestos característicos en algunas variedades de uvas pertenecen a un grupo de volátiles conocidos como ésteres. Entre estos están el acetato de etilo, hexanoato de etilo y cinamato de etilo, los cuales pueden producir, entre otros aromas, notas de grosella negra, zarzamora o cereza, respectivamente [2]. Los aromas secundarios son aquellos producidos por las levaduras durante la fermentación alcohólica. Ejemplos de éstos son los ésteres como el acetato de isoamilo (aroma a plátano), el acetato de 2-feniletilo (aroma floral o a miel) y el acetato de etilo (aroma frutal, o a solvente cuando está en exceso); los alcoholes superiores (llamados así por tener más carbonos que el alcohol más común: el etanol) como el 3-metil-1-butanol y el 2-metil-1-butanol (ambos con aromas frutales o alcohólicos), o el 2-feniletanol (aroma a rosas) ; y los aldehídos como el acetaldehído (aroma a manzana inmadura) o el fenilacetaldehído (aroma a miel o floral). Finalmente, los aromas que únicamente tienen los vinos que fueron sometidos a maduración, ya sea en bodega, en botella o en ambos. Entre estos tenemos a los fenoles volátiles como el siringol, el guayacol, la vainillina y el eugenol, que son producto de la degradación de la madera de la bodega por efecto del tostado [3] y



Figura 2. (Imagen creada con IA). Moléculas de algunos de los compuestos que se pueden encontrar en el vino tinto: a) ácido tartárico, b) glucosa, c) β -ionona, d) vainillina, e) acetato de 2-feniletilo, f) acetato de isoamilo.

que aportan al vino notas de ahumado los dos primeros, a vainilla y notas especiadas o a clavo los dos últimos, respectivamente.

3. Gusto

Dulzor

El gusto dulce del vino (uno de los 5 gustos básicos junto con el ácido, el amargo, el salado y el umami) es producido por los azúcares que no fueron consumidos por las levaduras durante la fermentación alcohólica. La fructosa y la glucosa son los azúcares más abundantes en las uvas y los principales responsables del dulzor en los vinos. No obstante, en los vinos secos (aquellos que tienen no más de 4 g de azúcares por litro [1]) otros azúcares conocidos como pentosas, que no son aprovechados por las levaduras, pueden llegar a representar un porcentaje considerable de los azúcares residuales pues su contenido en los vinos puede ir de 0.4 a 2 g L⁻¹ [4].

Acidez

La acidez del vino está dada principalmente por el ácido tartárico (el ácido característico del tamarindo y el más abundante en las

uvas maduras) y, en menor medida, por el ácido málico (ácido predominante en las manzanas y las uvas no maduras). Un tercer ácido que puede tener protagonismo en los vinos (generalmente en los tintos) es el láctico, el cual está presente en los vinos que tuvieron una fermentación malo-láctica. En ella, las bacterias lácticas consumen el ácido málico (agresivo para el paladar) y lo convierten en un ácido más amable para el gusto: el ácido láctico.

Amargor

El amargor es otro gusto básico que es común percibir en el vino, principalmente en los tintos. Este es causado por unos compuestos llamados taninos condensados que están presentes en las uvas (mayormente en los hollejos y en las semillas) y su intensidad dependerá de su concentración en el vino, así como del tamaño de las moléculas (grado de polimerización). Los taninos más amargos son aquellos que tienen de 4 a 5 unidades de catequinas (las moléculas que a manera de eslabón se unen para formar a los taninos condensados), pero a medida que la molécula crece su capacidad de causar amargor disminuye [5].

4. Sensaciones en boca (sensaciones táctiles)

Cuerpo

El cuerpo del vino (qué tan ligero o pesado se percibe en la boca) dependerá de diferentes compuestos que se encuentren disueltos en él (etanol, taninos, antocianinas, azúcares, glicerol, ácidos orgánicos, etc.). Los vinos tintos tienen una mayor concentración de algunos de estos compuestos, como las antocianinas y los taninos, debido a que es mayor el tiempo de



Figura 3. Fermentación del mosto en contacto con las partes sólidas de la uva (hollejos y semillas) para elaboración de vino tinto.

contacto con los hollejos durante su proceso de elaboración (Figura 3). Por tal motivo, estos vinos tendrán un mayor cuerpo y se percibirán más pesados en la boca que un vino blanco o un vino rosado cuyo tiempo de contacto con los hollejos de las uvas es realmente breve.

Astringencia

La astringencia, así como la pungencia (picor) que causan los chiles o la frescura de la menta, es una sensación que se percibe a través del nervio trigémino [6] y puede describirse como una sensación de sequedad o de aspereza en la boca. Esta también es causada por los taninos que contiene el vino, los cuales interactúan con las proteínas de la saliva que son responsables de la consistencia tipo “gel” y de su efecto lubricante en la cavidad oral. Los taninos, al interactuar con esas proteínas, las atraen y aglomeran como si de un imán se tratara, las sacan de la solución acuosa que es la saliva y ésta pierde el efecto lubricante, lo cual se traduce en esa sensación de sequedad y aspereza. Esta sensación es característica de los vinos tintos, que al estar en contacto un mayor tiempo con los hollejos y las pepitas de

las uvas contienen una cantidad mucho mayor de taninos que los vinos blancos o los vinos rosados, en los cuales la astringencia, más que una característica, sería un defecto. De igual forma que el amargor, la intensidad de la astringencia está directamente relacionada con la concentración de estos compuestos en el vino, así como del tamaño de las moléculas. Los taninos más astringentes son los que tienen de 9 a 11 unidades de catequinas, pero también a medida que se añaden más eslabones a la ca-

dena de los taninos su capacidad de causar astringencia disminuye [5] y entonces se convierten en esos taninos “elegantes” o “maduros” de los que hablan los *sommeliers*.

Calidez

La calidez es otra sensación percibida directamente en la mucosa de la cavidad oral y es causada por el etanol, el alcohol más abundante en el vino y en todas las bebidas alcohólicas. La intensidad de esta sensación dependerá de su concentración en el vino, así como de qué tan bien equilibrado se encuentre con otros componentes del vino como la acidez, el dulzor o la astringencia. Esta intensidad puede ir desde ligera que pueda describirse como “cálido”, más potente que se perciba como “caliente” o puede ser tan agresivo con la mucosa oral que el descriptor apropiado sea “quemante”.

5. Sabor

Finalmente, el sabor del vino es la combinación e interacción de las diferentes sensaciones olfativas, gustativas y las táctiles, que son percibidas a través del nervio trigémino [7].

Pueden presentarse algunas notas aromáticas en la boca que se perciben por la vía ortonasal (los orificios de la nariz), así como algunas otras no detectadas durante la inspección olfativa, algo que se conoce como aroma en boca, que es percibido por la vía retronasal (los orificios que tenemos en la parte posterior del paladar). Estos aromas son los responsables de que un vino tenga sabores afrutados, herbales, especiados, amaderados, etc.

Como se pudo observar el vino es una mezcla sumamente compleja de diferentes componentes que se van incorporando o produciendo en las diferentes etapas de su elaboración y en la que cada uno contribuye con el perfil sensorial del producto final. Con esto se obtiene una bebida que si, en lugar de sólo tomarse, se degusta percibiendo detenidamente sus diversos atributos sensoriales, es capaz de producir una amplia gama de sensaciones que pueden hacer más placentera la experiencia. Con lo cual, empleando el vocabulario correcto, puede ser descrita de tal forma que casi cualquier persona sea capaz de imaginar su perfil sensorial sin haberlo probado. **iBIO**

Agradecimientos

Los autores del presente artículo expresamos nuestro agradecimiento a la ingeniera en alimentos Andrea Karen Arellano López por su colaboración en la imagen que muestra la evaluación del color en el vino tinto (Figura 1).

Referencias

- [1] Secretaría de Economía (SE). (2017). *NOM-199-SC-FI-2017: Bebidas alcohólicas-Denominación, especificaciones fisicoquímicas, información comercial y métodos de prueba*. SE. <https://archivos.juridicas.unam.mx/www/bjv/libros/13/6016/4.pdf>
- [2] Kemp, B. (2010). *The effect of the timing of leaf removal on berry ripening, flavour and aroma compounds in Pinot Noir wine* [Tesis doctoral, Lincoln University, PA, USA]. <https://researcharchive.lincoln.ac.nz/server/api/core/bitstreams/4901072f-965c-4447-a040-2a5ded-d8e557/content>
- [3] Liu, S., Lou, Y., Li, Y., Zhao, Y., Laaksonen, O., Li, P., Zhang, J., Battino, M.A., Yang, B., & Gu, Q. (2023). Aroma characteristics of volatile compounds brought by variations in microbes in winemaking. *Food chemistry*, 420, 136075. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2023.136075>
- [4] Wilkes, E. (2016). Measuring sugars in wine. *Technical Review: AWRI*, 223: 9-11. https://www.awri.com.au/wp-content/uploads/2011/07/Technical_Review_Issue_223_Wilkes.pdf
- [5] Moreno, J., Peinado, R. (2012). Chapter 5: Polyphenols. En J. Moreno, R. Peinado (Eds.), *Enological Chemistry* (1ª ed., pp. 54-76). Elsevier. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-388438-1.00001-7>
- [6] Cayeux, I., Saint-Léger, C., Starkenmann, C. (2023). Trigeminal Sensations to enhance and enrich flavor perception - Sensory Approaches. *Clinical Nutrition Open Science* 47, 64-73. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.nutos.2022.11.007>
- [7] Organización Internacional de la Viña y el Vino (OIV). (2015). *Review document on sensory analysis of wine*. <https://www.oiv.int/public/medias/3307/review-on-sensory-analysis-of-wine.pdf>



Hot Science

Biotecnología aplicada al patrimonio cultural: estrategias para la preservación del patrimonio edificado

Biotechnology applied to cultural heritage: strategies for the preservation of built heritage

Resumen

Los monumentos mayas sufren deterioro a causa de la acción sinérgica de agentes químicos, biológicos y físicos. La piedra caliza, puede experimentar biodeterioro debido a la acción microbiana. El deterioro es usualmente contrarrestado por medio de intervenciones humanas, por medio la remoción de las biopelículas y la consolidación. Estudios recientes muestran la aplicación de la biotecnología para la conservación de estas superficies, utilizando métodos de biomineralización microbiana, biocidas y bioconsolidantes. La biotecnología tiene el potencial de contribuir con métodos y estrategias, que, sumadas a las prácticas convencionales de restauración, coadyuven con la preservación del patrimonio edificado bajo un enfoque interdisciplinario.

Palabras clave: Patrimonio cultural, bioconservación, biomineralización.

Summary

Mayan monuments are prone to deterioration due to the synergistic action of chemical, biological and physical agents. Limestone suffers biodeterioration due to microbial action. Deterioration is usually dealt with removal of biofilms and consolidation. Recently, the application of biotechnology for the conservation can be performed using microbial biomineralization, biocides and bioconsolidants. Biotechnological approaches also include the use of certain microorganisms can biostabilize stone surfaces. Biotechnology has the potential

Benjamín Otto Ortega Morales^{1*}

Juan Carlos Camacho-Chab¹

José Alberto Narváez-Zapata²

¹Centro de Investigación en Microbiología Ambiental y Biotecnología, Universidad Autónoma de Campeche, Av. Agustín Melgar s/n., Campeche, México.

²Instituto Politécnico Nacional-CBG. Blvd. del Maestro esq. Elías Piña, Col. Narciso Mendoza, Reynosa, Tamaulipas, México.

*Autor para la correspondencia:
beortega@uacam.mx

to contribute with methods and strategies that, added to conventional restoration practices, to the preservation of built heritage based on an interdisciplinary approach.

Keywords: Cultural heritage, bioconservation, biomineralization.

Introducción

Los monumentos históricos son las manifestaciones más evidentes del legado cultural de un pueblo. México es un país que cuenta con un amplio legado de sitios arqueológicos mayas y que forman parte del patrimonio histórico mundial. Algunos ejemplos incluyen Chichén-Itzá en Yucatán, Chicanná en Campeche y Palenque en Chiapas (Figura 1). Estos monumentos están constituidos principalmente de piedra calcárea la cual es altamente susceptible al ataque químico.



b)

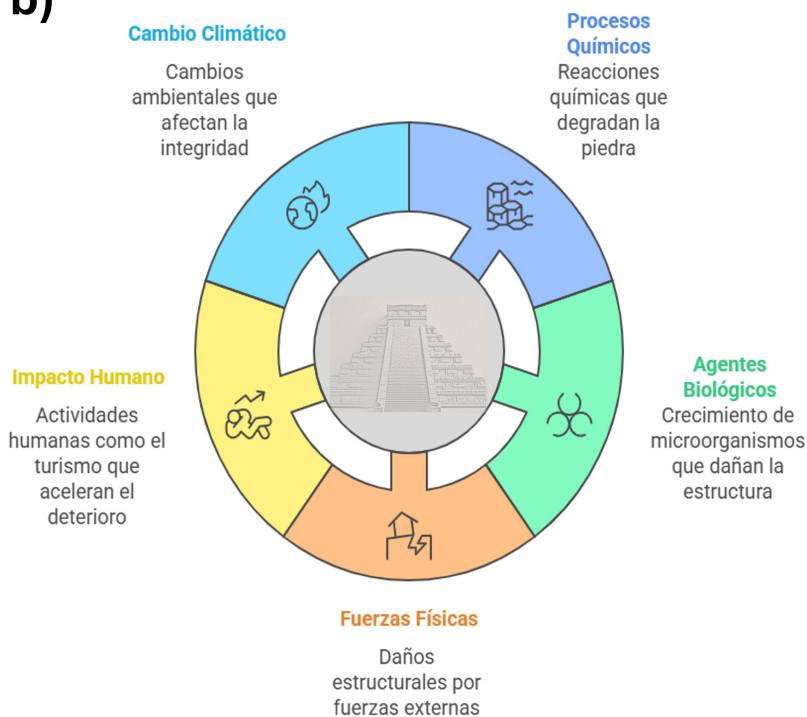


Figura 1. Biodeterioro en monumentos arqueológicos, a) Sitio de Chicanná en el estado de Campeche, México. Nótese la presencia de vegetación circundante que crea un microclima al que están expuestos los monumentos así como la presencia de alteraciones cromáticas de origen microbiano (cambio de color) de la piedra expuesta al ambiente. b) Principales amenazas para el biodeterioro de los monumentos históricos. (Imagen propia).

mico y es mecánicamente débil, y por ello le hacen particularmente susceptible a procesos de deterioro por agentes químicos, biológicos y físicos, que a menudo operan de manera sinérgica [1]. Adicionalmente, el impacto humano a través de la actividad turística y el cambio climático añaden factores que contribuyen con este deterioro. Las vinculaciones colaborativas entre el sector gubernamental, el académico, la sociedad civil y el sector privado por medio de acciones multisectoriales e interdisciplinarias, son clave para contribuir a la conservación.

Biodeterioro de la piedra

Como se mencionó anteriormente, múltiples factores inciden en el deterioro de los monumentos. Sin embargo, las características climáticas de la península de Yucatán y México caracterizado por un clima semi-tropical caracterizadas por cambios cíclicos de altas temperaturas y alta humedad, favorecen la proliferación de microorganismos los cuales contribuyen directa e indirectamente a la degradación calcárea. La actividad microbiana se considera uno de los factores más impor-

tantes en el deterioro de materiales pétreos. Las biopelículas subaéreas son comunidades microbianas constituidas de líquenes, algas, bacterias, hongos y arqueas que colonizan superficies sólidas expuestas a la atmósfera. Las biopelículas subaéreas pueden generar deterioro por múltiples mecanismos por ejemplo a través de decoloración (alteración cromática), producción de ácidos orgánicos e inorgánicos y otros metabolitos ácidos, osmolitos, y daño físico por penetración activa [2, 3]. Estas biopelículas se adhieren mediante sustancias poliméricas extracelulares (EPS), las cuales facilitan la adhesión de los microorganismos y la captura de partículas, aerosoles, minerales y compuestos orgánicos presentes en el ambiente.

El daño estético se manifiesta principalmente a través de la alteración cromática, causada por pigmentos liberados por los microorganismos, como melaninas, carotenos y pigmentos fotosintéticos. Este tipo de biodeterioro puede ir de una alteración estética al franco deterioro por acumulación de partículas y sales creando un ambiente favorable para microorganismos halófilos [2].



Figura 2. Biopelículas epilíticas litobióticas desarrolladas sobre sustratos calcáreos en el sitio arqueológico de Becán, Campeche, México. La paleta de colores está relacionada con los diferentes grupos microbianos asociados y sus pigmentos constitutivos. Las comunidades de líquenes aparecen como alteraciones incrustantes irregulares blanquecinas, que ejercen un efecto biometeorizante / biodeterioro por medio de la secreción de metabolitos ácidos y la alteración biofísica de los poros de la roca, lo que causa su desagregación. (Imagen propia).

La producción de ácidos orgánicos e inorgánicos por los microorganismos contribuye igualmente a la degradación de la piedra. Los ácidos inorgánicos, como el ácido sulfúrico y el ácido nítrico, pueden disolver materiales debilitando la estructura mineral. Por otro lado, los ácidos orgánicos (oxálico y cítrico principalmente) reaccionan con los minerales de la piedra, solubilizándolos mediante la formación de sales y aumentando la disolución de ciertos tipos de rocas [2]. En el aspecto físico, la penetración de microorganismos filamentosos, especialmente hongos y cianobacterias, en las fisuras de la piedra también genera daños físicos significativos, pues estos microorganismos provocan presión interna al absorber agua y expandirse, lo que facilita la entrada de polvo y otros agentes que contribuyen al deterioro progresivo de la piedra.

Las biopelículas subaéreas muestran generalmente distribuciones heterogéneas asociadas con el sustrato rocoso, producto de la variabilidad ambiental (tipo de sustrato y condiciones micrometeorológicas), que conducen

a una baja en disponibilidad de agua, lo que crea ambientes extremófilos para las comunidades litobióticas que colonizan las superficies como crecimientos epilíticos -en la superficie- como los que exhiben en la Figura 2.

También pueden presentarse como comunidades endolíticas crecen dentro de fisuras, grietas y poros en las matrices rocosas [1]. El grado en que las superficies son colonizadas por microbios depende de los parámetros climáticos (por ejemplo, temperatura, luz y humedad), la composición del sustrato mineral y sus propiedades intrínsecas (Figura 3).

Las primeras investigaciones sobre el biodeterioro se basaban principalmente en técnicas microbiológicas dependientes de cultivo, que permiten caracterizar las comunidades de microorganismos responsables del deterioro. Sin embargo, estas técnicas dependientes de cultivo tienen limitaciones, ya que solo una fracción de los microorganismos presentes en el ambiente puede ser cultivada en condiciones de laboratorio, lo cual no proporciona una visión completa de la diversidad microbiana involucrada [4].

Los avances en biología molecular y el uso de métodos basados en ADN han revolucionado el estudio del biodeterioro. Estas técnicas moleculares permiten identificar una mayor diversidad de microorganismos sin necesidad de cultivarlos, incluso detectando aquellos que no pueden sobrevivir fuera de su entorno natural. Actualmente, es posible reconocer no solo microorganismos comunes, sino también extremófilos como *Rubrobacter*, *Euhalothece* y *Salinibacter*, estos microorganismos considerados halófilos subsisten en ambientes salinos, por lo que se pueden encontrar en costas salinas o eflorescencias que aparecen en los edificios históricos (Figura 4).

El uso de estas técnicas moleculares abre nuevas posibilidades para conservación preventiva, permitiendo la identificación rápida de microorganismos viables y el diseño de tratamientos de bioconservación más precisos y eficaces [4].

Control de la colonización microbiana

Los procesos de protección involucran varios tipos de intervención. La limpieza de los monumentos de piedra se suele realizar mediante métodos mecánicos (cepillado). Posteriormente, la eliminación de biopelículas se realiza por medio de un tratamiento biocida con agentes químicos como etanol o peróxido de hidrógeno. Independientemente de la técnica elegida, se debe tener cuidado de no provocar daños en el material original; los procesos deben ser graduales, selectivos y económicamente viables. También existe el uso de agentes biocidas más espe-



Figura 3. Biopelículas epilíticas (subaereas) desarrolladas sobre sustratos calcáreos, nótese la presencia de la biopelícula como alteración de color negro en superficies expuestas a una permanente radiación. El desprendimiento del biofilm provoca erosión del sustrato calcáreo expuesto (sustrato blanquecino). (Imagen propia).

a)



b)

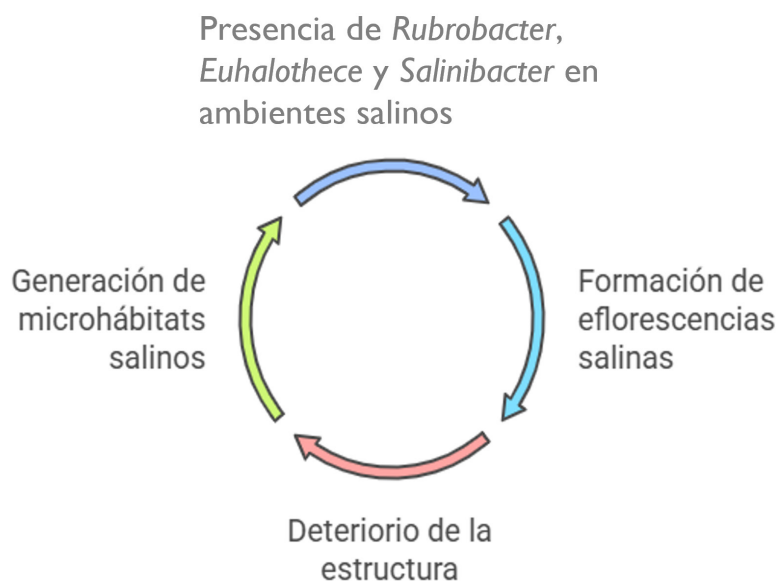


Figura 4. Microorganismos extremófilos relacionados al biodeterioro. a) Eflorescencia en estuco (arriba) y piedra calcárea (abajo) es indicativa un posible daño salino. Las eflorescencias representan así mismo microhábitats para el desarrollo de microorganismos halófilos. b) Ciclo de biodeterioro relacionado a microorganismos extremófilos. (Imagen propia).

cializados, son productos químicos capaces de eliminar organismos indeseables. Sin embargo, algunos biocidas, a pesar de su alta eficiencia presentan problemas de toxicidad y restricciones ambientales. Por otra parte, las nanopartículas han recibido recientemente atención por parte de las comunidades de conservación y restauración como alternativas a los biocidas. Las NP de TiO₂ son el tipo de nanopartícula más estudiado que muestra propiedades biocidas [5].

Consolidación de piedra monumental

Por su parte, la consolidación representa un procedimiento importante pero complejo en el campo de la conservación, ya que puede provocar efectos indeseables, como cambios cromáticos, formación de subproductos y liberación de sustancias agresivas. El término consolidación se define como la aplicación de un material sobre un sustrato descohesionado que, al interactuar con la superficie, mejora su cohesión, sus características mecánicas y la adhesión de las capas alteradas al sustrato. La consolidación de materiales pétreos expuestos al aire libre ha incluido desde hace décadas el uso de polímeros sintéticos, como poliácridatos y polimetacrilados, que buscan extender la durabilidad de los materiales. Aunque los polímeros acrílicos ofrecen resistencia inicial a la biodegradación, estudios han demostrado que, en condiciones naturales prolongadas, pueden ser colonizados por hongos, generando un oscurecimiento en la piedra, daños estéticos y estructurales [6].

Para conservar los monumentos de gran valor cultural que sufren deterioro, se han realizado estudios enfocados en identificar los principales microorganismos que lo causan y en analizar los métodos de protección que mejor se adapten a las superficies de piedra. Inicialmente, los ensayos de laboratorio permiten evaluar la efectividad de compuestos biocidas y consolidantes bajo condiciones controladas. Estos ensayos buscan replicar las características físicas y mineralógicas de los materiales del monumento para probar la eficacia de las formulaciones en superficies deterioradas. Re-

cientemente, se han explorado métodos en principio más compatibles con el ambiente, consolidando materiales deteriorados mediante la biomineralización [3,7]. Este proceso, inducido por bacterias carbonatogénicas, genera en el material poroso la consolidación de piedra de forma compatible y eficaz, evitando algunos problemas de los tratamientos convencionales. Este enfoque innovador y ecológico se puede aplicar mediante tres métodos principales, (1) aplicación de cultivos externos sobre la piedra; (2) activación de bacterias carbonatogénicas existentes y (3) cultivo de laboratorio de bacterias nativas del sustrato, que luego se reintroducen en el material (Figura 5) [5, 8].

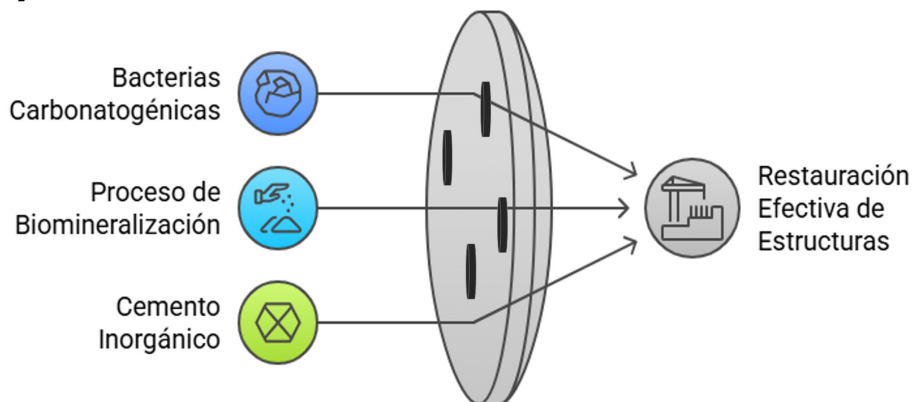
Conclusión

El deterioro de los monumentos históricos es un fenómeno extremadamente complejo, donde inciden diversos agentes, que operan de manera sinérgica a diferentes escalas de temporales y espaciales. Frente a esta complejidad, es crucial su estudio por medio de enfoques interdisciplinarios. La aplicación de la biotecnología en la conservación del patrimonio histórico ha avanzado significativamente con el aprovechamiento de organismos litotróficos en tecnologías como la biolimpieza y la biomineralización desde finales de los años 90 y principios de los años 2000, respectivamente, que ofrecen soluciones eficaces y sostenibles para la preservación de materiales históricos. La consolidación de piedra mediante biomineralización, en la que microorganismos (más comúnmente bacterias) específicos se impregnan en la piedra deteriorada donde se les permite producir nuevo material lítico, es una práctica ya utilizada tanto en la restauración y la ingeniería civil en algunos países. iBIO

Referencias

- [1] Ortega-Morales, O., Guezennec, J., Hernández-Duque, G., Gaylarde, C. C., & Gaylarde, P. M. (2000). Phototrophic biofilms on ancient Mayan buildings in Yucatan, Mexico. *Current microbiology*, 40(2), 81–85. <https://doi.org/10.1007/s002849910015>
- [2] Scheerer, S., Ortega-Morales, O., & Gaylarde, C. (2009). Microbial deterioration of stone monuments--an

a)



b)



Figura 5. Conservación del patrimonio impulsado por bacterias carbonatogénicas. a) generalidades, b) Soluciones con bacterias carbonatogénicas en superficies deterioradas. (Imagen propia).

updated overview. In Elsevier (ed): *Advances in applied microbiology* (pp. 97–139). [https://doi.org/10.1016/S0065-2164\(08\)00805-8](https://doi.org/10.1016/S0065-2164(08)00805-8)

[3] Jroundi, F., Elert, K., Ruiz-Agudo, E., Gonzalez-Muñoz, M. T., & Rodriguez Navarro, C. (2020). Bacterial diversity evolution in Maya plaster and stone following a bio-conservation treatment. *Frontiers in Microbiology*, 11:599144. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2020.599144>

[4] Fernandes P. (2006). Applied microbiology and biotechnology in the conservation of stone cultural heritage materials. *Applied microbiology and biotechnology*, 73(2), 291–296. <https://doi.org/10.1007/s00253-006-0599-8>

[5] Ortega-Morales, B. O., & Gaylarde, C. C. (2021). Bioconservation of historic stone buildings—an updated review. *Applied Sciences*, 11(12), 5695. <https://doi.org/10.3390/app11125695>

[6] Narváez-Zapata, J. A., Paramo-Aguilera, L. A., & Ortega-Morales, B. O. (2012). Culturable fungi associated with urban stone surfaces in Mexico City. *Electronic journal of biotechnology: EJB*, 15(4). <https://doi.org/10.2225/vol15-issue4-fulltext-6>

[7] Rodríguez-Navarro, C., Jroundi, F., González-Muñoz, M. A. T., & Elert, K. (2023). Consolidación de la piedra con bacterias. *Revista PH*, 252. <https://doi.org/10.33349/2023.110.5373>

[8] Camacho-Chab, J. C., Camacho-Chab, P. A., Pereañez-Sacarías, J. E., Montero-Muñoz, J. L., Almeyda-Cen, A. I., Dzúl-López, L. A., Reyes-Estebanez, M. M., & Ortega-Morales, B. O. (2024). Short-term effect of biopolymer-based coatings on surface hardness and color of limestone exposed to tropical outdoor conditions. *Coatings*, 14(2), 154. <https://doi.org/10.3390/coatings14020154>



Hot Science

Biotecnología al rescate: ¿el fin de las invasiones de sargazo?

Biotechnology to the rescue: Could it put an end to sargassum invasions?

Enrique Salgado-Hernández^{1*}
Mayela Martínez-Cano²

¹Facultad de Ciencias Químicas, Universidad Veracruzana, Coatzacoalcos, Veracruz, México.

²Instituto de Biotecnología y Ecología Aplicada (INBIOTECA), Universidad Veracruzana, Xalapa, Veracruz, México.

*Autor para la correspondencia:
ensalgado@uv.mx

Resumen

El sargazo es un problema ambiental creciente en el Caribe y otras regiones, que afecta ecosistemas costeros y economías locales. La acumulación de algas en las playas no solo es un inconveniente visual, sino que además libera compuestos tóxicos y gases de efecto invernadero. ¡Pero no todo está perdido! La biotecnología se presenta con alternativas innovadoras para aprovecharlo de forma eficiente. Métodos como la digestión anaerobia, la fermentación y el compostaje tienen el potencial para transformar estas algas en bioenergía, biocompuestos y fertilizantes. En este artículo exploraremos investigaciones biotecnológicas que muestran cómo convertir este problema en algo positivo.

Palabras clave: *Microorganismos, algas, bioprocesos.*

Summary

Sargassum is a growing environmental problem in the Caribbean and other regions, affecting both coastal ecosystems and the local economy. The accumulation of algae on beaches is not only a visual inconvenience but also releases toxic compounds and greenhouse gases. But all is not lost! Biotechnology comes up with innovative alternatives to make efficient use of it. Methods such as anaerobic digestion, fermentation and composting have the potential to transform these algae into bioenergy, biocompounds and fertilizers. In this article we will explore biotechnological research that shows how to turn this problem into something positive.

Keywords: *Microorganisms, algae, bioprocesses.*

Si en los últimos años has tenido la oportunidad de visitar las playas del Caribe, probablemente habrás notado grandes cantidades de algas acumuladas en la arena. Lo que solía ser un mar de un azul turquesa ahora se ve cubierto por una densa alfombra marrón con un olor desagradable. Pero ¿qué son estas algas y cómo podemos combatirlas?

El sargazo es un grupo de algas conformado por dos especies (*Sargassum fluitans* y *Sargassum natans*). Estas especies habitan en el Mar de los Sargazos, una región del océano Atlántico. Sin embargo, desde el 2011 se ha promovido el transporte de estas algas fuera del Mar de los Sargazos, proliferando en el Atlántico tropical entre África Occidental y Sudamérica (Figura 1). Esta nueva ubicación favorece que año con año toneladas de estas algas sean arrastradas hacia las playas del Caribe y el Atlántico [1].

La gran cantidad de sargazo que se acumula en las costas causa graves afectaciones económicas y ambientales. A pesar de los intentos por eliminar el sargazo de las playas costeras, su presencia sigue siendo un desafío



Figura 1. Sargazo recolectado en Playa del Carmen, Quintana Roo, México.

creciente cada año. Afortunadamente, la ciencia está buscando soluciones ante este desafío. La biotecnología está ofreciendo nuevas alternativas para aprovechar el exceso de sargazo de manera innovadora. ¿Podrá la biotecnología ser la clave para hacer frente al problema del exceso de sargazo?

Biotechnología como solución: métodos innovadores para el manejo del sargazo

Cuando hablamos de biotecnología la mayoría de la gente piensa en transgénicos u organismos genéticamente modificados; causando controversia debido a la poca información que existe. Sin embargo, esta disciplina es mucho más que eso. La biotecnología implica el uso de organismos vivos o sus procesos biológicos para crear soluciones innovadoras en diversos campos como la medicina, la industria, la agricultura o la protección del medio ambiente. Desde la elaboración del yogur o los antibióticos que son imprescindibles en nuestra vida

hasta la asombrosa forma en que se limpian los suelos contaminados, la biotecnología forma parte de nuestras vidas, aunque no siempre nos demos cuenta. Es interesante ver que la biotecnología ofrece una manera novedosa y amigable de tratar el sargazo (Figura 2). De este modo podemos dejar de ver al sargazo como un residuo desagradable y empezar a verlo como un recurso de alto valor.

Generación de energías renovables

A través de un proceso natural llamado digestión anaerobia, es posible convertir la materia orgánica en energía. En este proceso, microorganismos que no necesitan oxígeno (bacterias y arqueas) descomponen la materia orgánica y producen un gas que contiene metano (CH_4) y dióxido de carbono (CO_2). Este gas puede utilizarse para generar electricidad y calor, debido a la presencia del metano, ya que éste es un combustible. La digestión anaerobia del sargazo es uno de los procesos más investigados y con más publicaciones científicas. Sin embargo,

los estudios reportan bajos rendimientos de metano, que se atribuyen a la presencia de compuestos naturales, sales y metales en el sargazo, que pueden dificultar su degradación y además pueden llegar a ser tóxicos para los microorganismos. Actualmente se conocen diversos métodos, llamados pretratamientos, que pueden mejorar la composición y características del sargazo, haciéndolo más amigable y fácil de degradar para los microorganismos. No obstante, los pretratamientos pueden ser costosos, además de requerir una cantidad considerable de energía, lo que afecta la rentabilidad del proceso.

En una reciente investigación realizada en la Universidad Veracruzana, se demostró que la adaptación de los microorganismos al sargazo durante 100 días pudo mejorar la producción de metano en un 60%. Tras la adaptación, diversos microorganismos incrementaron su abundancia y otros desaparecieron. Este hallazgo destaca la importancia de adaptar y se-



Figura 2. Biotecnología entre cantidades masivas de sargazo. Fuente: Elaboración propia.

leccionar a los microorganismos para llevar a cabo exitosamente la digestión anaerobia del sargazo [1].

La producción de bioetanol es otro proceso biotecnológico que se lleva a cabo mediante la fermentación, un proceso muy antiguo donde microorganismos, como bacterias u hongos, consumen los azúcares presentes en la materia orgánica para generar alcohol. Una reciente investigación demostró que se puede obtener bioetanol a partir del sargazo usando *Saccharomyces cerevisiae*, un hongo unicelular utilizado desde tiempos remotos. Los resultados de este estudio sugieren que el sargazo puede ser una materia prima competitiva para producir combustibles como el etanol [2].

Producción de biocompuestos

A partir del sargazo se pueden obtener

diversas sustancias de interés comercial. Por ejemplo, un estudio demostró que mediante la fermentación del sargazo con el hongo *Aspergillus niger* M4 se pueden producir compuestos fenólicos con poder antioxidante, que pueden ser utilizados en cosméticos o suplementos alimenticios. También, se ha demostrado que es posible producir proteínas fúngicas como alternativas para la industria alimentaria, a través de la fermentación del sargazo utilizando el hongo *Aspergillus oryzae* [3].

Recientemente, se encontró que ciertos compuestos extraídos del sargazo, en particular un tipo de azúcar llamado fucoi-dan, puede combatir el virus del dengue tipo 2 (DENV-2). Este descubri-

miento muestra que el sargazo puede usarse como alternativa prometedora para el desarrollo de agentes antivirales para el tratamiento o prevención del dengue [4].

Biofertilizantes y mejoradores de suelos

Gracias a diferentes organismos como bacterias, hongos o lombrices, el sargazo se puede convertir en biofertilizante, en procesos como la fermentación líquida, el compostaje (descomposición de residuos orgánicos para producir fertilizante) y el vermicompostaje (descomposición de materia orgánica por acción de lombrices). Por ejemplo, mediante la fermentación del sargazo, el hongo *Aspergillus niger* genera un compuesto natural que mejora la germinación de semillas de tomate [5].

Por otro lado, investigadores de la Universidad de Miami llevaron a cabo la evaluación

del compostaje de sargazo como una forma de manejo. Se encontró que la mayoría de los elementos considerados perjudiciales para el ambiente en el compost producido estuvieron dentro de los límites permitidos por las normas ambientales, excepto el arsénico (As). Por esa razón, se recomienda utilizar el compost de sargazo para cultivos no comestibles, como plantas ornamentales. En otra investigación, el compost de sargazo se utilizó exitosamente para la producción de plántulas de mangle rojo (*Rhizophora mangle*) en proyectos de restauración. El compost presentó altos contenidos de arsénico, un elemento que en concentraciones elevadas puede ser tóxico para los seres humanos, los animales y el medio ambiente. Sin embargo, al analizar el contenido de arsénico en las plántulas, las cantidades fueron bajas. Gracias a eso se pudo usar el compost de sargazo sin contaminar el ecosistema [6].

El vermicompostaje es otro proceso biotecnológico que utiliza lombrices para convertir los residuos orgánicos en fertilizante. En el Instituto Tecnológico de Veracruz se realizó el vermicompostaje del sargazo usando lombrices *Eisenia fetida*. El vermicompost obtenido mejoró el crecimiento de plantas de cilantro. Sin embargo, en este estudio no se analizó el contenido de elementos en el vermicompost, lo que podría ser una limitante en su aplicación [7].

Por otro lado, un estudio de la Universidad Veracruzana reveló que las lombrices *Eisenia fetida* tienden a evitar ambientes con altas cantidades de sargazo y que con el tiempo bajan de peso [8]. Por lo tanto, el vermicompostaje no debe implementarse a la ligera ya que se requieren más investigaciones para optimizar el proceso y que pueda ser exitoso en el tratamiento del sargazo.

Biorremediación y purificación

El sargazo ha mostrado la capacidad de adsorber metales pesados y otros contaminantes presentes en el agua y el suelo. Investigadores de la UNAM diseñaron un filtro basado en sargazo para la eliminación de sustancias

tóxicas del agua, incluyendo colorantes y metales como el plomo. También, exploraron el potencial del sargazo como material biosorbente para la eliminación de contaminantes derivados de jabones y detergentes en cuerpos de agua costeros [9].

Desafíos y perspectivas futuras

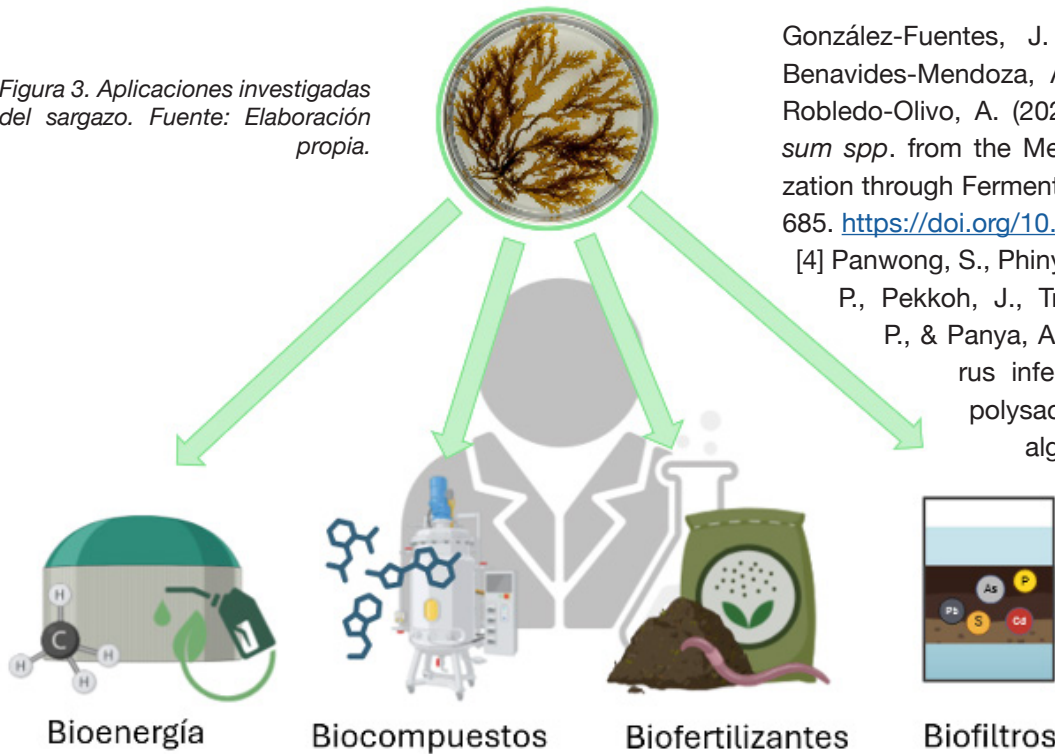
Como se describió en las secciones anteriores las investigaciones en el área de la biotecnología presentan una serie de aplicaciones para el sargazo muy prometedoras (Figura 3). También, se pueden explorar nuevas investigaciones biotecnológicas más innovadoras para aprovechar el sargazo. Por ejemplo, el uso de microorganismos mejorados en laboratorio que optimicen la degradación del sargazo y generación de nuevos productos. Las investigaciones realizadas no solo nos muestran las diferentes aplicaciones del sargazo, sino que además nos muestran las limitaciones y precauciones que se debe tener antes de querer implementar algún proceso a escala comercial.

Sin embargo, la llegada del sargazo a las costas es por temporadas y la presencia de elementos y compuestos en el sargazo varía dependiendo del lugar y estación del año. Además, los costos elevados de recolección y el efecto ambiental que provoca su extracción hacen que, el uso del sargazo en diferentes aplicaciones biotecnológicas sea un reto. Para superar estos obstáculos, es necesario asegurar la presencia de sargazo durante el año con métodos de preservación y almacenamiento. También, mejorar las técnicas de recolección e incluir pretratamientos que hagan que la composición del sargazo sea la adecuada para cada aplicación.

Conclusión

El sargazo representa un desafío global que amenaza con la integridad de los océanos y la economía de algunas naciones. Sin embargo, este desafío también brinda una oportunidad única para científicos y emprendedores ya que podemos aprovecharlo como materia prima en numerosas aplicaciones. Desde la generación de un fertilizante para tus plantas

Figura 3. Aplicaciones investigadas del sargazo. Fuente: Elaboración propia.



hasta un medicamento con potencial antiviral, la biotecnología llega al rescate con estrategias novedosas. Aunque aún existen limitantes por superar, la investigación y el desarrollo de nuevas estrategias biotecnológicas podrían marcar el inicio del fin de las invasiones del sargazo. ¿Podrá la biotecnología ser clave para resolver el problema del sargazo en el futuro? ¿tú que piensas? **iBIO**

Referencias

- [1] Salgado-Hernández, E., Ortiz-Ceballos, Á. I., Alvarado-Lassman, A., Martínez Hernández, S., Dorantes-Acosta, A. E., & Rosas-Mendoza, E. S. (2024). Adaptation of a microbial consortium to pelagic *Sargassum* modifies its taxonomic and functional profile that improves biomethane potential. *Environmental Science and Pollution Research*, 31(43), 55169–55186. <https://doi.org/10.1007/s11356-024-34853-y>
- [2] Aparicio, E., Rodríguez-Jasso, R. M., Pinales-Márquez, C. D., Loredó-Treviño, A., Robledo-Olivo, A., Aguilar, C. N., Kostas, E. T., & Ruiz, H. A. (2021). High-pressure technology for *Sargassum* spp biomass pretreatment and fractionation in the third generation of bioethanol production. *Bioresource Technology*, 329, 124935. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.124935>
- [3] Paredes-Camacho, R. M., González-Morales, S.,

González-Fuentes, J. A., Rodríguez-Jasso, R. M., Benavides-Mendoza, A., Charles-Rodríguez, A. V., & Robledo-Olivo, A. (2023). Characterization of *Sargassum* spp. from the Mexican Caribbean and Its Valorization through Fermentation Process. *Processes*, 11(3), 685. <https://doi.org/10.3390/pr11030685>

[4] Panwong, S., Phinyo, K., Duangjan, K., Sattayawat, P., Pekkoh, J., Tragoolpua, Y., Yenchitsomanus, P., & Panya, A. (2024). Inhibition of dengue virus infection in vitro by fucoidan and polysaccharide extract from marine alga *Sargassum* spp. *International Journal of Biological Macromolecules*, 276, 133496. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.133496>

[5] Paredes-Camacho, R. M., Robledo-Olivo, A., González-Morales, S., Benavides-Mendoza, A., Rodríguez-Jasso, R. M.,

González-Fuentes, J. A., & Charles-Rodríguez, A. V. (2024). Evaluation of the Fermented Extract of *Sargassum* spp., for the Biostimulation in the Germination of Tomato Seeds and Seedlings (*Solanum lycopersicum* L.). *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 24(3), 4856–4867. <https://doi.org/10.1007/s42729-024-01877-9>

[6] Abdool-Ghany, A. A., Blare, T., & Solo-Gabriele, H. M. (2023). Assessment of *Sargassum* spp. management strategies in southeast Florida. *Resources Conservation & Recycling Advances*, 19, 200175. <https://doi.org/10.1016/j.rcradv.2023.200175>

[7] Méndez-Covarrubias, J. G., Solís-Hernández, L. F., Peña-Montes, C., & Peralta-Peláez, L. A. (2023). Aplicación del *Sargassum* sp. para la producción de vermicomposta utilizando lombriz de tierra, *Eisenia foetida* (lombriz roja californiana). *Revista Ambiens Techné Et Scientia México* (Vol. 11, Issue 2, pp. 287–288).

[8] Martínez-Cano, M., Dorantes-Acosta, A. E., Lara-González, R., Salgado-Hernández, E., & Ortiz-Ceballos, A. I. (2024). Effect of sargassum on the behavior and survival of the earthworm *Eisenia fetida*. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 113(3). <https://doi.org/10.1007/s00128-024-03935-5>

[9] Lopez-Miranda, J. L., Elizalde-Mata, A., Esparza, R., & Estevez, M. (2025). Study of *Sargassum* spp. as a biosorbent material for the elimination of contaminants dissolved in water. *MRS Advances*. <https://doi.org/10.1557/s43580-025-01169-z>



¿Cómo
funciona?

¿Vacunas comestibles? El futuro de la vacunación

Edible vaccines? The future of immunization

Francisca Villanueva-Flores^{1*}
Igor Garcia-Atutxa²

Resumen

¿Te imaginas vacunarte simplemente comiendo una ensalada? Las vacunas comestibles serán pronto una realidad, donde papas, tomates o lechugas contengan proteínas de virus, las mismas que tu sistema inmunológico necesita reconocer para protegerte. Así, al consumir estas verduras, podrías activar tus defensas sin necesidad de agujas. Esta tecnología revolucionaria no solo simplificaría la vacunación, sino que eliminaría la necesidad de refrigeración, lo cual es crucial para llegar a zonas remotas. Aunque existen retos que superar, cada avance nos acerca más a un futuro donde la prevención de enfermedades podría ser tan fácil como comer.

Palabras clave: Vacunas, plantas, inmunidad.

Summary

Can you imagine getting vaccinated just by eating a salad? Edible vaccines will soon become a reality, with potatoes, tomatoes, or lettuce producing viral proteins, the very ones your immune system needs to recognize to protect you. By consuming these vegetables, you could activate your defenses without the need for needles. This revolutionary technology would not only simplify vaccination but also eliminate the need for refrigeration, which is crucial for reaching remote areas. Although there are still challenges to overcome, each advance brings us closer to a future where disease prevention could be as simple as eating.

Keywords: Vaccines, plants, immunity.

¹Centro de Investigación en Ciencia Aplicada y Tecnología Avanzada (CICATA), Unidad Morelos del Instituto Politécnico Nacional (IPN). Boulevard de la Tecnología No.1036, Xochitepec, Morelos, México.

²Universidad Católica de Murcia (UCAM). Av. de los Jerónimos, 135, 30107, Murcia, España.

*Autor para la correspondencia:
fvillanuevaf@ipn.mx

Introducción

En las últimas décadas hemos sido testigos de grandes hitos de la biotecnología. Hoy en día estamos a punto de dar un paso agigantado pues estamos cerca de lograr que ciertas vacunas se conviertan en algo tan común como una ensalada (Figura 1). Estas vacunas comestibles podrían ser capaces de protegernos contra diversas enfermedades al ser ingeridas. Esta innovadora tecnología permite a las plantas producir proteínas ajenas a ellas, que funcionan como los antígenos que conforman las vacunas. Pero ¿qué son los antígenos? Los antígenos son “señales” que llevan algunos invasores, como los virus y las bacterias, y que nuestro cuerpo reconoce como extrañas. Cuando el sistema inmunológico detecta estas señales, éste responde para defendernos, como si activara una “alarma” para identificar y atacar a estos intrusos y protegernos de enfermedades.

¿Cómo funciona una vacuna comestible?

Al consumir una verdura modificada, no solo estaríamos disfrutando una deliciosa comida, sino también estaríamos activando nuestro sistema inmunológico. ¿Cómo? Pues estas



Figura 1. Caricatura de una ensalada con vegetales modificados, que puedan funcionar como vacunas. Imagen generada con ChatGTP4.

plantas han sido diseñadas para producir proteínas de la capa externa de los virus, pero sin el material genético. Estas proteínas, al entrar en tu cuerpo, alertan a nuestro sistema inmunológico, preparándolo para defendernos cuando nos enfrentemos con el virus. Es como entrenar a nuestro cuerpo para reconocer al enemigo y pelear con cierta ventaja contra él, ¡sin las agujas de por medio!

Esto hoy ya es una realidad en Canadá. En 2022 se aprobó Covifenz, la primera vacuna contra el COVID-19 creada a partir de plantas, desarrollada por la empresa biotecnológica Medicago. En lugar de usar métodos tradicionales, esta innovadora vacuna utiliza unas partículas similares a virus (VLPs, por sus siglas en inglés Virus-like Particles) de la planta de tabaco como “fábrica biológica”, las cuales carecen de material genético por lo que no son infecciosas. Estas VLPs activan el sistema inmunológico de manera segura y eficaz, generando anticuerpos listos para defendernos del COVID-19. La tecnología vegetal detrás del ejemplo del Covifenz permite producir la vacuna de forma

rápida y en grandes cantidades, ofreciendo una solución innovadora para enfrentar futuras crisis sanitarias. Con Covifenz, estamos viendo cómo las plantas pueden abrir una nueva era en la medicina, transformándose en fábricas de vacunas de próxima generación, lo cual es un hito en la medicina basada en plantas [1].

El proceso detrás de la vacuna comestible

¿Cómo es posible que una planta produzca una vacuna? Aquí es donde la ingeniería genética se convierte en protagonista, tanto que parece magia. Pero no es magia, ¡es ciencia! El proceso es fascinante y se muestra en la

Figura 2. Primero, se identifica una proteína del virus que provocará la respuesta inmune, por ejemplo, la famosa proteína “espiga” del virus SARS-CoV-2, responsable de causar la COVID-19. Luego, se extrae el gen que codifica la proteína espiga y se inserta en un plásmido especial como si fuera una “copia genética”. El plásmido se introduce en una bacteria llamada *Agrobacterium*, la cual de manera natural es capaz de infectar a las plantas y transferirle su ADN que contiene el gen de interés. Cuando la planta adquiere el gen, ésta lo reconoce como propio y empieza a producir la proteína espiga en sus tejidos, ya sea en sus hojas, frutos o raíces. De esta forma, cuando nosotros ingerimos el vegetal, estaremos comiendo el antígeno y nuestro cuerpo generará moléculas de defensa llamadas anticuerpos. De tal manera que en el caso en que nos llegáramos a exponer al virus SARS-CoV-2 nuestro cuerpo, ya fue previamente entrenado para reconocerlo y combatirlo, y ya no lo toma de sorpresa.

Ventajas de las vacunas comestibles

¿Te imaginas recibir una vacuna sin agujas

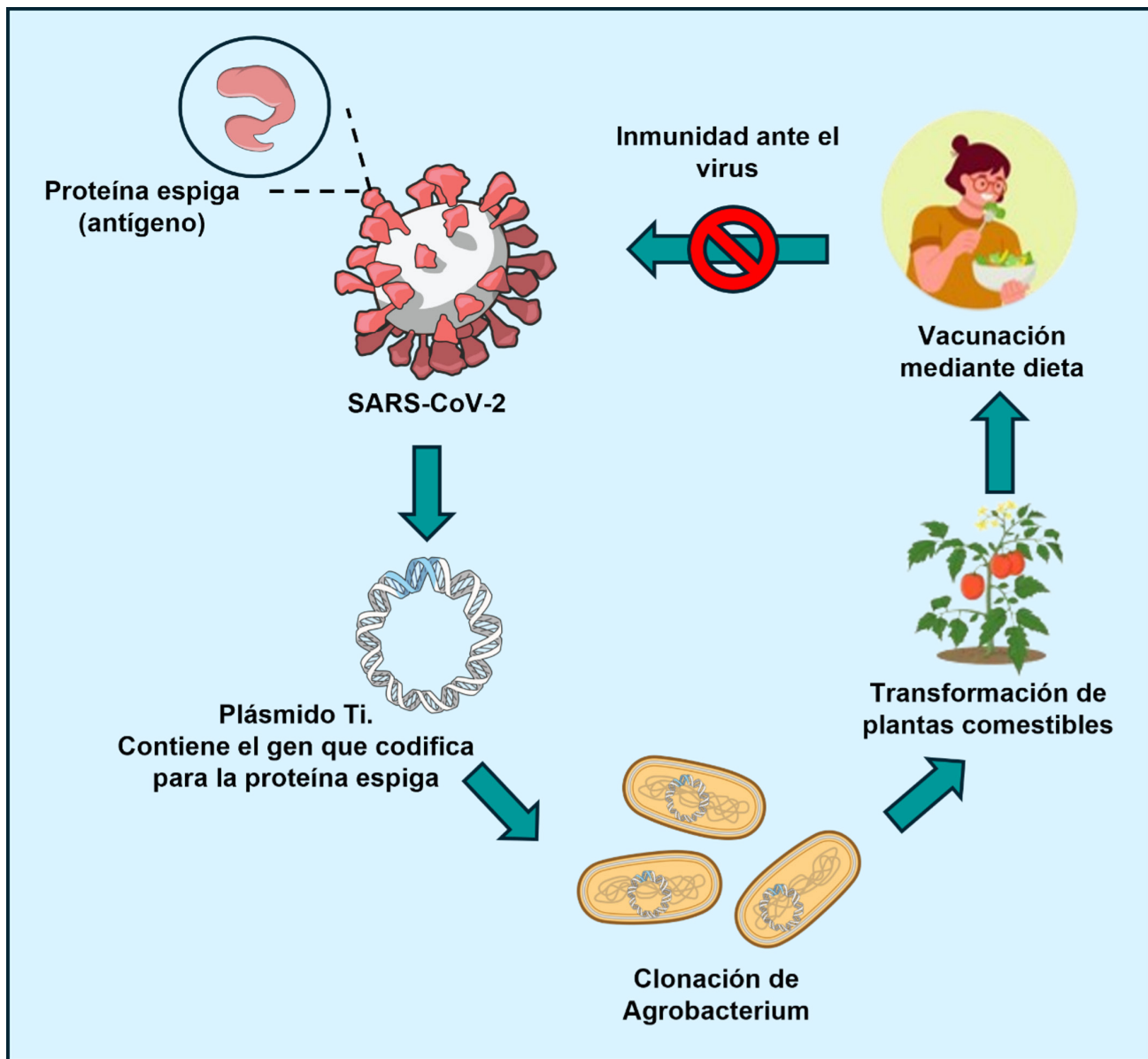


Figura 2. Proceso de producción de una vacuna comestible. Elaboración propia.

y simplemente comiendo una fruta o verdura? Se terminarían los llantos en los consultorios médicos o en las campañas de vacunación en las escuelas. ¡Solo habría que lidiar con que los pequeños efectivamente se comieran todas sus verduras! Las vacunas comestibles podrían hacer esto realidad, y sus ventajas son enormes pues a diferencia de las vacunas tradicionales, estas se pueden cultivar en plantas, lo que las hace más baratas y fáciles de producir (y transportar) en grandes cantidades. Además, no necesitan refrigeración, por lo que pueden llegar a lugares remotos y con pocos recursos médicos, haciendo posible la vacunación en áreas con acceso limitado. La difícil distribución y almacenamiento de las vacunas contra

SARS-CoV-2 fue un gran desafío y en la pandemia ocasionó que millones de dosis se perdieran y la enfermedad se propagara aún más. Si las vacunas fueran comestibles, su administración sería mucho más simple y no habría necesidad de hospitales, agujas ni de personal de salud aplicando las inyecciones.

Retos por superar para tener vacunas comestibles

Y la pregunta del millón es: si son tan buenas, ¿cómo es que no existen vacunas comestibles actualmente? La respuesta a esto no es simple, pues si bien las vacunas producidas en vegetables presentan enormes oportunida-

des, también enfrentan grandes desafíos. Los alimentos transgénicos han generado mucha controversia y no son aceptados por todos los consumidores. Su uso y regulación dependen de las leyes de cada país. Por otra parte, las plantas producen pequeñas cantidades de antígenos, lo que podría reducir su efectividad. Además, una vez ingeridos, estos antígenos deben sobrevivir al proceso digestivo, algo que no siempre es fácil, ya que pueden descomponerse antes de llegar a activar nuestras defensas.

Otro reto es ¿cómo controlar la dosis? Las vacunas tradicionales, cuando se envasan, tienen la dosis exacta que ha sido estudiada cuidadosamente para generar la respuesta deseada. Una dosis menor que la requerida, puede conducir a no tener la defensa adecuada. Una dosis mayor, puede ocasionar una sobre estimulación del sistema inmune, lo cual podría llegar a ser peligroso. Administrar las vacunas vegetales, puede ser riesgoso al no haber un control sobre la cantidad de vegetal que las personas podrían consumir, por que debería controlarse su uso y distribución.

Aunque estos obstáculos son grandes, la investigación avanza rápidamente. Con cada paso, nos acercamos más a un futuro donde protegernos contra enfermedades podría ser tan simple como disfrutar de una ensalada, un agua fresca, un jugo o como más te guste.

El futuro de la medicina preventiva: ¡Comer para estar saludable!

La ciencia avanza a pasos agigantados, y los ensayos con vacunas comestibles abren nuevas puertas en la prevención de enfermedades. La Tabla 1 ilustra ejemplos prometedores de plantas que se investigan actualmente para producir vacunas comestibles dirigidas a diversas enfermedades. Estas incluyen el cólera, la hepatitis B, el COVID-19, la rabia y la fiebre aftosa (dirigida al ganado), utilizando como “fábricas” vegetales a la papa, lechuga, tabaco, espinaca y alfalfa, respectivamente. Cada proyecto se encuentra en diferentes fases de desarrollo: la mayoría está en etapa de ensayos en ratones, donde los científicos evalúan tanto la seguridad como la efectividad de cada vacuna vegetal.

Otras plantas como plátanos, tomates y arroz también se están estudiando como posibles vehículos para estas vacunas. Estos avances podrían llevarnos a un futuro donde la inmunización sea tan accesible y cotidiana como el consumo de alimentos básicos, proporcionando una solución revolucionaria en el cuidado de la salud.

Vacunas vegetales: Salud al alcance de todos

Las vacunas basadas en plantas abren una puerta poderosa hacia el acceso universal a la salud. Su fácil cultivo y distribución permiten que la inmunización llegue a comunidades remotas y a poblaciones que, por diversas razones, tienen acceso limitado a los servicios médicos. A diferencia de las vacunas convencionales, las vacunas vegetales no necesitan

Tabla 1. Compuestos mayoritarios presentes en los aceites esenciales de las plantas.

Vacuna contra la enfermedad	Planta en la que se produce	Estado de desarrollo	Referencia
Cólera	Papa	Ensayos en ratones	[2]
Hepatitis B	Lechuga	Ensayos en ratones	[3]
COVID-19	Tabaco	Aprobado en Canadá (Covifez)	[1]
Rabia	Espinaca	Ensayos en ratones	[4]
Fiebre aftosa (ganado)	Alfalfa	Ensayos en ratones	[5]

refrigeración ni infraestructura compleja para su transporte, lo que reduce enormemente los costos y facilita su disponibilidad en cualquier rincón del planeta.

La salud es un derecho humano fundamental, y estas vacunas vegetales representan un avance hacia un mundo en el que cada persona, sin importar su ubicación o situación económica, pueda protegerse de enfermedades. Este enfoque permite llevar la medicina preventiva a todos los rincones y promoviendo un futuro más justo y saludable.

Conclusiones

Gracias a los avances en biotecnología, la idea de vacunarnos simplemente comiendo frutas o verduras está cada vez más cerca de ser realidad. Aunque las vacunas comestibles aún enfrentan obstáculos, cada nuevo descubrimiento abre la puerta a un futuro en el que cuidar de nuestra salud podría ser tan sencillo y cotidiano como elegir nuestros alimentos favoritos. Por un momento imaginemos un mundo donde cada bocado no solo nos nutre, sino que también refuerza nuestras defensas naturales, convirtiendo a los alimentos en nuestros aliados más poderosos en la prevención de enfermedades. Como dijo Hipócrates, padre de la medicina: “Que tu medicina sea tu alimento y que tu alimento sea tu medicina”. Este futuro no solo sería accesible y sin agujas, sino que llevaría inmunización a lugares remotos y de bajos recursos, revolucionando la salud a nivel global. Cada avance en este campo nos acerca a un mañana más saludable, donde nuestra dieta podría protegernos de amenazas invisibles con tanta naturalidad como ahora nos nutre. **iBIO**

Agradecimientos

El presente texto es un manuscrito original, donde una inteligencia artificial generativa como ChatGPT4 fue utilizada solo como corrector de estilo en ciertos párrafos del texto y la generación de una de las imágenes como se declara en el cuerpo del artículo.

Referencias

- [1] Hager, K. J., Pérez Marc, G., Gobeil, P., Diaz, R. S., Heizer, G., Llapur, C., Makarkov, A. I., Vasconcellos, E., Pillet, S., Riera, F., Saxena, P., Geller Wolff, P., Bhutad, K., Wallace, G., Aazami, H., Jones, C. E., Polack, F. P., Ferrara, L., Atkins, J., ... Ward, B. J. (2022). Efficacy and Safety of a Recombinant Plant-Based Adjuvanted Covid-19 Vaccine. *New England Journal of Medicine*, 386(22), 2084–2096. <https://doi.org/10.1056/NEJMoa2201300>
- [2] Arakawa, T., Chong, D. K. X., & Langridge, W. H. R. (1998). Efficacy of a food plant-based oral cholera toxin B subunit vaccine. *Nature Biotechnology*, 16(3), 292–297. <https://doi.org/10.1038/nbt0398-292>
- [3] Pniewski, T., Kapusta, J., Bociąg, P., Wojciechowicz, J., Kostrzak, A., Gdula, M., Fedorowicz-Strońska, O., Wójcik, P., Otta, H., Samardakiewicz, S., Wolko, B., & Plucienniczak, A. (2011). Low-dose oral immunization with lyophilized tissue of herbicide-resistant lettuce expressing hepatitis B surface antigen for prototype plant-derived vaccine tablet formulation. *Journal of Applied Genetics*, 52(2), 125–136. <https://doi.org/10.1007/s13353-010-0001-5>
- [4] Yusibov, V. (2002). Expression in plants and immunogenicity of plant virus-based experimental rabies vaccine. *Vaccine*, 20(25–26), 3155–3164. [https://doi.org/10.1016/S0264-410X\(02\)00260-8](https://doi.org/10.1016/S0264-410X(02)00260-8)
- [5] Dus Santos, M. J., Carrillo, C., Ardila, F., Ríos, R. D., Franzone, P., Piccone, M. E., Wigdorovitz, A., & Borca, M. V. (2005). Development of transgenic alfalfa plants containing the foot and mouth disease virus structural polyprotein gene P1 and its utilization as an experimental immunogen. *Vaccine*, 23(15), 1838–1843. <https://doi.org/10.1016/j.vaccine.2004.11.014>

¿Cómo
funciona?



Brilla, brilla, estrellita: Técnicas de microscopía de superresolución para iluminar el nanomundo

Twinkle, twinkle, little star: Superresolution microscopy techniques to illuminate the nanoworld

Josue David Hernández-Varela
Susana Dianey Gallegos-Cerda
José Jorge Chanona-Pérez*

Laboratorio de superresolución y nanoestructuras,
Departamento de Ingeniería Bioquímica, Escuela
Nacional de Ciencias Biológicas, Instituto Politécnico
Nacional, CDMX, México.

*Autor para la correspondencia:
jchanona@ipn.mx

Resumen

Desde su invención en los 90's las técnicas de microscopía de superresolución (MSR) han revolucionado el uso de fluorocromos específicos para observar fenómenos a escalas nanométricas, y ha abierto la puerta para develar eventos fotoquímicos a través de parpadeos brillantes en la nanoescala, similar a como titilan las estrellas en el firmamento. Así en esta contribución se describe de manera general las técnicas de la MSR usadas para observar eventos biológicos en la nanoescala.

Palabras clave: Nanoscopia, localización, moléculas.

Summary

Since their invention in the 1990s, superresolution microscopy (SRM) techniques have revolutionized the use of specific fluorochromes to observe phenomena at nanoscales and have opened the door to revealing photochemical events through bright flickering at the nanoscale, similar to how stars twinkle in the sky. Thus, in this contribution, the SRM techniques used to observe biological events at the nanoscale are described in general terms.

Keywords: Nanoscopy, localization, molecules.

De la microscopía de luz a la microscopía de superresolución

La microscopía de superresolución (MSR) es una excelente técnica para observar eventos a nanoescala en materiales biológicos, tomando como punto de partida los fundamentos de la microscopía de fluorescencia, superando los límites de la resolución de la microscopía óptica [1,2]. La novedad de la MSR es que resoluciones nanométricas son alcanzadas mediante el uso de fotones para observar las estructuras contenidas en los organismos y materiales biológicos en tiempo real con mínimo daño en la muestra. Esto es una ventaja en comparación las técnicas de microscopía de electrones y de fuerza atómica donde las muestras deben previamente fijarse y no pueden ser observadas bajo condiciones específicas de humedad o temperatura. Desde que Robert Hooke (siglo XVII) observó células de corcho a través de un microscopio, considerables esfuerzos se han realizado para mejorar la resolución de los microscopios ópticos

[2]. Modificaciones posteriores a los sistemas de microscopía permitieron observar bacterias usando luz solar como fuente lumínica. Hacia el siglo XVIII, los primeros lentes acromáticos fueron desarrollados para microscopios monoculares y observar muestras mediante luz transmitida y espejos para reflejar la luz. En siglo XIX, el desarrollo de lentes de mayor calidad óptica permitió tener objetivos de inmersión, paralelamente Ernest Abbe en 1873 estableció su ecuación que establece el límite de resolución de los microscopios ópticos en 200 nm. En la primera mitad del siglo XX la comprensión de las aplicaciones de espectro electromagnético, el avance de la física, la química orgánica y las ciencias de la vida promovieron el desarrollo de microscopía de fluorescencia; una herramienta fundamental para las ciencias biológicas pues permite conocer la distribución de los componentes celulares y algunas de sus funciones. Al término de la Segunda Guerra Mundial, con la aparición de la microelectrónica y la invención de los láseres, se permitió el desarrollo del microscopio confocal de barrido láser (CLSM, por sus siglas en inglés) y de doble fotón o multifotónico; estos sistemas de microscopía fueron herramientas importantes para el avance de las ciencias de la vida en el siglo XX. El establecimiento de la nanotecnología hacia el final del siglo XX e inicios del XXI revolucionó el mundo de la microscopía, y así fueron desarrollados mejores instrumentos para la observación de las estructuras a escalas nanométricas [1-4]. Durante este tiempo, la microscopía de electrones tuvo avances importantes para estudiar las estructuras biológicas en la nanoescala, pero hacía falta una técnica de microscopía que pudiera resolver las estructuras biológicas a escalas nanométricas, en tiempo real, en muestras vivas, sin el uso de vacío, sin daño, ni procedimientos de preparación complejos e invasivos. El reto era superar el límite de resolución espacial de 200 nm impuesto por la ecuación de Abbe para microscopios ópticos, así la necesidad de conocer lo que ocurre dentro de las células vivas en la nanoescala. Esto permitió el desarrollo de las técnicas de MSR, que por definición es toda aquella técnica de microscopía fotónica que permita alcanzar una resolución

menor o igual 100 nm.

La primera técnica de superresolución que se desarrolló fue la microscopía de iluminación estructurada (SIM, por sus siglas en inglés). En el año 2000, Gustafsson [5] reportó un sistema usando un microscopio con iluminación láser y una rejilla para generar un patrón de franjas y un efecto Moiré que es el principio básico de la SIM, alcanzando 100 nm de resolución que es el doble al obtenido con microscopio convencional. En paralelo la microscopía de agotamiento de emisión estimulada (STED, por sus siglas en inglés) fue introducida por Stefan Hell, que permite alcanzar resoluciones de 30 nm. Finalmente, las técnicas de MSR alcanzaron su máximo auge en 2014, cuando Betzig, Moerner y Hell obtuvieron el Premio Nobel de Química por el desarrollo de la microscopía de fluorescencia de superresolución, actualmente conocida como nanoscopía, por el desarrollo de la microscopía STED y la localización de moléculas simples mediante microscopía (SMLM, por sus siglas en inglés).

De la microscopía de luz a la microscopía de superresolución

Desde la invención del primer microscopio óptico diversos avances se han llevado a cabo en la construcción de objetivos, oculares compuestos, sistemas de iluminación y detección [6]. Por ejemplo, en un microscopio invertido con epi-iluminación, los fotones entran por los objetivos, iluminan la muestra, el haz de luz incide sobre la muestra y la imagen se forma (Figura 1a). La resolución se mejora y estructuras de hasta media micra (0.5 μm) se pueden observar usando objetivos de mayor magnificación, pero ciertos efectos de difracción generan una limitante cuando el área de la muestra que es irradiada es mayor que la magnificación usada.

Por otro lado, la microscopía de fluorescencia, en donde los objetos son iluminados por haces de luz en rangos de longitudes de onda específicas que se logra usando filtros específicos, en lugar de iluminar la muestra con un haz de luz blanca que comprende el rango de la luz visible (400-700 nm) del espectro

electromagnético [6,7]. Debido a la incidencia de los rayos de luz específicos, la forma de un objeto observado se puede definir con mayor precisión analizando la imagen resultante. Esta imagen se produce a partir de la radiación electromagnética emitida por las moléculas dentro del objeto que han absorbido energía de la fuente de excitación primaria. Después de absorber esta energía, las moléculas vuelven a emitir luz en longitudes de onda más largas [6]. Este proceso, conocido como fluorescencia, permite una representación más precisa de la forma del objeto en función de las características específicas de la luz emitida. Sin embargo, para lograr una calidad de imagen óptima, es necesario usar fluorocromos o fluoróforos, que son moléculas capaces de absorber fotones a

una longitud de onda menor y emitir fotones a longitudes de onda mayores. Por ejemplo, la clorofila, el pigmento más abundante en las plantas, absorbe energía alrededor de 561 nm y puede emitir fluorescencia llegando a los 600-800 nm [7].

Con el desarrollo de láseres, el uso de filtros con longitudes de onda específicos quedó atrás y apareció la microscopia de fluorescencia confocal o microscopía confocal de barrido láser (CLSM, por sus siglas en inglés) que emplea una iluminación puntual, que atraviesa filtros dicróicos y que junto con un orificio (pin-hole) ubicado en un plano óptico conjugado frente al detector permite observar el proceso de fluorescencia presente en la muestra (Figura

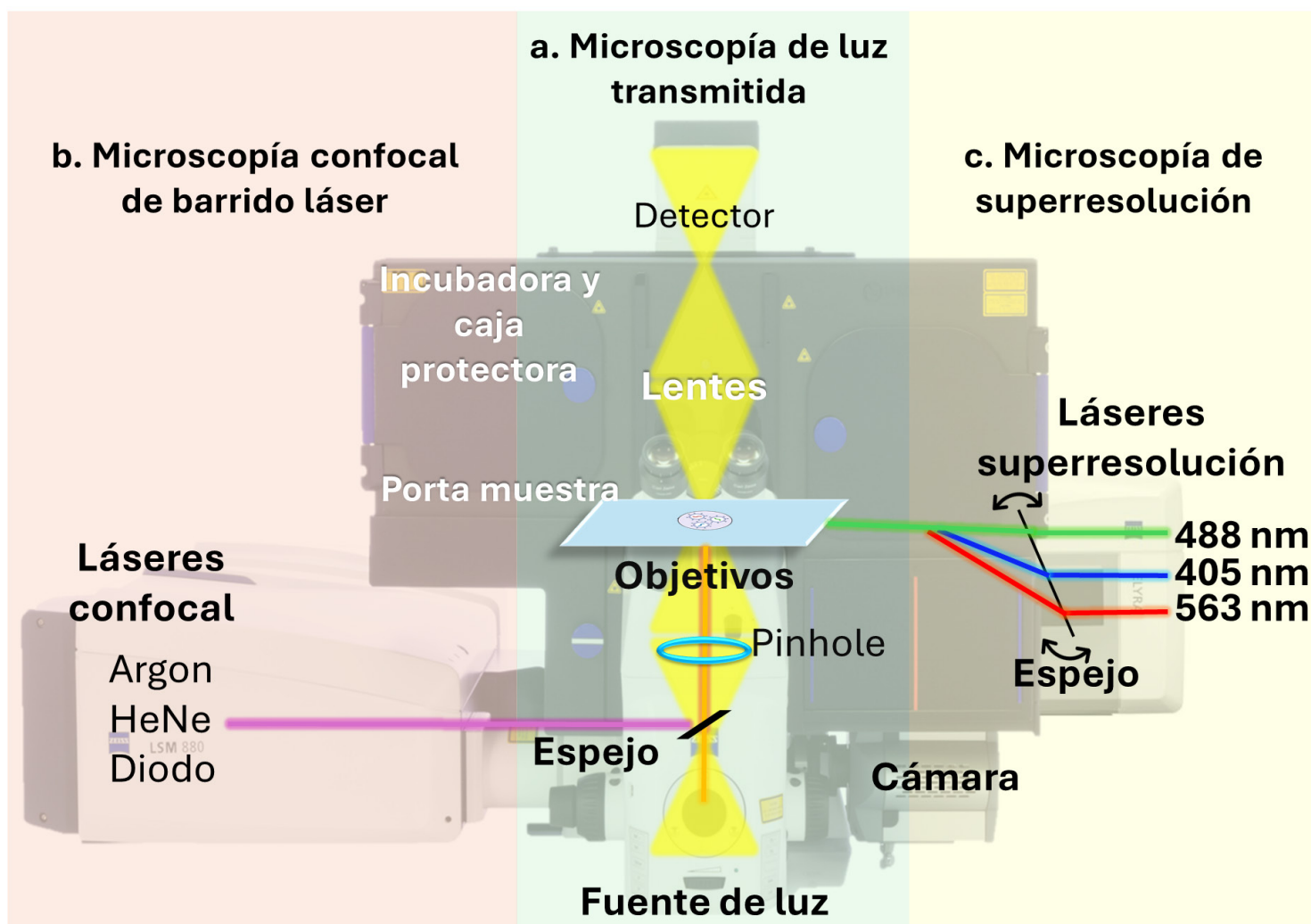


Figura 1. Descripción de los diferentes tipos de microscopia: de luz transmitida (a), confocal láser (b) y de superresolución (c). Se muestra las partes esenciales para el uso de un equipo que posee las tres formas de microscopía, así como algunas de las líneas láser usadas en un microscopio confocal y en un microscopio de superresolución.

1b). Este diseño le permite eliminar cualquier información que provenga de fuera del plano focal [6,8]. Como resultado, solo se detecta la luz dentro de este plano focal específico, lo que produce una calidad de imagen significativamente mejorada en comparación con los microscopios de fluorescencia o de campo amplio (WF, por sus siglas en inglés) [5,6]. Si bien en la microscopía de fluorescencia y CLSM, el pinhole y los objetivos favorecen la observación de las moléculas en un plano, también es importante acotar que el haz de luz (láser) es de vital importancia pues permitirá usarse como luz de excitación para las moléculas y también para conocer su emisión con una resolución específica. Otro concepto importante para entender el término resolución es el “disco de Airy” que se puede explicar como la ubicación de moléculas individuales conocidas como emisores en el plano focal, que están diferenciadas o no de otras moléculas fluorescentes. Sin embargo, cuando no están separados, no se ven como puntos de luz, sino como pequeñas manchas [6,8]. Tomando en consideración el concepto de disco de Airy, se definió el término de resolución óptica como la distancia mínima entre objetos distinguibles en una imagen, que en práctica se describe cuando dos o más moléculas se encuentran juntas y estos discos se superponen. De allí, la resolución de una imagen considerando los discos de Airy (r_{airy}) vendría dada por la relación que existe entre la longitud de onda de la luz (λ) utilizada para la observación entre la apertura numérica (NA, por sus siglas en inglés) del lente objetivo, todo esto multiplicado por una constante específica como se define en la fórmula $r_{\text{airy}} = 0.61(\lambda/NA_{\text{obj}})$. Esto permite conocer el límite del poder de resolución de un microscopio de luz que es aproximadamente de 200 nm y propuesto por Ernst Abbe [4,6,8].

Sin embargo, actualmente la MSR (Figura 1c) emplea algunas estrategias que permiten romper el límite de resolución impuesto por Abbe y alcanzar valores de hasta 10 nm. Una de estas estrategias es el uso de láseres con mayor potencia, dado que es necesaria la excitación efectiva de los fluoróforos, y el uso de aditamentos físicos como el uso de cámaras de-

tectoras (sCMOS y CCD), rejillas que rotan actuando como un filtro de la fluorescencia excedente, así como el uso de láseres superpuestos que permiten la adquisición de imágenes con resoluciones por debajo del límite permitido. Por otro lado, el uso de fluoróforos que limitan el rango de fluorescencia dependiendo de sus propiedades ópticas (coeficiente de extinción), lo que permite observar el fenómeno de “titilar” a la nanoescala. Para explicar este fenómeno, primero se debe explicar que, aunque los fluoróforos utilizados en CLSM pueden ser fluoróforos orgánicos e inorgánicos convencionales, estos presentan alto nivel de fluorescencia lo que puede generar señales ruidosas y por ende una disminución en la resolución de la imagen. En contraste, las técnicas de MSR utilizan fluoróforos de menor tamaño y de alta especificidad a los sitios de estudio de la muestra, lo que mejora sustancialmente la resolución espacial.

Nanoscopía: técnicas de superresolución con moléculas fluorescentes específicas

Como se explicó antes, un elemento vital para la observación en microscopía de fluorescencia y confocal es el uso de fluoróforos. Estos compuestos, pueden ser moléculas convencionales orgánicas e inorgánicas, sirven para visualizar muestras, ya que poseen un nivel óptimo de fluorescencia, pero la unión inespecífica del colorante y sus propiedades ópticas, hacen que se detecten señales ruidosas, reduciendo la resolución obtenida [8,9]. En la microscopía de súperresolución (Figura 1c), se usan fluoróforos con un comportamiento específico bajo un láser adecuado que puede superar la barrera de difracción alcanzando alrededor de 10 nm en función de la localización de moléculas individuales, y una alta especificidad de las moléculas que mejora la resolución espacial [9]. La resolución en la microscopía de superresolución está directamente relacionada con las moléculas fluorescentes utilizadas. Esta localización de las moléculas individuales se basa en la precisión de la posición del fluoróforo de un punto aislado de otras moléculas fluorescentes y es conocida como microscopía de localización de molécula única (SMLM, por sus siglas

en inglés) [10]. Lo que permite realizar este tipo de microscopía son las propiedades químicas de algunas moléculas fluorescentes que poseen un comportamiento espaciotemporal complejo, es decir, se pueden usar varios fluoróforos cercanos que emitan luz en momentos separados y entonces resolverlos en el tiempo si se toman secuencialmente muchas imágenes [8].

Particularmente, para localizar una molécula individual es necesario activar y desactivar las emisiones de fluorescencia. Esta característica se define como una acción de prendido-apagado, por lo que los fluorocromos actúan de manera similar a una estrella que brilla según la energía que reciba. Así presentará una especie de “titilar” por periodos muy cortos de tiempo. Los fluorocromos usados en MSR pueden clasificarse dependiendo de su forma de “titilar” o de prenderse y apagarse. De esa forma los podemos clasificar como fluoróforos foto-activables, foto-intercambiables y foto-convertibles.

En primera instancia, los fluoróforos fluorescentes foto-activables pueden pasar de un estado no fluorescente (oscuro) a un estado fluorescente (brillante) mediante la irradiación con luz del espectro menor a uno mayor. En este proceso, las moléculas apagadas en su estado basal se excitan y pasan a un estado encendido que puede detectarse por el microscopio. De forma contraria, los fluoróforos foto-convertibles, como su nombre lo indica, tienen la capacidad de cambiar su longitud de onda de emisión una vez que son irradiados con una fuente de energía externa, lo que significa que pueden usarse dos canales de color tras la foto-estimulación. Este proceso puede ser reversible en la mayoría de estas moléculas y por lo tanto favorecen en mucho la adquisición de información en fenómenos que duren muy poco tiempo, por ejemplo, la reacción de una enzima con un particular sustrato marcado con un fluoróforo de este tipo, ya que la interacción puede observarse desde el principio del experimento. Finalmente, los fluoróforos foto-intercambiables son moléculas fluorescentes que pueden cambiar

de un estado no fluorescente a uno fluorescente como en el caso de los foto-activables. Sin embargo, una vez que son irradiadas por un láser de excitación en longitudes de onda muy específicas, este proceso puede ser reversible porque la molécula fluorescente no cambia sus propiedades físicas una vez es foto-estimulada [9, 10]. Así, con la ayuda de pulso de luz de diferentes longitudes de onda, estos fluoróforos fluorescentes pueden activarse y desactivarse cientos de veces sin foto-decoloración. Ahora, conociendo estas propiedades específicas de cada una de las moléculas fluorescentes que se pueden usar en la MSR, es posible asociarlas a ese proceso de “titilar” por periodos muy cortos de tiempo.

Tal y como ocurre con un árbol de navidad (Figura 2a), las técnicas de SMLM confieren un barrido espacial de la muestra y pueden localizar con mayor precisión un emisor de luz, es decir, veremos un árbol de navidad más nítido con todas las luces de colores en específico, mientras que un árbol no resuelto se vería como una mezcla de colores sin definición, como cuando se usa la CLSM. Dentro de las técnicas más utilizadas están la microscopía de localización foto-activada (PALM, por sus siglas en inglés) y la microscopía de reconstrucción óptica estocástica (STORM, por sus siglas en inglés). En ambas técnicas, un proceso de reconstrucción en el tiempo define una molécula mediante una función de dispersión de puntos asociado a una emisión Gaussiana del emisor [8]. Este proceso se repite en cada imagen tomada en el tiempo y luego se agrupan todas las imágenes, con lo que se obtiene una imagen reconstruida con millones de puntos asociados a la localización de una molécula hasta más o menos 10 nm [8, 9, 10]. Este proceso hace similitud a la técnica del puntillismo introducido por el pintor Frances Georges-Pierre Seurat, y que luego hizo popular Vicent van Gogh, como se muestra en las alegorías que se presentan en Figura 2 cuando se usan las técnicas nanoscópicas.

Por otro lado, dada la respuesta no lineal a la excitación que tienen la mayoría de los fluoróforos, se pudiera aprovechar esta caracterís-

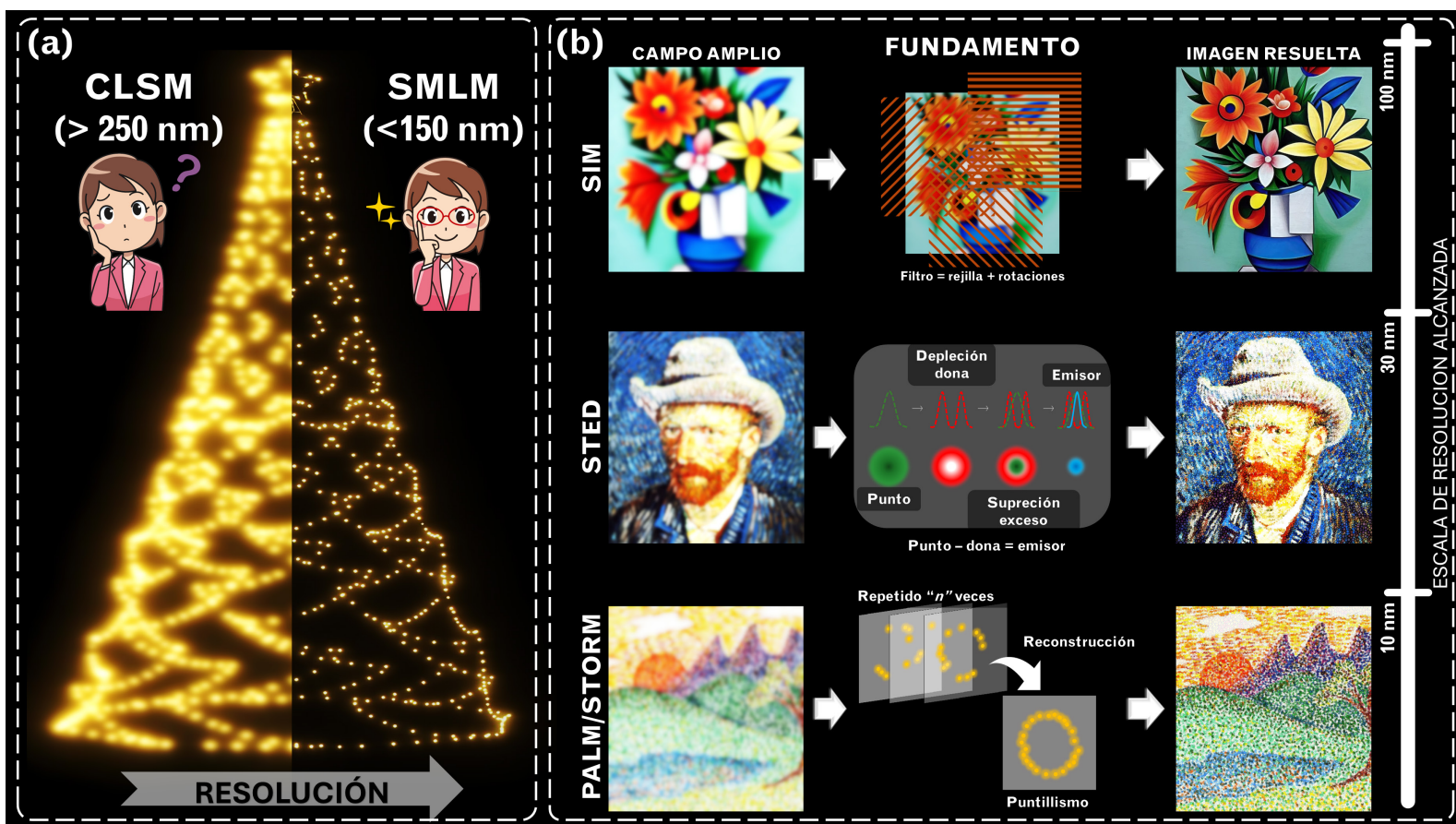


Figura 2. Diversas técnicas nanoscópicas y su comparación con la microscopía confocal de barrido láser (CLSM). (a) La microscopía de localización de molécula única (SMLM) define la máxima resolución alcanzada usando fluoróforos específicos y aditamentos que ayudan a llevar a la nanoescala usando una fuente de luz. (b-d) Ejemplos de pinturas en puntillismo haciendo alegoría a las técnicas de SIM, STED y PALM/STORM con su respectiva escala en comparación con la microscopía de campo amplio (wide-field, por su definición en inglés).

tica para mejorar la resolución. Estos métodos conocidos como microscopía de superresolución determinística incluyen la microscopía de agotamiento de emisión estimulada (STED, por sus siglas en inglés). En esta técnica, lo que se intenta es reducir la fluorescencia en regiones específicas de la muestra, dejando un punto focal central activo para emitir fluorescencia [8]. La forma más simple de explicar la técnica de STED sería usando como ejemplo una rosquilla y un punto fluorescente. El punto se considera el punto de excitación máxima, entonces un punto de desexcitación en forma de rosquilla se superpone en el mismo espacio de excitación y se realiza una sustracción de la fluorescencia circundante, lo que refleja un área restante que permite una fluorescencia específica del emisor y que puede alcanzar valores de 30 nm [10].

Finalmente, una técnica bastante útil es la

microscopía de iluminación estructurada (SIM, por sus siglas en inglés) que, con ayuda de algunos implementos físicos como rejillas y rotaciones, puede reducir la gran relación de señal-ruido y obtener imágenes resueltas [9]. En esta técnica se hace uso de un efecto conocido como el efecto de Moiré que se describe como una deconvolución matemática de la señal de interferencia usando una transformada de Fourier que mejora la resolución espacial hasta los 100 nm.

Aplicaciones y tendencias futuras

Si bien la MSR tiene sus mayores aplicaciones en las ciencias de la vida como la biología celular, virología, inmunología, neurociencias y cancerología, también en otras especialidades como la ciencia de los materiales, catálisis, polímeros, biosensores, y otras áreas han empe-

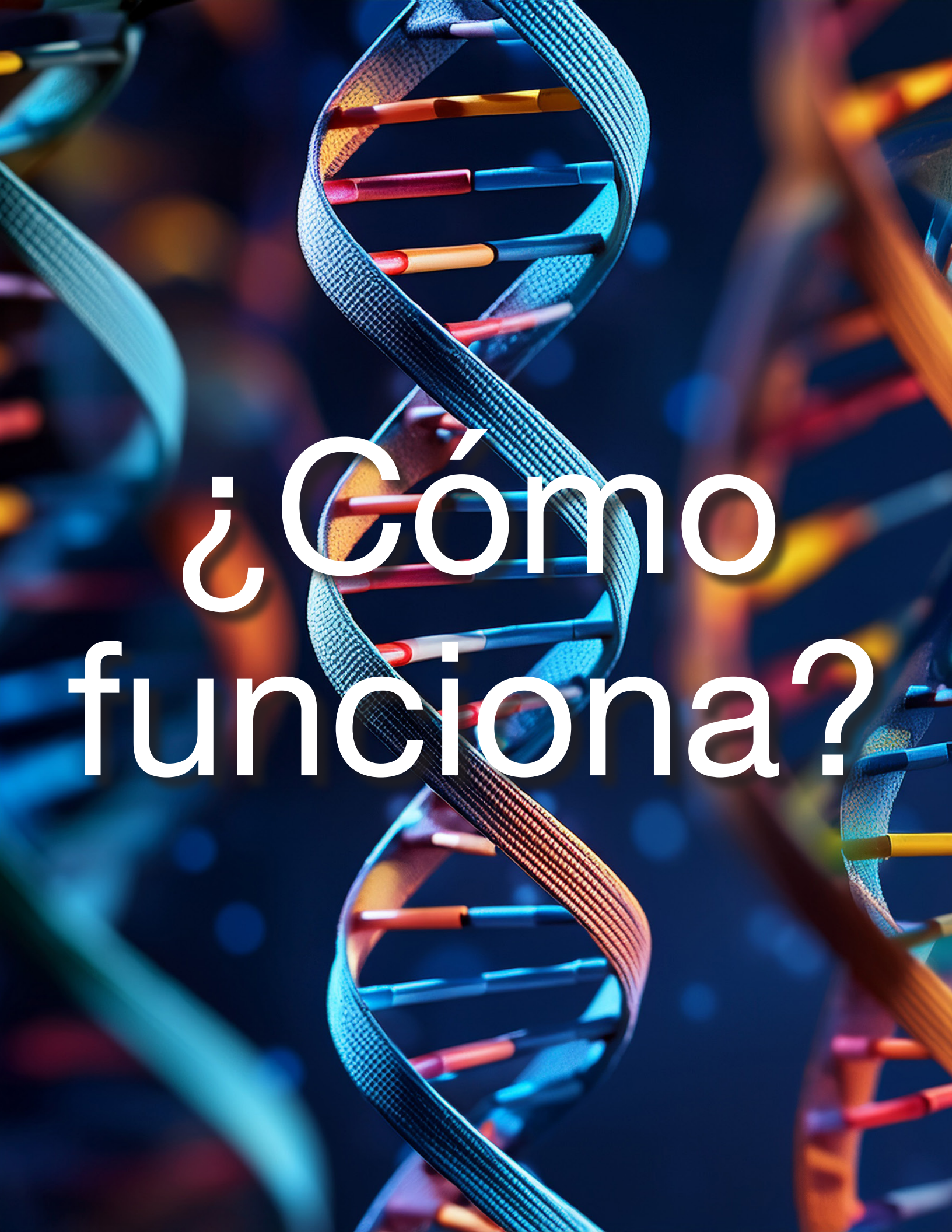
zando a aplicar la MSR dado su potencial para caracterizar la estructura de materiales sensibles a escalas nanométricas. Así conforme se mejoren las técnicas de MSR y nuevos fluorocromos se desarrollen, la fluorescencia de moléculas individuales y su localización, similar al titilar de las estrellas del firmamento, la MSR continuará fascinando a más y nuevos investigadores interesados en develar los secretos del nanomundo. **iBIO**

Referencias

- [1] Doetsch, R. N. (1961). History of the Microscope. *Science*, 133(3456), 946–947. <https://doi.org/10.1126/science.133.3456.946>
- [2] Karlsoon, C. (2009). The beginning. *Nature Cell Biology*, Milestone 1, S6. <https://doi.org/10.1038/ncb1938>
- [3] Masters, B. R. (2009). A Brief History of the Microscope and Its Significance in the Advancement of Biology and Medicine. *Confocal Microscopy and Multiphoton Excitation Microscopy*, 3–17. <https://doi.org/10.1117/3.660403.ch1>
- [4] Lawson, I. (2016). Crafting The microworld: How Robert Hooke Constructed knowledge about small things. *Notes and Records*, 70(1), 23–44. <https://doi.org/10.1098/rsnr.2015.0057>
- [5] Gustafsson, M.G.L. (2000). Surpassing the Lateral Resolution Limit by a Factor of Two Using Structured Illumination Microscopy. *Journal of Microscopy*, 198, 82–87. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2818.2000.00710.x>
- [6] Hickey, S. M., Ung, B., Bader, C., Brooks, R., Lazniewska, J., Johnson, I. R. D., ... Brooks, D. A. (2022). Fluorescence microscopy—an outline of hardware, biological handling, and fluorophore considerations. *Cells*, 11(1). <https://doi.org/10.3390/cells11010035>
- [7] Donaldson, L. (2020). Autofluorescence in plants. *Molecules*, 25(10). <https://doi.org/10.3390/molecules25102393>
- [8] Gallegos-Cerda, S. D., Hernández-Varela, J. D., Chanona-Pérez, J. J., Arredondo Tamayo, B., & Méndez Méndez, J. V. (2023). Super-Resolution Microscopy and Their Applications in Food Materials: Beyond the Resolution Limits of Fluorescence Microscopy. *Food and Bioprocess Technology*, 16(2), 268–288. <https://doi.org/10.1007/s11947-022-02883-4>
- [9] Pujals, S., Feiner-Gracia, N., Delcanale, P., Voets, I., & Albertazzi, L. (2019). Super-resolution microscopy as

a powerful tool to study complex synthetic materials. *Nature Reviews Chemistry*, 3(2), 68–84. <https://doi.org/10.1038/s41570-018-0070-2>

- [10] Kabayama, K., & Tero, R. (2018). Super-Resolution Microscopy. In J. Heath & A. Kusserow (Eds.), *Compendium of Surface and Interface Analysis (Essential)*, pp. 651–656). Springer Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-10-6156-1_105



¿Cómo
funciona?

El ATAC-seq, la llave para abrir los secretos del genoma

ATAC-seq, the key to unlock the genome secrets

Resumen

El genoma de cada célula es enorme, por lo que se encuentra hiper compactado dentro del núcleo celular en forma de cromatina. Sin embargo, no toda la información codificada en nuestro ADN es necesaria en todo momento, por lo que sólo se requiere que algunos de los genes estén activos en determinada célula y en cierta condición. La cromatina tiene sitios completamente inaccesibles por el nivel de compactación, mientras que las regiones que se encuentran accesibles corresponden a los genes necesarios para la célula. El ATAC-seq es una técnica utilizada para conocer todas las regiones accesibles del genoma celular.

Palabras clave: Cromatina, compactación del ADN, transposasa, secuenciación masiva, bioinformática.

Summary

The genome of each cell is huge and highly compacted within the nucleus as chromatin. However, not all DNA-encoded information is required simultaneously; only a subset of genes is activated depending on the cell type and specific conditions. Chromatin contains inaccessible regions due to its high compaction level, while accessible areas correspond to functionally active genes. ATAC-seq is a powerful technique for accurately identifying accessible regions of the genome, offering critical insights into gene regulation and chromatin organization.

Keywords: Chromatin, transposase, massive-sequencing, DNA-compaction, bioinformatics.

Jaqueline Hersch-González
Víctor Julián Valdés*

Instituto de Fisiología Celular, UNAM, CDMX, México.

*Autor para la correspondencia:
julian.valdes@ifc.unam.mx

¿Cómo cabe el genoma de 4,600 millones de pares de bases en un núcleo de 6 micrómetros?

Muchos estamos familiarizados con el hecho de que nuestras células tienen un núcleo donde se almacena nuestro ADN, es decir, nuestro genoma. Pero sigue siendo impresionante recordar que la longitud de nuestro genoma sería de poco más de dos metros si lo extendiéramos de manera lineal [1]. Uno se preguntará entonces, ¿cómo cabe todo nuestro genoma en un núcleo que mide tan solo 6 micras?, es decir, ¡un sitio tres millones de veces menor! ¡Es como acomodar 40 km de hilo dentro de una pelota de tenis! La respuesta es la compactación: el ADN está enrollado alrededor de unas proteínas denominadas histonas, formando una estructura llamada nucleosoma (Figura 1). Los nucleosomas van uno tras otro, como si fuera un “collar de perlas moleculares”. Después los nucleosomas hacen una estructura helicoidal, conocida como fibra de 30 nanómetros (por su grosor) [1]. Es como si fueras enrollando al collar de perlas alrededor de una ramita. En este punto el genoma está tan compacto que cabe dentro del núcleo, y a esa estructura hiper compactada de ADN y proteínas se le llama **cromatina**.

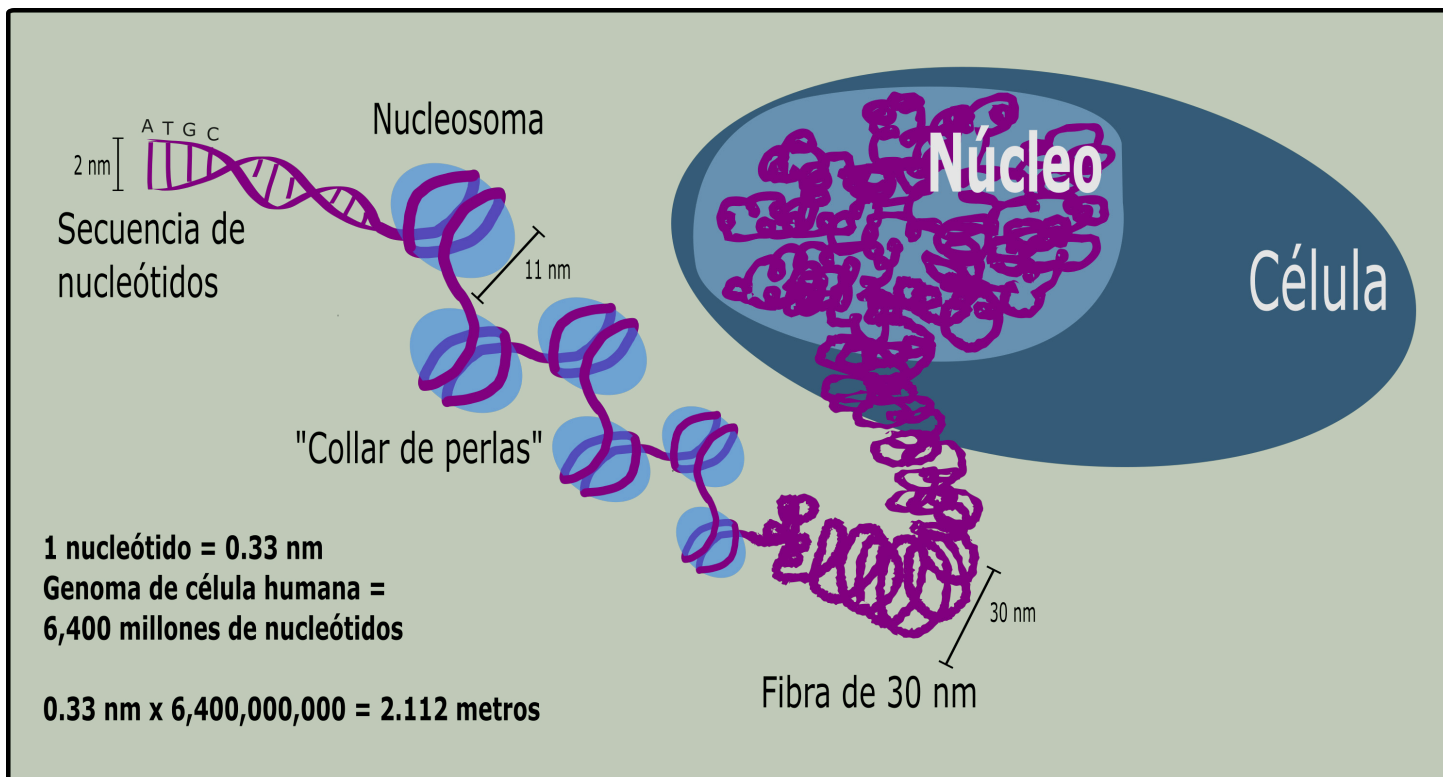


Figura 1. **Compactación de la cromatina dentro del núcleo eucarionte.** La molécula de ADN se enrolla alrededor de los nucleosomas que están conformados por ocho proteínas histonas (H3, H4, H2A y H2B, dos de cada una) para formar la cromatina. Esta estructura se hipercompacta en la fibra de 30 nm dentro del núcleo.

¿Todas las células tienen la misma accesibilidad de la cromatina?

Aunque todas las células de nuestro cuerpo tienen la misma información genética, en él tenemos gran variedad de células y tejidos. Esto se debe a que las distintas células expresan distintos genes [2]. Por ejemplo, mientras que las neuronas expresan genes para sintetizar neurotransmisores, las células musculares expresan genes como la miosina, que nos permiten movernos. Conocer los mecanismos moleculares que permiten la "expresión diferencial" de genes entre tejidos, es una frontera de la biología moderna, y la compactación de la cromatina es uno de estos mecanismos.

Ahora que sabemos por qué es importante la compactación de la cromatina, nos interesa explorar una técnica que se usa para estudiar su accesibilidad. Pero, ¿a qué nos referimos con accesibilidad? Pensemos en un ejemplo: una secuencia de ADN que corresponde a un gen hipotético llamado "Genus". Para que a partir del ADN de *Genus* se produzca una proteína, el gen necesita primero ser transcrito de ADN a ARN por la enzima "ARN polimerasa", y

después ser traducido de ARN a proteína por medio de los ribosomas. Para que la ARN polimerasa tenga acceso al ADN de *Genus*, la secuencia necesita estar libre de nucleosomas o "accesible". Regresando al ejemplo de los genes de neurotransmisores (neuronas) y miosina (músculo), la cromatina de estos genes debe estar accesible en las células donde se requieren, pero probablemente estén no accesibles en otros tipos celulares, donde estos genes no son necesarios. ¡Sorprendente como nuestras células optimizan los procesos moleculares!

Así pues, como ya puedes haber deducido, la cromatina se mantiene accesible en regiones donde hay genes importantes para que la célula se mantenga viva o lleve a cabo su función. A estos genes los podemos llamar "activos", mientras que a los genes que no se expresan los podemos llamar "inactivos". Por lo tanto, conocer los sitios de cromatina accesible del genoma de una célula nos puede dar un indicio de cuáles genes están activos.

Pero ahora, ¿cómo podemos saber cuáles zonas del genoma tienen cromatina accesible en una célula o tejido? Existen varias técnicas

que evalúan la accesibilidad, algunas tienen la desventaja de ser inespecíficas [3], pero una de las más eficientes y de mayor resolución es el “ensayo de cromatina accesible a transposasa utilizando secuenciación,” o ATAC-seq por sus siglas en inglés (*Assay for Transposase-Accessible Chromatin with sequencing*), que permite identificar las regiones de cromatina libres de nucleosomas [4].

¿Cómo funciona el ATAC-seq?

En el ATAC-seq utilizamos una proteína *transposasa* [4], esta proteína existe en casi todos los organismos y puede mover segmentos de ADN, conocidos como transposones, de un sitio a otro del genoma. Lo que más nos interesa de esta enzima es que tiene la capacidad

de cortar el ADN, y solamente puede hacerlo en regiones accesibles de la cromatina. En el ATAC-seq la transposasa se agrega a núcleos celulares intactos, pues queremos preservar la estructura de la cromatina tal cual está en un tejido o condición.

Para ayudar a nuestra imaginación veamos el esquema de la Figura 2, donde se representa la cromatina cerrada y la cromatina abierta (o accesible). La transposasa que se utiliza en ATAC-seq se llama *Tn5*, se produce en un laboratorio de manera artificial y tiene dos particularidades importantes: 1) es hiperactiva pues fue modificada por los científicos para aumentar su eficiencia; y 2) tiene adaptadores de ADN unidos a su estructura (verdes y rojos en la figura). Los adaptadores son secuencias cortas de

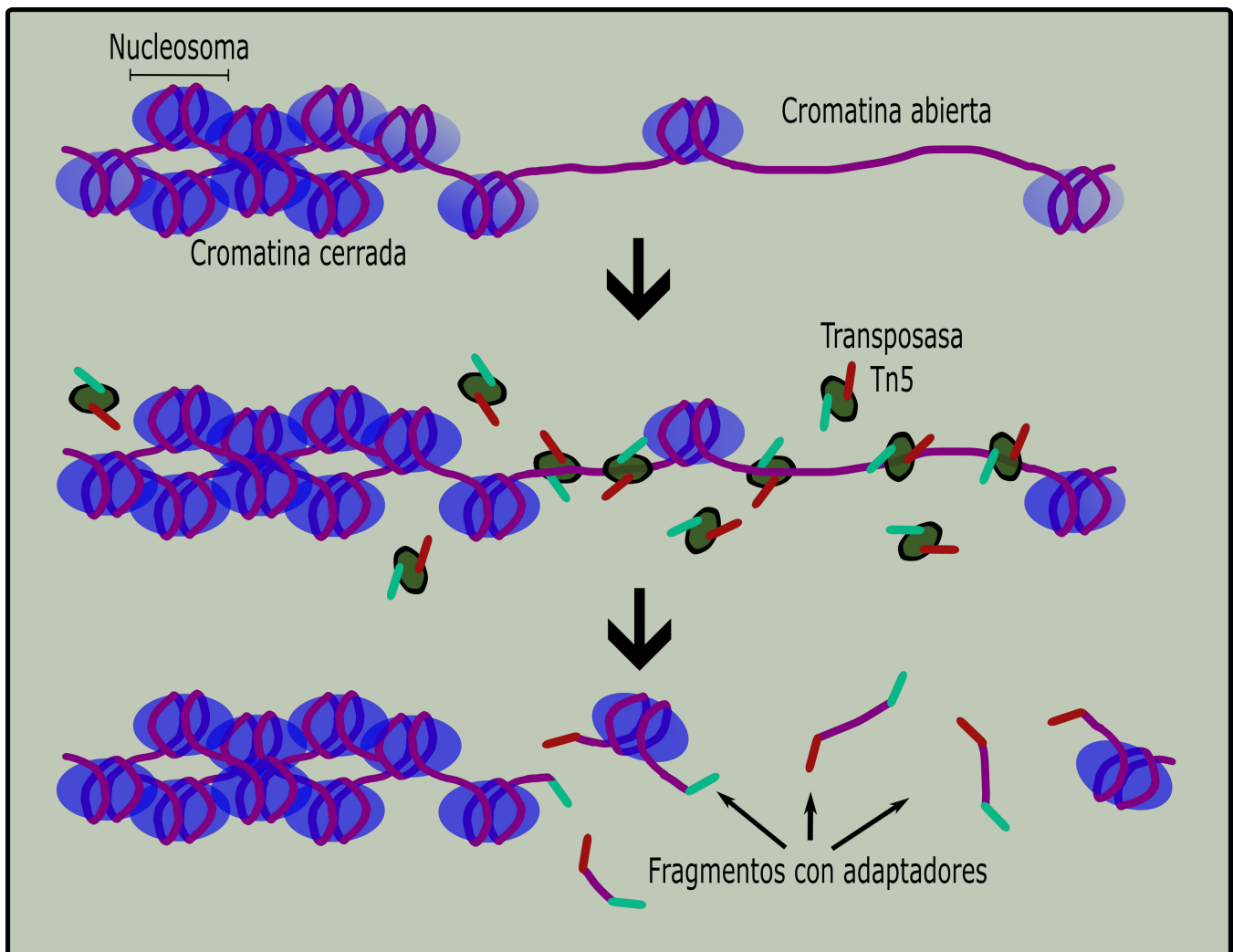


Figura 2. Esquema de la técnica de “ensayo de cromatina accesible a transposasa utilizando secuenciación” o ATAC-seq por sus siglas en inglés (*Assay for Transposase-Accessible Chromatin with sequencing*). Los núcleos celulares intactos son incubados con la transposasa hiperactiva *Tn5* que se produce de manera artificial. Esta transposasa corta en regiones accesibles e introduce adaptadores, que se representan en rojo y verde.

ADN sintético (~20 nucleótidos) y su función es importante en la amplificación y secuenciación. Una vez que entra en contacto con la cromatina, la Tn5 se une y corta el ADN en regiones accesibles e inserta también los adaptadores de ADN en cada uno de los extremos. Después de esto ya tenemos las regiones accesibles cortadas y marcadas con secuencias conocidas de ADN (adaptadores), ¡ya sólo queda identificarlas!

¿Y la secuenciación?

Después de incubar los núcleos con la Tn5, tenemos una mezcla de fragmentos de todo el genoma que corresponden a las regiones accesibles y que tienen unidos los adaptadores en sus extremos. Como quizás hayas escuchado antes, para saber qué nucleótidos conforman una molécula de ADN y su orden, se realiza un proceso llamado secuenciación. La secuenciación que se utiliza en el ATAC-seq es de las llamadas de “última generación” o *NGS (Next-Generation Sequencing)* y es tan eficaz que pueden secuenciarse millones de fragmentos de ADN al mismo tiempo, aunque no entraremos en los detalles técnicos en este artículo.

Pero antes de la secuenciación hay un paso muy importante: la amplificación de nuestros fragmentos por PCR, lo que se conoce también como preparación de bibliotecas. Cuando la Tn5 corta el ADN, inserta cada adaptador en lados opuestos, haciendo que los fragmentos queden desaparejos en sus extremos, por lo que es necesario realizar la amplificación por PCR para

completar los extremos y que queden “parejos”. La otra parte importante de la amplificación es la de añadir los *barcodes* o índices, que son otra secuencia corta de ADN para diferenciar una muestra de otra (ej. tratamiento de alta glucosa vs baja glucosa). Por lo tanto, cuando se realiza la amplificación es crucial poner diferentes índices a distintas muestras (Figura 3).

Los adaptadores son importantes para la secuenciación porque son esenciales para la unión de nuestras bibliotecas a las celdas de flujo que se utilizan en la secuenciación masiva. Las celdas de flujo tienen adaptadores complementarios a los de nuestros fragmentos, lo que facilita su reconocimiento y unión a la celda.

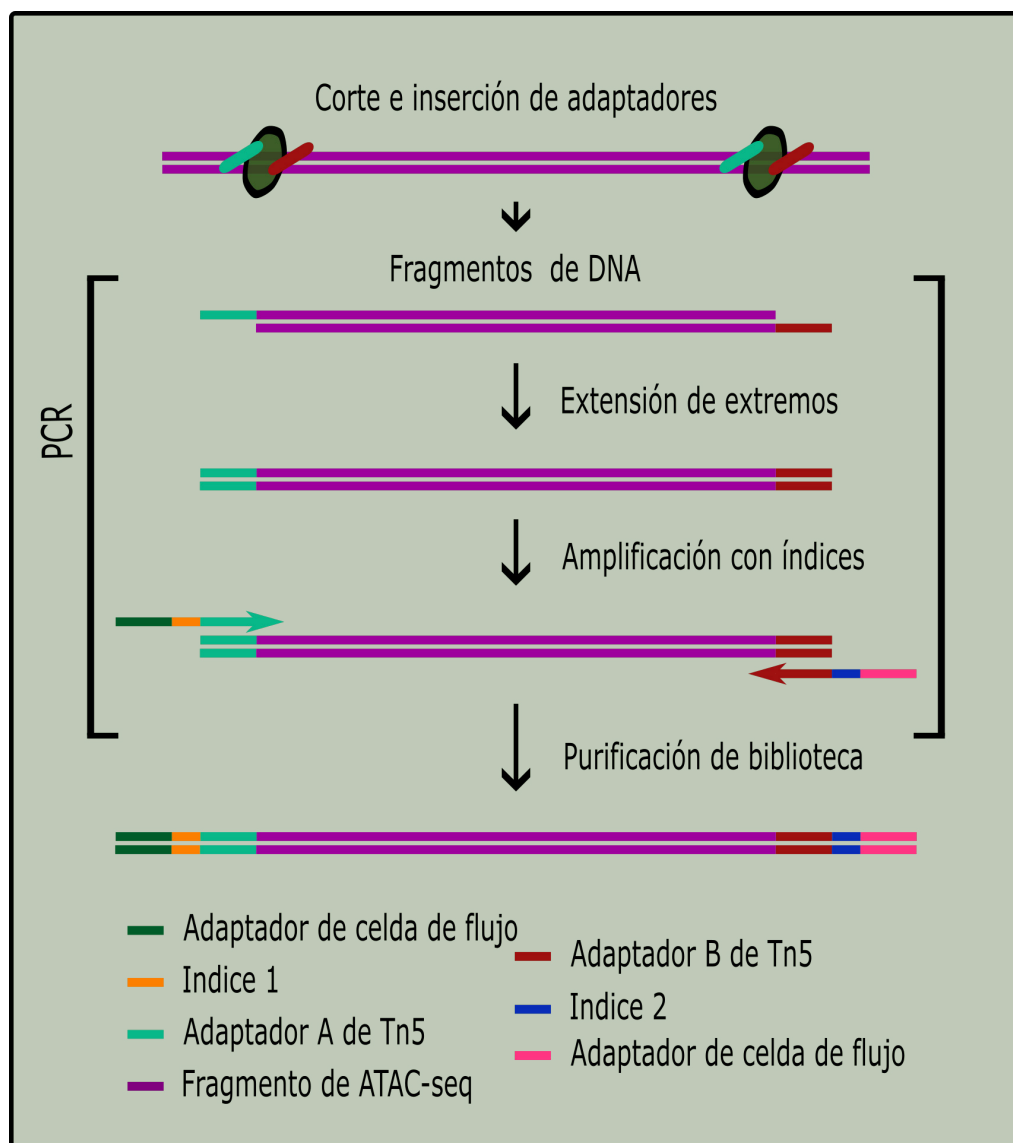


Figura 3. **Amplificación de bibliotecas de ATAC-seq.** Con el genoma fragmentado y con los adaptadores que puso la Tn5, se amplifican las librerías vía PCR completando los extremos y agregando las secuencias de adaptadores e índices para su identificación durante la secuenciación masiva de nueva generación.

Analizando todo el genoma: bioinformática

La secuenciación masiva genera miles de millones de secuencias de ADN que son imposibles de examinar a ojo, además en el ATAC-seq tenemos los fragmentos accesibles de TODO el genoma. Por ello se utilizan herramientas computacionales con capacidad de almacenamiento de varios terabytes para guardar, organizar y analizar estos datos.

Al analizar el ATAC-seq es importante eliminar las secuencias de los adaptadores que tanto nos sirvieron para que no interfieran con los siguientes pasos. Como trabajamos con todo el genoma, debemos alinear cada una de las secuencias, también llamadas lecturas, al genoma del organismo que estudiamos. Los organismos más investigados en el mundo tienen la secuencia de su genoma completo disponible en internet para cualquiera que lo necesite.

Y bien, después de varios pasos bioinfor-

máticos, podemos por fin generar gráficos y figuras para poder ver nuestros datos de una manera amigable. Si nos situamos en la Figura 4, podemos ver cómo las regiones libres de nucleosomas de “Genus”, que fueron fragmentadas por la Tn5, se alinean sobre el promotor, el cuerpo del gen y una región intergénica. Esa información es plasmada en la imagen como “picos de accesibilidad”.

Si comparamos dos muestras con condiciones distintas (ej. alta y baja temperatura), podríamos contrastar la dimensión de los picos en cada una y así saber las diferencias de la cromatina en cada muestra. Por ejemplo, en la imagen podemos ver que *Genus* está más accesible a temperaturas altas, por lo que biológicamente podríamos deducir que es importante para sobrevivir a esa temperatura y por eso está accesible. De hecho, en nuestro laboratorio estamos estudiando, mediante ATAC-seq, cambios en la accesibilidad de la cromatina de

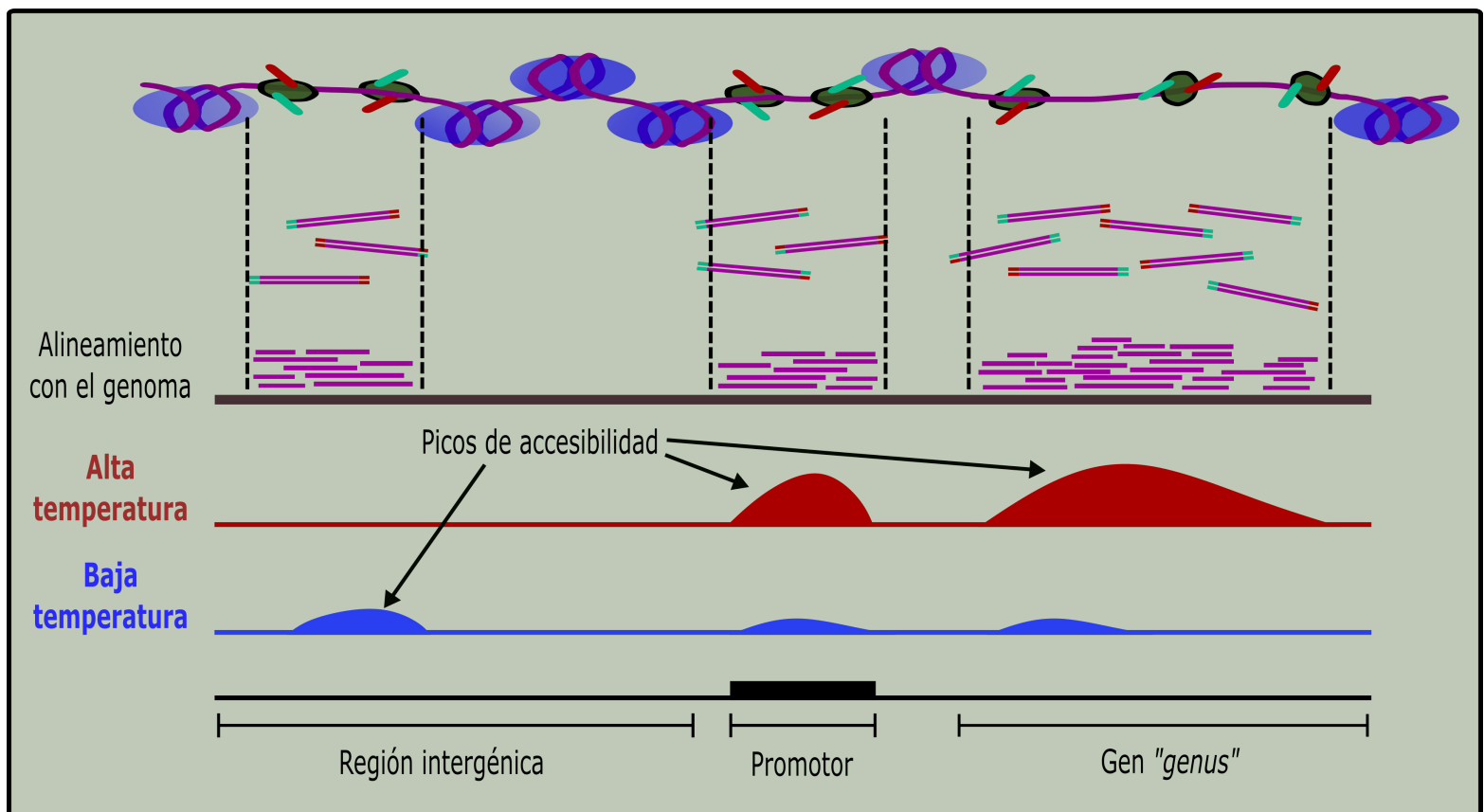


Figura 4. Cambios en accesibilidad: alineamiento de lecturas al genoma y generación de “picos”. Después de la secuenciación de las librerías de ATAC-seq, computacionalmente se alinean los millones de fragmentos secuenciados al genoma de referencia. Esto permite generar picos de accesibilidad y mapearlos a un gen de interés, por ejemplo el hipotético “Genus”, o a regiones intergénicas a lo largo del genoma. Al comprar dos (o más) ATAC-seq, podemos identificar cambios en la cromatina inducidos por distintos tratamientos, condiciones experimentales, entre células diferentes o, incluso, condiciones patológicas.

nemátodos *C. elegans* cuando son expuestos a altas temperaturas. También hemos identificado que algo tan simple como la glucosa, es capaz de inducir cambios permanentes en la accesibilidad de la cromatina de células humanas [5].

Más allá de la accesibilidad, ventajas y desventajas

Así pues, el ATAC-seq es una poderosa herramienta para analizar la accesibilidad de la cromatina de manera global, es decir, abarcando todo el genoma. Además, tiene la ventaja de requerir un muy bajo número de células para su implementación, unos cuantos miles es suficiente, e incluso algunas personas están realizando ATAC-seq a nivel de células individuales para diferenciar poblaciones de células específicas en una sola muestra [6]. Otra de las ventajas del ATAC-seq es que también evalúa regiones intergénicas, donde puede haber secuencias reguladoras distales (*enhancers*), que regulan la potencia de expresión de otros genes [6].

Ahora bien, no siempre mayor accesibilidad de la cromatina significa genes activos, a veces son necesarias otras señales para lograr la expresión de un gen. Por esto, el ATAC-seq se puede complementar con metodologías como el RNA-seq, que permite evaluar todos los ARN mensajeros de una célula, o el ChIP-seq, que evalúa cambios químicos en la cromatina.

No cabe duda que el ATAC-seq es una poderosa herramienta para conocer los cambios epigenéticos, es decir aquellos que alteran la expresión genética, sin alterar la secuencia del ADN. Con el desarrollo de este tipo de tecnologías ahora nos queda pensar, ¿qué preguntas nos gustaría responder con ATAC-seq? ¿Qué propuestas se te ocurren a ti? **iBIO**

Agradecimientos

Al programa de Apoyo a Proyectos de Investigación e Innovación Tecnológica (PAPIIT) de la UNAM, Proyecto: IN217824 y CONAHCYT/SECIHTI (CB 0284867). Y al M. en C. Marlon Adrian Pulido Torres.

Referencias

- [1] Alberts, B., Johnson, A., Lewis, J., Raff, M., Roberts, K., Walter, P. (2022). Chromosomal DNA and Its Packaging in the Chromatin Fiber. En: *Molecular Biology of the Cell*. 4th Edition. New York: Garland Science. Recuperado 27 de enero de 2025, de <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK26834/>
- [2] Alberts, B., Johnson, A., Lewis, J., Raff, M., Roberts, K., Walter, P. (2022). The Molecular Genetic Mechanisms That Create Specialized Cell Types. En: *Molecular Biology of the Cell*. 4th Edition. New York: Garland Science. Recuperado 27 de enero de 2025, de <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK26854/>
- [3] Parisi, N. (2023). Chromatin Structure Research Methods. *MATER METHODS* 2019; 9:2797. [dx.doi.org/10.13070/mm.en.9.2797](https://doi.org/10.13070/mm.en.9.2797)
- [4] Buenrostro, J., Wu, B., Chang, H., Greenleaf, W. (2016). ATAC-seq: A Method for Assaying Chromatin Accessibility Genome-Wide. *Curr Protoc Mol Biol.*; 109: 21.29.1–21.29.9. <https://doi.org/10.1002/0471142727.mb2129s109>
- [5] Wilson-Verdugo, M., Bustos-García, B., Adame-Guerrero, O., Hersch-González, J., Cano-Dominguez, N., Soto-Nava, M., Acosta, C.A., Tusie-Luna, T., Avila-Rios, S., Noriega, L.G., Valdes, V.J. (2024). Reversal of high-glucose-induced transcriptional and epigenetic memories through NRF2 pathway activation. *Life Science Alliance* 7(8), e202302382. <https://doi.org/10.26508/lsa.202302382>
- [6] Baek, S., Lee, E. (2020). Single-cell ATAC sequencing analysis: From data preprocessing to hypothesis generation. *Computational and Structural Biotechnology Journal*; (18):1429-1439. <https://doi.org/10.1016/j.csbj.2020.06.012>
- [7] Alberts, B., Johnson, A., Lewis, J., Raff, M., Roberts, K., Walter, P. (2022). How Genetic Switches Work. En: *Molecular Biology of the Cell*. 4th Edition. New York: Garland Science. Recuperado 27 de enero de 2025, de <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK26872/>
- [8] Yan, F., Powell, D.R., Curtis, D.J, Wong, N.C. (2020). From reads to insight: a hitchhiker's guide to ATAC-seq data analysis. *Genome Biology*; 21:22. <https://doi.org/10.1186/s13059-020-1929-3>
- [9] Grandi, F.C., Modi, H., Kampman, L., Corces, M.R. (2022). Chromatin accessibility profiling by ATAC-seq. *Nature Protocols*. 1518-1552. <https://doi.org/10.1038/s41596-022-00692-9>

Concientifica



El futuro de los materiales antimicrobianos

The future of antimicrobial materials

Ravichandran Manisekaran
Veronica Campos-Ibarra*

Laboratorio de Investigación Interdisciplinaria, Área de nanoestructuras y biomateriales, Escuela Nacional de Estudios Superiores, Unidad León, Universidad Autónoma Nacional de México, León 37689, Guanajuato, México.

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

Resumen

Los adelantos tecnológicos nos permiten explorar nuevas fronteras y crear escenarios de ciudades limpias y sostenibles, sin enfermedades contagiosas, principalmente debido al desarrollo de la nanotecnología y robots descontaminantes, para proporcionar un entorno seguro que beneficie a toda la sociedad. Actualmente, las investigaciones exploran diferentes alternativas para crear superficies antimicrobianas en cerámicas, aleaciones, fibras, materiales híbridos, entre otros, para ser utilizadas en dispositivos médicos y dentales, en espacios hospitalarios, laboratorio, clínicas, aeropuertos y otros lugares donde la salud e higiene son necesarias. Esto es altamente deseable. Sin embargo, las implicaciones éticas y el impacto ambiental también deben ser exploradas.

Palabras clave: Agentes antimicrobianos, dispositivos médicos, nanotecnología.

Summary

Technological advances allow us to explore new frontiers and create scenarios of clean and sustainable cities, without contagious diseases, mainly due to the development of nanotechnology and decontaminating robots to provide a safe environment that benefits the entire society. Currently scientists are exploring different alternatives to create antimicrobial surfaces on to ceramics, alloys, fibers, hybrid materials, etc., which is used in medical and dental devices, in hospital spaces, laboratories, dental clinics and other places where health and hygiene are necessary. This is highly desirable. However, the ethical implications and environmental impact must also be explored.

Keywords: Antimicrobial agents, nanotechnology, medical devices.

Introducción

Antes del descubrimiento de los antibióticos, enfermedades como la meningitis, tuberculosis y enfermedades de vías respiratorias no tenían cura en el 90% de los afectados. Sin embargo, los materiales antimicrobianos nos han acompañado a lo largo de la historia previniendo la propagación de enfermedades.

En la antigüedad, la cultura egipcia utilizaba remedios como la mirra o vendajes impregnados con canela para el tratamiento de heridas y el control del moho durante el embalsamado, respectivamente. Con el tiempo, diferentes culturas integraron metales como el cobre, la plata y el plomo para el tratamiento de superficies y de procesos infecciosos. Las sustancias protectoras ayudaban a combatir los peligros para la salud que en épocas medievales llevaban a la muerte. También, estos materiales se utilizaban por la capacidad biocida de su superficie o para disminuir la formación de biopelículas, lo que reducía el riesgo de infecciones.

Bacterias y ecosistema

Los beneficios del uso de materiales y dis-

positivos biomédicos son ampliamente conocidos, ya sea como agentes de soporte vital o auxiliares en el diagnóstico y en el tratamiento de enfermedades. No obstante, es necesario evaluar los efectos que tienen dentro del organismo, donde pueden originar un cambio en el ecosistema y servir como una superficie para la colonización bacteriana. Los microorganismos asociados a infecciones por el uso de dispositivos médicos agravan los cuadros hospitalarios ya que muchos de ellos presentan resistencia a los antibióticos.

En el 2017, las infecciones asociadas al uso de dispositivos médicos como por ejemplo catéteres, prótesis o apósitos entre otros, fueron responsables de 3.2 millones de casos y de 37,000 muertes solo en la unión europea. Pero ¿Cómo llegan estas bacterias a los dispositivos médicos?

El cuerpo humano cuenta con un rico ecosistema bacteriano que participa en procesos de la salud y enfermedad, ya sea en la piel, boca u otras cavidades. Solo en la cavidad bucal existen más de 700 especies microbianas, principalmente especies de *Streptococcus* y *Actinomyces*, se pueden adherir a las superficies de los biomateriales y ocasionar infecciones o enfermedades inflamatorias y llevar al rechazo de tratamientos que utilizan aparatos intraorales o implantes. Un ejemplo es la estomatitis protésica, enfermedad que ocasiona inflamación, dolor y pérdida de la función en el paciente debido a una prótesis total o parcial removible mal adaptada, deficientes hábitos de higiene e infección micótica. Esta afección está presente en el 67% de los portadores de prótesis totales. De los pacientes afectados, el 18% presentará infección recurrente en los siguientes 6 meses, después del tratamiento y recambio de la prótesis dañada. Se estima que para el 2050 el 14% de los adultos mayores de 60 años se verán afectados por la estomatitis protésica. Estas predicciones mantienen a los investigadores trabajando en estrategias para inhibir el crecimiento microbiano en las superficies para bases de dentadu-

ras, explorando con diferentes nanopartículas como son las de plata, óxido de titanio, cobre, oro y nanodiamantes, entre otros. Incluyendo métodos de incorporación sencillos y rápidos para que el operador dental los pueda manipular.

Además, mantener un entorno descontaminado es crucial en el tratamiento de pacientes hospitalizados o inmunocomprometidos que, por alguna razón, tienen en su organismo dispositivos a largo plazo. En la pasada década el número de patentes registradas con propiedades antimicrobianas a base de plata aumentó de 400 en el 2011 a más de 1400 para el 2017. Al 2024 se puede decir que se ha superado la contaminación en el almacenamiento de alimentos. Mientras que continua la búsqueda de mejoras en productos registrados para el cuidado personal (antisépticos, cepillos de dientes, lentes de contacto, etc.) o de uso médico (vendas, dispositivos vasculares, polímeros para dentaduras, etc.) con **nanopartículas de plata** [1] (Figura 1).

Así, los materiales antimicrobianos a base de nanotecnología, ofrecen una barrera de protección adicional, previniendo enfermedades y manteniendo los

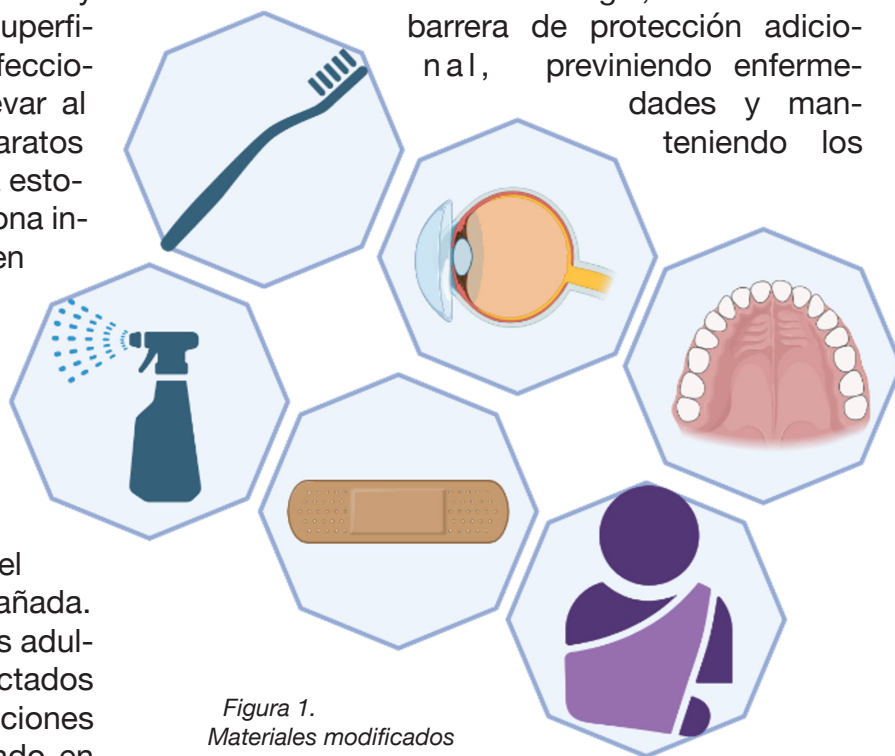


Figura 1.
Materiales modificados
con nanopartículas de plata.
Imagen realizada por los autores en Biorender.

espacios higiénicos. Su uso se ha vuelto cada vez más frecuente en el cuidado de la salud y el bienestar de las personas, pero también es importante cuestionarse sobre el uso indiscriminado de estos materiales en el área de la salud y su impacto en el equilibrio ecológico.

Dispositivos antimicrobianos

En la actualidad, existen más de 2 millones de dispositivos médicos de alta demanda, relacionados con el control de infecciones durante el cuidado de la salud. La nanotecnología es trascendental para el campo biomédico; los nanomateriales se utilizan en implantes dentales y de cadera, prótesis faciales y bucales, catéteres, stents, brackets y en dispositivos de la unidad de cuidados intensivos para el soporte vital. Las tecnologías empleadas para el

desarrollo de dispositivos biomédicos, utilizan la nanotecnología para crear superficies autohigiénicas incorporando agentes antimicrobianos como el cobre, la plata y el zinc (Figura 2).

Los nanomateriales benefician directamente a los pacientes proporcionándoles dispositivos más duraderos y reduciendo los recambios que muchas veces requieren procedimientos incómodos y riesgosos para el usuario, como puede ser el uso de catéteres centrales.

Sin embargo, se recomienda a los profesionales de la salud considerar las siguientes 4 sugerencias para un uso responsable de los nanomateriales y dispositivos antimicrobianos para evitar resistencia microbiana y desechos no deseados al medio ambiente:

1. Tener conocimiento del agente antimicrobiano y su interacción con dispositivos y patógenos con los que entrará en contacto.
2. Valorar el uso selectivo del paciente portador dando preferencia a aquellos que atraviesan por alguna enfermedad inmunosupresora, tratamientos contra el cáncer, enfermedades genéticas o crónico degenerativas como la diabetes e hipertensión arterial.
3. Ampliar su uso cuando existan situaciones de salud mundial como en pandemias o en la presencia de virus emergentes.
4. Realizar protocolos de bioseguridad que comprenda desde la fabricación del dispositivo y su uso hasta un desecho adecuado para que no afecte al medio ambiente.

En el caso de los materiales que cuentan con nanotecnología, es indispensable que el dispositivo se degrade después de su uso y se recupere el agente antimicrobiano, esto se puede lograr con la creación de medidas públicas y gubernamentales, que se implementen en el sector salud, y así mantener el

Nanomateriales antimicrobianos y sus aplicaciones biomédicas

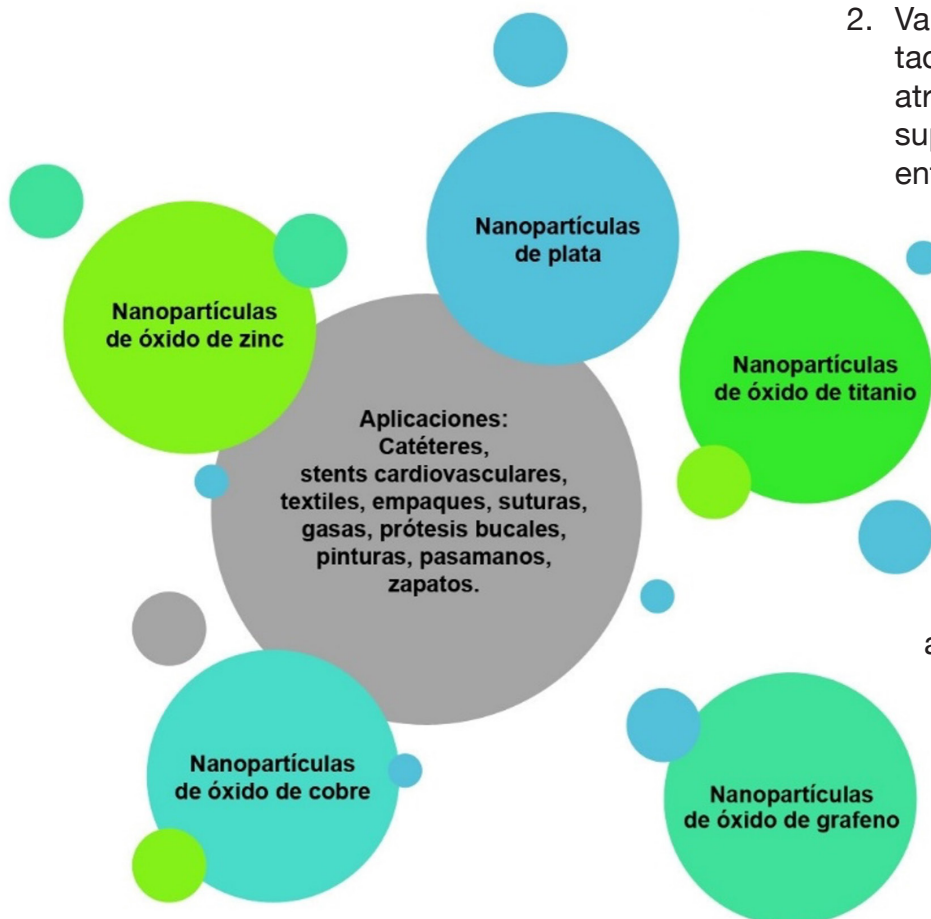


Figura 2. Nanotecnología aplicada en superficies antimicrobianas.

equilibrio bacteriano en la tierra, agua y organismos.

Aplicaciones futuras

El uso de la **nanotecnología** en pinturas y superficies, en sensores para la detección de contaminantes o en drones dispersores de desinfectantes para el control de patógenos ya no es producto de la imaginación. Actualmente los agentes fotocatalíticos brindan una fuente inagotable de iones que inactivan a los virus. Los nuevos materiales a base de carbono limpian las aguas de contaminantes, por lo que las reservas de lagos y ríos pueden llegar a ser inagotables. Así, estamos en camino de que estos materiales impacten en la calidad de vida de las personas y el medio ambiente.

Con el uso de la nanotecnología los dispositivos médicos podrán ser utilizados por más tiempo, sin riesgo de contaminación o formación de biopelículas en su superficie. Los antibióticos se utilizarán con poca frecuencia y disminuirá la resistencia bacteriana. Las superficies autohigiénicas pueden contribuir en la prevención de la diseminación de patógenos causantes de pandemias y epidemias, como la pasada COVID19. Todo esto de forma hipotética pero sustentado por las más de 2,445,517 publicaciones relacionadas con el estudio de superficies antimicrobianas utilizando enzimas, antibióticos, nanopartículas metálicas, entre otros (fuente: resultado global de una búsqueda en Google scholar utilizando las palabras clave antimicrobial surfaces, acceso: 15 de junio de 2024). Por lo tanto, es un campo prometedor para futuras aplicaciones en diversas áreas de la vida, como la biomédica para la prevención de infecciones secundarias.

Implicaciones éticas y desafíos

Los materiales antimicrobianos no son específicos para el 1% de las bacterias virus y hongos que producen enfermedades. Por esto, aunque los nanomateriales son una excelente estrategia para matar a los microorganismos patógenos, también pueden afectar a aquellos que son necesarios, cuando se utilizan en con-

tacto con el organismo o se desechan sin protocolos de bioseguridad.

Plantear un futuro con materiales antimicrobiano no implica eliminar a todos los organismos unicelulares, como las **bacterias**, que han existido en la tierra desde hace millones de años. Los microorganismos son los seres más abundantes sobre la tierra, se estima que se encuentran en una proporción de 3×10^{29} aproximadamente [2], es decir más de 10 mil millones de microorganismos en un gramo de tierra [3]. En nuestro propio cuerpo humano representan hasta el 2% del peso total, es decir, más de lo que pesa el hígado o la materia gris de nuestro cerebro.

Sin embargo, existe un enorme vacío en las pruebas sobre el impacto y toxicidad de los nanomateriales. Por ejemplo, las evaluaciones de toxicidad de un material, en su mayoría se realizan con estudios *in vitro* y con un grupo mínimo de probetas, por lo que no proporcionan un efecto comparable a su uso clínico.

Por otra parte, debido a su tamaño diminuto, las nanopartículas pueden penetrar fácilmente a través de la piel y mucosas, por inhalación o digestión etc., lo que puede conducir a su acumulación en los órganos y provocar efectos letales después de una exposición prolongada y a dosis nocivas para los organismos vivos. Por lo que es importante determinar dosis y tiempo de exposición real de estos materiales para todos los usuarios y personal que se encuentra en contacto con ellos. Además, los investigadores que trabajan con nanomateriales a menudo tienen una mayor exposición directa y pueden presentar efectos tóxicos si no cuentan con las barreras de protección adecuadas.

En el caso de las nanopartículas antimicrobianas, aunque son muy eficaces contra los microorganismos patógenos disminuyendo su crecimiento o erradicándolos por completo, en la práctica pueden activar el sistema inmunitario del organismo y tener efectos secundarios.

En la actualidad, muchos productos cos-

méticos y de higiene personal, entre otros, se desarrollan y venden directamente sin estudios a profundidad, lo que aumenta la exposición de los individuos a los nanomateriales. Una preocupación de los consumidores es la migración de nanopartículas como las de plata y cobre a los alimentos ya que se ha comprobado su presencia en diferentes productos para bebés como biberones, chupones y bolsas para leche materna sin ser parte de su composición original [4]. En el caso del óxido de titanio (TiO_2), su tamaño pequeño predispone a su superficie a ser fotoreactiva, provocando daños oxidativos sobre los microorganismos, pero también produce efectos no deseados en otros organismos como los peces que entran en contacto con el TiO_2 .

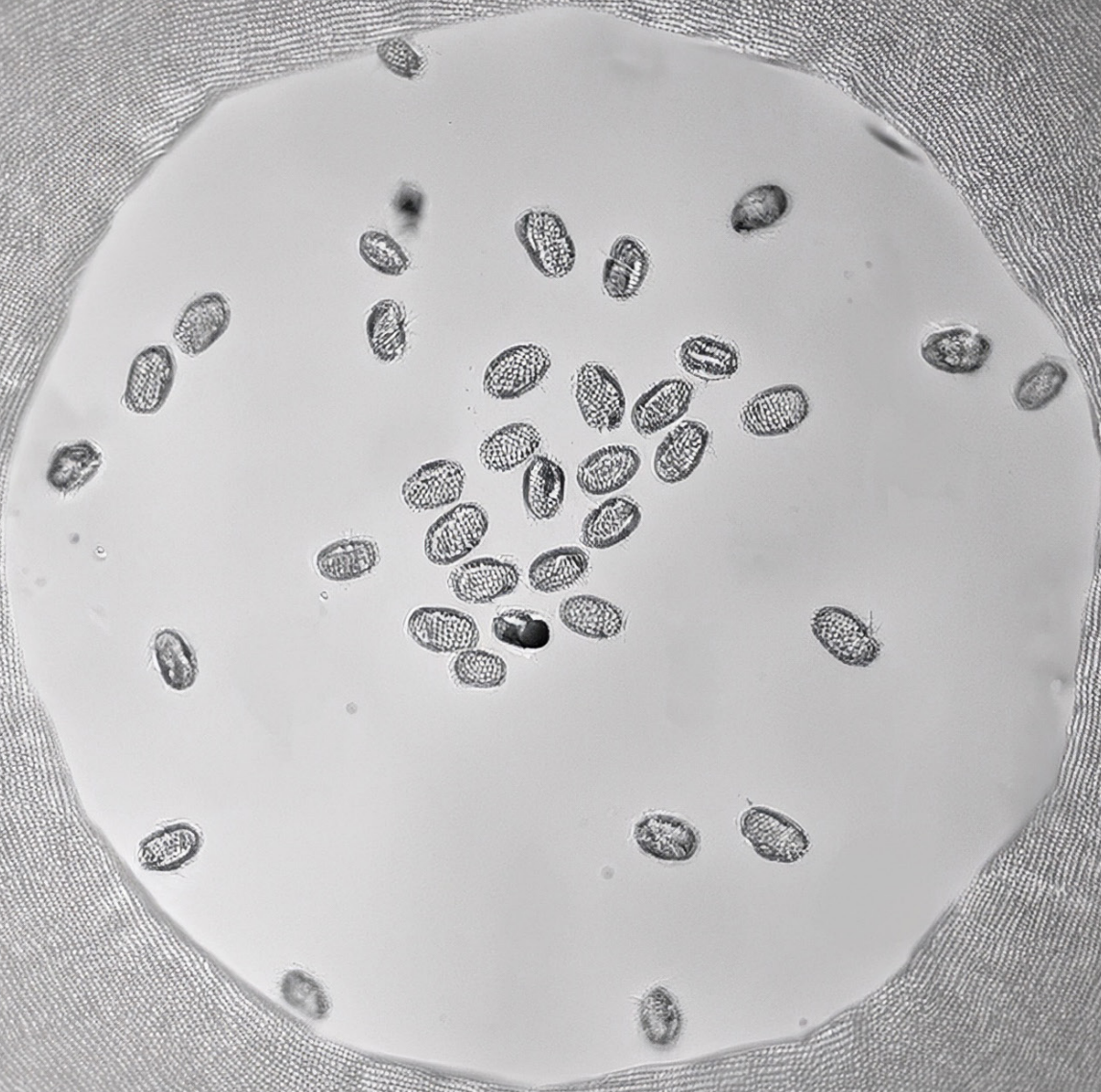
Por lo tanto, es de considerar que el ciclo de vida de un material antimicrobiano elaborado con nanotecnología incluye la producción de nanomateriales, su almacenamiento, uso, desecho y reciclaje, o eliminación al medio ambiente donde los nanomateriales pueden tomar cualquiera de las siguientes vías: 1) transportación, 2) transformación o 3) degradación. Que a su vez implica un impacto al medio ambiente y a los organismos que entran en contacto con ellos [5].

Por ello, antes de aprobar un producto nanotecnológico en el mercado o para uso clínico, los distintos organismos reguladores deben aplicar una estricta normativa. Existen varios laboratorios especializados en nanotoxicología que estudian los efectos a corto y largo plazo de diversos materiales. Por lo tanto, los autores creemos que los gobiernos deberían imponer una normativa y una gobernanza estricta para regular y proteger el uso de nanomateriales y su potencial toxicidad en diferentes niveles de vida. 

Referencias

- [1] Sim, W., Barnard, R. T., Blaskovich, M. A. T., Ziora, Z. M. (2018). Antimicrobial silver in medicinal and consumer applications: A patent review of the past decade (2007–2017). *Antibiotics*, 7(4), 93. <https://doi.org/10.3390/antibiotics7040093>
- [2] Flemming, H. C., Wuertz, S. (2019). Bacteria and archaea on Earth and their abundance in biofilms. *Nat Rev Microbiol* 17, 247–260. <https://doi.org/10.1038/s41579-019-0158-9>
- [3] Berlanga, M., Guerrero, R. (2017). La complejidad de lo simple: la célula bacteriana. *Química Viva* 16(2), 11–19.
- [4] Ding, R., Yang, P., Yang, Y., Yang, Z., Luo, L., Li, H., & Wang, Q. (2018). Characterisation of silver release from nanoparticle-treated baby products. *Food Additives & Contaminants: Part A*, 35(10), 2052–2061. <https://doi.org/10.1080/19440049.2018.1480064>
- [5] Pan, B., Li, S., Peng, H., Ao, C., Wei, Z., Xing, B. (2023). Chapter One - Advances in understanding the processes and cycling of nanoparticles in the terrestrial environment. En Sparks, Donald L. (ed.): *Advances in Agronomy* vol. 182 (pp.1–79). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/bs.agron.2023.06.001>

Concientifica



Hongos patógenos de insectos, nuestros aliados en la producción de alimentos

Insect pathogenic fungi, our allies in food production

Gerardo Suárez-Vergel¹
Paulina Gómez-Flores²
Marcos López-Pérez^{1*}

¹ Departamento de Ciencias Ambientales, Universidad Autónoma Metropolitana Unidad Lerma, Lerma, Estado de México, México.

² Departamento de Biotecnología, Universidad Autónoma Metropolitana Unidad Iztapalapa, Iztapalapa, Ciudad de México, México.

*Autor para la correspondencia:
m.lopez@correo.ler.uam.mx

Resumen

El uso de pesticidas para la producción de alimentos conlleva problemas a la salud humana y contaminación del medio ambiente. En este trabajo se analiza a los hongos entomopatógenos como una alternativa viable para el manejo integral de plagas de insectos y la producción de alimentos libres de pesticidas, y se profundiza en las estrategias para volver más eficientes a estos hongos.

Palabras clave: Hongos entomopatógenos, pesticida, control biológico.

Summary

The use of pesticides for food production brings problems to human health and environmental pollution. This paper analyzes entomopathogenic fungi as a viable alternative for integrated pest management and the production of pesticide-free food, as well as possible strategies to make these fungi more efficient.

Keywords: Entomopathogenic fungi, pesticide, biological control.

La mayoría de nuestros alimentos se producen en campos donde sólo se siembra un tipo de cultivo, a esto se le conoce como monocultivo el cual tiene un gran impacto sobre la flora y fauna de la zona ya que son eliminadas para poder hacer uso de grandes extensiones de suelo, por lo que esta práctica de cultivo representa una fuente abundante y uniforme de alimento para todo organismo capaz de alimentarse de él, cuando el daño que provocan es económicamente importante se les denomina plagas, siendo la de los insectos una de las importantes. El monocultivo es una práctica común en nuestro país, donde de forma constante se utilizan pesticidas químicos y fertilizantes; sin embargo, estos compuestos pueden ser tóxicos para los humanos y pueden permanecer por largos periodos de tiempo en el suelo, en el agua e incluso en los alimentos, por lo que no es de extrañar encontrarnos con residuos de pesticidas en nuestras frutas, verduras e incluso flores.

Pareciera que una solución sencilla y rápida podría ser dejar de usar pesticidas; sin embargo, estos protegen a los cultivos de plagas de insectos, bacterias o de hongos, y de esta manera los cultivos pueden ser más productivos, además estas técnicas permiten reutilizar estos terrenos y resembrar cosechas más de una vez al año. Esto es de gran relevancia para países en los que la agricultura es una actividad económica importante como el nuestro, México. Entonces, ¿existe alguna alternativa al uso de pesticidas químicos?, la respuesta es sí y se llama Control Biológico, que de forma sencilla puede entenderse como el uso de los enemigos naturales de las plagas para disminuir su población sin dañar a otros organismos vivos ni al medio ambiente. Por ejemplo, una plaga del jitomate es la mosca blanca (*Bemisia tabaci*), y algunos de los enemigos naturales de este insecto son los hongos, también llamados “hongos entomopatógenos”; es decir, hongos patógenos de insectos (Figura 1).



Figura 1. Ejemplo de insectos (larvas de *Tenebrio molitor*) infectados con un hongo entomopatógeno (*Beauveria bassiana*).

Existen diferentes tipos de hongos entomopatógenos y los podemos identificar a tra-

vés de características morfológicas, fisiológicas y genéticas que permiten definir su género. Los principales géneros de hongos entomopatógenos utilizados y comercializados son *Beauveria*, *Metarhizium* y *Cordyceps*. Estos hongos son capaces de infectar a una amplia variedad de insectos, por ejemplo, a la langosta (*Schistocerca gregaria*), al gusano cogollero (*Spodoptera frugiperda*) y a la palomilla dorso diamante (*Plutella xylostella*), respectivamente. Estos insectos son plagas de diferentes cultivos (Figura 2) y pueden generar pérdidas económicas importantes. Considerando el impacto global sobre la agricultura, apicultura, horticultura, acuicultura e incluso el turismo, estos insectos invasores pueden alcanzar un daño de 70 mil millones de dólares anuales a nivel mundial [1], razón suficiente para buscar herramientas que controlen estas plagas.

En este sentido, los hongos entomopatógenos parecen una herramienta ideal para combatir plagas de insectos, pero ¿por qué no son tan conocidos o utilizados en comparación con los pesticidas químicos? La respuesta a esta pregunta podemos asociarla a la falta de conocimiento entre los agricultores sobre el uso de estas herramientas, además de que, bajo ciertas condiciones, los hongos entomopatógenos tienen baja efectividad. Este último punto es muy importante ya que, generalmente en campo se utilizan unidades infectivas de estos hongos, llamadas conidios (Figura 3), los cuales podrían ser lo homólogo a una semilla en el caso de las plantas, y están vivos.

El uso de estos conidios en campo se enfrenta a varios desafíos como factores ambientales adversos que pueden matarlos y con ello disminuir la capacidad de infectar y controlar a una plaga de insectos. Algunos de estos factores pueden incluir una alta radiación ultravioleta proveniente del sol, las bajas o altas temperaturas y la baja disponibilidad de agua. Además, una vez que infectan al insecto, el hongo deberá enfrentarse a su sistema de defensa. Por lo anterior, los científicos alrededor del mundo buscan y desarrollan estrategias para incrementar la producción de conidios y/o mejorar su cali-

Palomilla dorso diamante



- Brócoli
- Coliflor
- Col
- Rábano
- Nabo
- Berro

Gusano cogollero



- Maíz
- Sorgo
- Cacahuete
- Caña de azúcar
- Arroz
- Frijol
- Algodón
- Soya
- Cebolla
- Alfalfa
- Tomate
- Papa

Langosta



- Plátano
- Maíz
- Cebada
- Sorgo
- Caña de azúcar
- Arroz
- Algodón

Figura 2. Principales cultivos afectados por las plagas de palomilla dorso diamante, gusano cogollero y langosta.

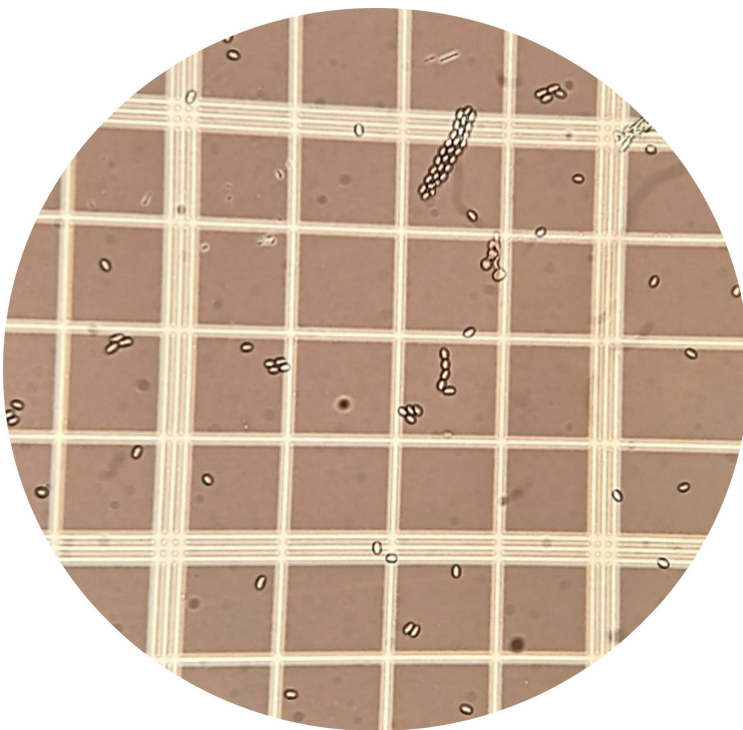


Figura 3. Conidios del hongo *Cordyceps fumosorosea* vistos al microscopio.

dad; es decir, su capacidad de resistencia a los factores ambientales antes mencionados. Por ejemplo, que los conidios resistan temperaturas extremas, que sean más resistentes a la radiación ultravioleta o a la baja disponibilidad de agua. Dos de estas estrategias están basadas en el uso de diferentes medios de crecimiento para incrementar la producción de conidios o exponer a los hongos a diferentes tipos de estrés ambiental, para que los conidios tengan mejor calidad y mayor resistencia. Esta estrategia se conoce como “protección cruzada” [2].

Adicionalmente, podríamos decir que esta última estrategia responde al dicho popular “lo que no te mata te hace más fuerte”. Un ejemplo de esto se refiere a cuando nos ejercitamos, ya que al levantar una mancuerna en repetidas ocasiones nuestros músculos se estresan y se dañan, cuando estos se regeneran ganamos masa muscular y nos volvemos más fuertes, adicionalmente seremos más rápidos en nuestro entrenamiento y/o tendremos mayor resis-

tencia; es decir, la ganancia de músculos por el estrés muscular condujo a una mejora al estrés.

En el caso de los hongos entomopatógenos, se ha demostrado que, al estresar a algunos de estos organismos durante su crecimiento con una mayor cantidad de oxígeno, afecta a su adecuación y producen conidios de mayor calidad que los conidios de aquellos hongos que no fueron estresados [3].

Con estos ejemplos, podríamos pensar que exponer a condiciones de estrés a los seres vivos, mejora su adaptación, pero esta mejora dependerá de cuál organismo es estresado y la intensidad de estrés que se aplica. Por ejemplo, el nivel estrés que obtendrá un fisicoculturista y un niño de 10 años será diferente si ambos entrenan por 10 min con una mancuerna de 20 kg, y por ende la respuesta adaptativa frente a este estrés también será diferente. Del mismo modo, la intensidad del nivel de estrés y la respuesta puede variar de un microorganismo a otro, ya que esta respuesta puede depender del tipo y cantidad de moléculas que produzcan para su adaptación, por ejemplo, algunas de estas moléculas son antioxidantes.

El calor y la luz UV propician la producción de moléculas oxidantes, por lo que conidios de hongos entomopatógenos que poseen una mayor cantidad de moléculas antioxidantes pueden tener una mayor calidad incluso más infectivos, ya que, algunos de los sistemas de defensa de los insectos se basan en la producción de moléculas oxidantes para atacar al hongo que los infecta. [4]

Algunas de las moléculas antioxidantes que producen los hongos son de gran interés científico y comercial, por ejemplo, recientemente se encontró que los hongos *Cordyceps javanica* y *Cordyceps fumosorosea* producen un pigmento llamado melanina [5], ¡el mismo que los seres humanos producimos en nuestra piel y cabello!

Este pigmento funciona como un fotoprotector y antioxidante, debido a esto, se ha

buscado este pigmento en hongos entomopatógenos, incluso se han generado mutantes de hongos para que produzcan este pigmento, y efectivamente los conidios de estas mutantes productoras de melanina son más resistentes a agentes oxidantes y resultaron ser más efectivos contra plagas. Sin embargo, el uso de microorganismos genéticamente modificados en nuestro país es altamente regulada, por lo que resulta más atractiva la estrategia de la mejora de la calidad de los hongos entomopatógenos a través de su exposición al estrés, ya que esto evita la modificación genética.

Otra importante ventaja del uso de hongos entomopatógenos en el cultivo es que algunos de ellos son capaces de asociarse a las plantas y generar un escenario de beneficio mutuo, fomentando un mayor crecimiento de las raíces, y con ello una mayor absorción de nutrientes y agua, lo que conduce a más biomasa vegetal y mayores ganancias económicas.

Sin lugar a duda, el uso de hongos entomopatógenos para el control de plagas de insectos es una herramienta importante para la producción de alimentos libres de químicos perjudiciales para la salud humana y el medio ambiente, además es una herramienta que puede mejorar la producción de los cultivos a través de la simbiosis planta-hongo; sin embargo, debemos ser conscientes del impacto que tiene nuestra huella humana. Se han talado miles de hectáreas de bosque para sembrar monocultivos para satisfacer las necesidades alimentarias de miles de millones de personas, como tú y como yo. Para que el monocultivo exista se elimina casi por completo la flora y fauna endémica de la zona. Por otro lado, el monocultivo representa una fuente uniforme y abundante de un solo tipo de alimento, por lo que cualquier organismo capaz de adaptarse se puede alimentar de él y proliferar como una plaga. Tomando en cuenta lo anterior, para producir alimentos más sanos, debemos considerar no sólo alternativas amigables con el medio ambiente para controlar “plagas”, también debemos considerar nuestro estilo de vida,

nuestro consumo de alimentos, la distribución de estos, y los métodos de cultivo, entre otros. Finalmente, aún tenemos un camino muy largo por recorrer para que el uso de hongos entomopatógenos sea más generalizado y podamos obtener alimentos más sanos, por eso la labor de la difusión de esta temática abunda en hacer conciencia y en extender en la población el uso de estas técnicas. La lectura de este documento sin duda nos acerca más a este objetivo. **iBIO**

Agradecimientos

Se agradece al Consejo Mexiquense de Ciencia y Tecnología por el apoyo otorgado para la realización de este trabajo (Folio: CAT2024-0043).

Referencias

- [1] Bradshaw, C.J.A., Leroy, B., Bellard, C., Roiz, D., Albert, C., Fournier, A., Barbet-Massin, M., Salles, J.M., Simard, F., Courchamp, F., 2016. Massive yet grossly underestimated global costs of invasive insects. *Nat. Commun.* 2016 71 7, 1–8. <https://doi.org/10.1038/ncomms12986>
- [2] Rangel, D.E.N., 2024. How *Metarhizium robertsii*'s mycelial consciousness gets its conidia Zen-ready for stress. *Adv. Appl. Microbiol.* 129, 1–33. <https://doi.org/10.1016/BS.AAMBS.2024.07.002>
- [3] Miranda-Hernández, F., Saucedo-Castañeda, G., Alatorre-Rosas, R. and Loera, O. (2014), Oxygen-rich culture conditions enhance the conidial infectivity and the quality of two strains of *Isaria fumosorosea* for potentially improved biocontrol processes. *Pest. Manag. Sci.*, 70: 661–666. <https://doi.org/10.1002/ps.3605>
- [4] Smith, D.F.Q., Dragotakes, Q., Kulkarni, M., Hardwick, J.M., Casadevall, A., 2022. Melanization is an important antifungal defense mechanism in *Galleria mellonella* hosts. *bioRxiv* 2022.04.02.486843. <https://doi.org/10.1101/2022.04.02.486843>
- [5] Suárez-Vergel, G., Figueroa-Martínez, F., Garza-López, P. M., García-Ortiz, N., & Loera, O. (2021). DOPA-melanin, component and tolerance factor to heat and UV-B radiation in the conidia of two species of *Cordyceps*. *Biocontrol Science and Technology*, 32(4), 437–454. <https://doi.org/10.1080/09583157.2021.2016626>

Bioemprendimientos



El papel del financiamiento gubernamental para incentivar la biotecnología en las empresas

The role of government funding in incentivizing biotechnology in businesses

Lilia Itzel Álvarez-León

Universidad Autónoma Metropolitana Unidad
Xochimilco, Ciudad de México, México.

*Autor para la correspondencia:
alvarezleonliliaitzel@gmail.com

Resumen

El financiamiento gubernamental desempeña un papel clave en la promoción de la I+D+i en empresas, especialmente en biotecnología. Mientras que en México el sector privado invierte solo el 20% en estas actividades, programas como el PEI han incentivado la innovación. El PEI muestra que las empresas pequeñas destacan en proyectos biotecnológicos, particularmente en sectores como la química y la agroindustria. Además del financiamiento, políticas comerciales, propiedad intelectual y clústeres industriales también favorecen la I+D+i. El apoyo gubernamental sigue siendo crucial para el desarrollo biotecnológico, impulsando avances en salud, producción y sostenibilidad.

Palabras clave: Financiamiento gubernamental para la I+D, empresas biotecnológicas, programas gubernamentales para la I+D.

Summary

Government funding plays a key role in promoting R&D&I in businesses, especially in biotechnology. While in Mexico the private sector invests only 20% in these activities, programs such as PEI have incentivized innovation. The PEI shows that small companies stand out in biotechnology projects, particularly in sectors like chemistry and agribusiness. In addition to funding, trade policies, intellectual property, and industrial clusters also support R&D&I. Government support remains crucial for biotechnological development, driving advances in health, production, and sustainability.

Keywords: Government funding for R&D, biotechnological businesses, government programs for R&D.

[Revista de divulgación científica iBIO](#)

En nuestro país es común pensar que la I+D+i (investigación, el desarrollo y la innovación) se realizan únicamente en las universidades o en los centros públicos de investigación. No obstante, en países desarrollados, alrededor del 80% de la inversión en I+D+i es realizada por el sector privado, mayormente empresas; mientras el 20% restante lo realiza el sector público, es decir, universidades e instituciones públicas de investigación. En México, ocurre lo opuesto, solamente el 20% de la inversión en I+D es realizado por el sector privado como se muestra en la Figura 1.

No obstante, en los países que hoy son potencias tecnológicas, no siempre fue así. En los primeros estadios hacia su desarrollo, el gobierno fungió un papel importante como direccionador y facilitador de las actividades de I+D+i, sobre todo promoviendo aquellas con incidencia en los sectores productivos. Con el tiempo, las empresas fueron obteniendo sus propias capacidades y recursos para realizar I+D+i por sí mismas [2], aumentando en el tiempo su participación en estas actividades (Figura 1).

Las empresas productivas juegan un papel importante para la economía y, en particu-

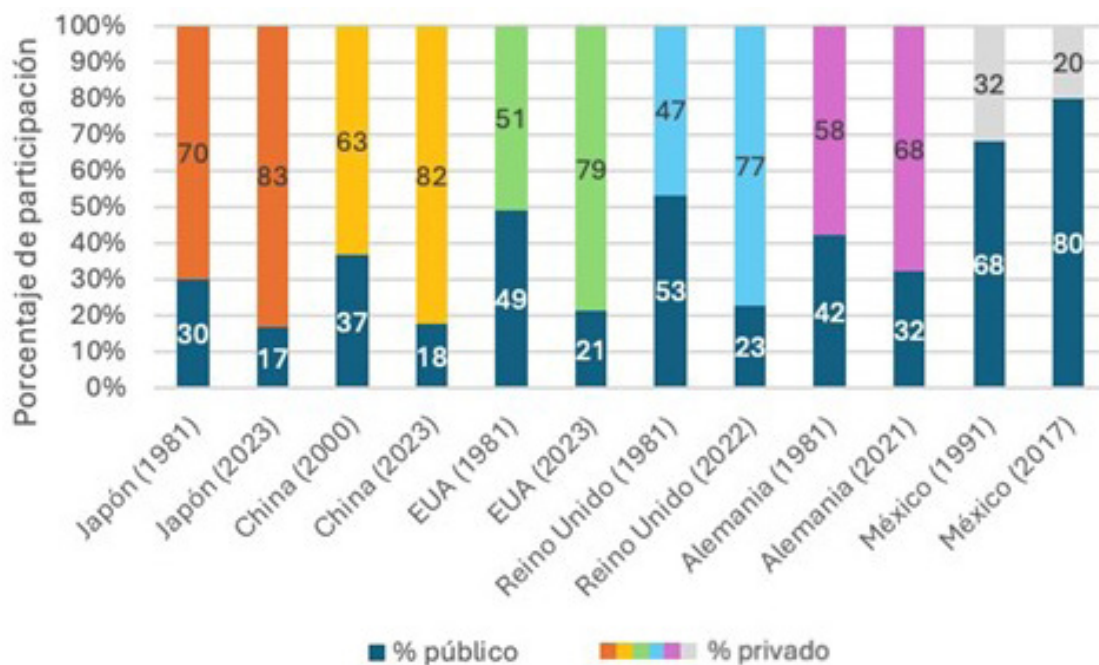


Figura 1. Gastos en I+D del sector público y privado por país. Elaboración propia con datos de la OCDE [1]. Porcentaje de participación anual basado en gasto expresado en dólares a precios constantes (es decir, quitando el efecto de la inflación). EUA se refiere a los Estados Unidos Americanos.

lar la investigación y el desarrollo tecnológico permiten detonar lo que se ha llamado “innovación”, nombre que se le ha dado al proceso por el cual es generado “un producto o proceso nuevo o mejorado [...] que se ha puesto a disposición de usuarios potenciales o se ha puesto en uso” [3]. La innovación busca que las investigaciones científicas y los desarrollos tecnológicos no solo se queden en artículos académicos o patentes, sino que realmente incidan en la economía y en el plano social, comercializando mejores productos para los consumidores o haciendo de los procesos productivos más eficientes y sostenibles.

Pese a estas bondades, las empresas enfrentan desafíos al querer incursionar en actividades de I+D+i. En primer lugar, porque las empresas buscan un beneficio económico de dichas actividades, pero en muchos casos la investigación científica y el desarrollo tecnológico se trata de actividades de exploración por ensayo y error, cuyos retornos usualmente viene en el largo plazo. En segundo lugar, otro de los desafíos está relacionado con la falta de recursos y capacidades especiales para dichas actividades como pueda ser la escasez de re-

ursos humanos especializados en I+D+i. Este escenario orilla a la mayoría de las empresas a no invertir en estas actividades, por lo que el apoyo del gobierno es primordial.

Una de las formas más ampliamente utilizadas por los gobiernos para fomentar la I+D+i en las empresas es el financiamiento, ya sea mediante subsidios, vía exenciones fiscales o mediante créditos módicos. En México, el EFIDT (por sus siglas Estímulo Fiscal a la Investigación y Desarrollo de Tecnología) es un programa establecido desde el 2016 entre el CONACYT y la SHCP por el cual las empresas reciben una reducción del ISR (impuesto sobre la renta) equivalente 30% de sus gastos en I+D+i [4].

Por su parte, la banca pública NAFIN ha sido desde 1934 una de las instituciones encargadas de promover la movilización de los recursos financieros hacia las actividades productivas, pero tiene también fondos de inversión y créditos con bajas tasas de interés dirigidos a proyectos de innovación, de alto valor agregado y/o empresas de base tecnológica mediante el “Fondo de Capital Emprendedor” de acuerdo

con los informes anuales de la institución [5].

El Programa de Estímulos a la Innovación (PEI) fungió del 2009 al 2018 como uno de los instrumentos del entonces CONACYT, para incentivar la inversión de las empresas en actividades y proyectos relacionados con la investigación, desarrollo tecnológico e innovación a través del otorgamiento de estímulos complementarios. Desde micro hasta grandes empresas recibieron un subsidio de hasta un 50% del costo total de los proyectos en I+D+i, siempre que la empresa aportara el porcentaje adicional. Incluso, en aquellos casos donde las empresas se vincularan con centros públicos de investigación, estos últimos podían recibir de igual forma financiamiento [6].

El Sistema de Datos Abierto provee una base de datos con información del PEI [7] y un análisis de estadística descriptiva arrojó observaciones importantes sobre el impacto de la biotecnología en la I+D+i de las empresas. Los datos de las empresas beneficiadas muestran que existe un grupo de empresas nacionales interesadas y capaces de realizar actividades de investigación científica y desarrollo tecnológico en biotecnología.

A lo largo de 10 años, del 2009 al 2018, el PEI otorgó financiamiento a un total de 6472 proyectos en empresas, de los cuales 351 proyectos estuvieron relacionados con la biotecnología, ocupando la séptima posición entre los proyectos más beneficiados solo después de los proyectos relacionados con las tecnologías de información y comunicación (TICs), con la agroindustria, con alimentos, con química, con el sector automotriz y con maquinaria industrial como se observa en la Figura 2. Lo anterior indica que hay empresas que están apostando por innovar en biotecnología y que requieren financiamiento para llevar a cabo sus proyectos.

Solemos pensar que son las grandes empresas las que realizan actividades de investigación, desarrollo tecnológico e innovación en biotecnología, no obstante, los datos arrojan que son las empresas pequeñas, es decir, aquellas con entre 11 y 50 trabajadores, las que mayormente realizan proyectos biotecnológicos en México presentando el 44% de los proyectos relacionados con biotecnología como se muestra en la Figura 3.

Particularmente, fueron las empresas que se dedican a los servicios profesionales, científicos y técnicos, así como las empresas de

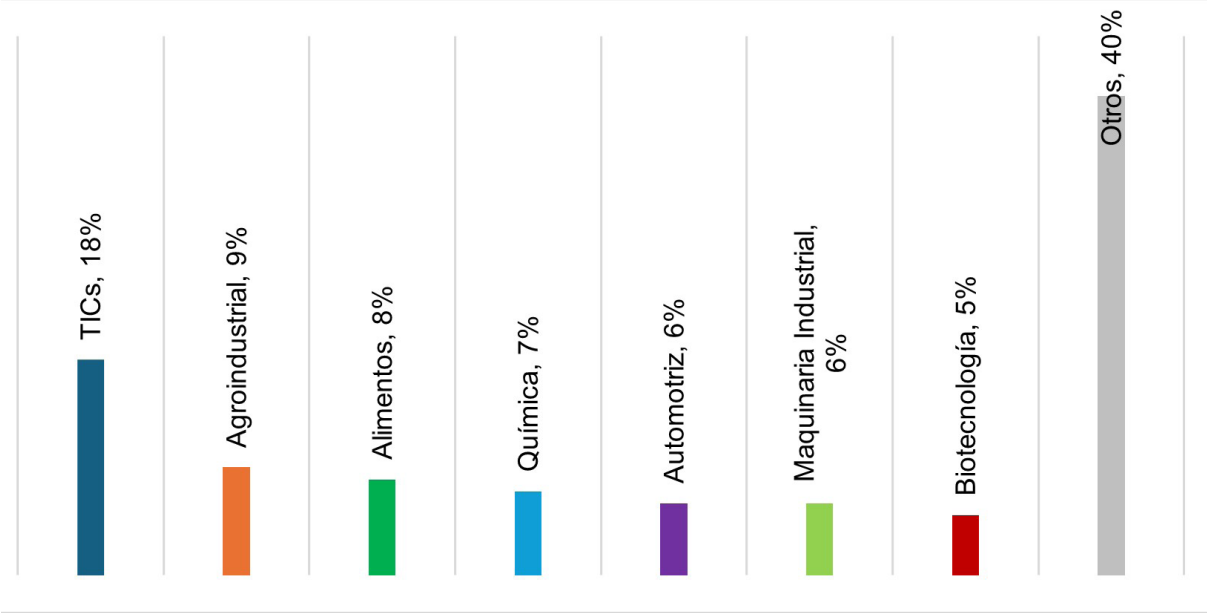


Figura 2. Proyectos beneficiados por el PEI por área industrial. Elaboración propia con base en los datos proporcionados por el Sistema de Datos Abiertos. Los datos corresponden al periodo 2009-2018.

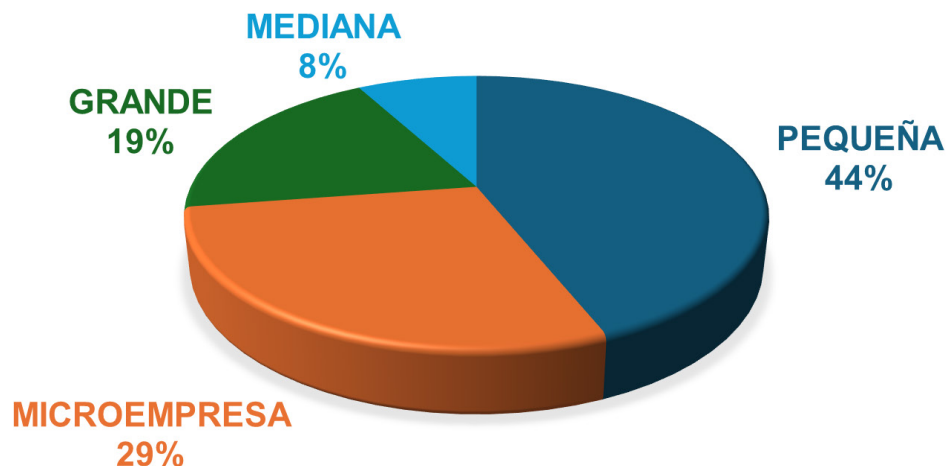


Figura 3. Tamaño de las empresas que realizaron proyectos en biotecnología. Elaboración propia con base en los datos proporcionados por el Sistema de Datos Abiertos. Los datos corresponden al periodo 2009-2018.

la industria química, la industria alimentaria y aquellas con actividades agropecuarias las que realizan el 80% de los proyectos en biotecnología. Esto señala que las empresas de estos sectores productivos muestran ser las más capaces para acometer proyectos de índole biotecnológico en nuestro país.

Aunado a lo anterior, los datos arrojan que los proyectos, vinculados con biotecnología, mayormente beneficiados se ubicaron en Jalisco y la CDMX, lo cual señala que son lugares que proveen un contexto favorecedor para este tipo de proyectos, como puedan ser recursos humanos especializados e infraestructura y redes que permiten el intercambio y aprovechamiento del conocimiento en biotecnología.

Fomentar la colaboración entre el sector privado y público también fue uno de los objetivos del PEI. De hecho, el 89% de los proyectos biotecnológicos beneficiados se vincularon con al menos un centro de investigación, donde el CIATEJ, el CINVESTAV (incluidas las unidades de Irapuato y CDMX), así como la UNAM (particularmente el Instituto de Investigaciones biomédicas, el IBT y la Facultad de Química), el ITESM, el CIAD, así como la UAQ, la UDG y la Autónoma de Nuevo León destacan como los centros de investigación con más vinculaciones con el sector productivo. Lo anterior señala que

la colaboración público-privada para la realización de proyectos biotecnológicos ha sido fundamental y que, hasta ahora, los centros de investigación y universidades siguen siendo una fuente de capacidades y recursos importante en biotecnología.

El financiamiento de los proyectos de I+D+i, no es la única vía por la cual los gobiernos pueden incentivar las actividades de I+D+i en las empresas. Las políticas comerciales y las de protección a la propiedad intelectual, así como las normas y estándares que aplican a cada sector pueden fungir como mecanismos incentivadores o disuasores. Los derechos de propiedad intelectual (PI), por ejemplo, permiten a las empresas tener la certeza de que los productos derivados de sus esfuerzos en I+D+i y adecuadamente protegidos por alguna figura en materia de PI, no serán aprovechados y copiados por otros e incluso brindan la posibilidad de licenciar los derechos de PI a terceros y recibir regalías. La reducción o eliminación de aranceles a insumos y equipos importados para la I+D+i, puede reducir los costos que las empresas enfrentan al incursionar en este tipo de proyectos. Incluso la generación de clústeres industriales, congresos y eventos que permitan la generación de vínculos con investigadores, inversionistas, consumidores u otras empresas, puede fomentar la incursión

de las empresas en actividades de I+D+i .

Es primordial que el gobierno siga apoyando a la I+D+i que se realiza en las empresas, pues estas son base fundamental para el crecimiento económico y desarrollo social en cuanto estas pueden generar nuevos empleos, particularmente trabajos especializados donde los jóvenes investigadores puedan ejercer sus capacidades. Por otro lado, la I+D+i permite a las empresas mantener a la vanguardia para competir con otras empresas incluso en el mercado internacional, así como les permite crecer al obtener nuevos productos y así expandir sus líneas de producción. En particular la biotecnología resulta ser un campo promisorio debido a las técnicas para la edición genética y los cultivos celulares, abriendo posibilidades para la generación de nuevos tratamientos y diagnósticos para la salud humana, animal y ambiental, así como de nuevos y mejores productos y procesos de producción más eficientes y sustentables. Así como la sustitución de la insulina extraída de cerdos por la producida por bacterias modificadas genéticamente fue revolucionario permitiendo llevar dicho producto a muchas más personas gracias a un mayor control para su producción y la reducción de costos, de igual forma, hoy en día, se abren oportunidades para las empresas en el campo biotecnológico, sin embargo, el apoyo gubernamental es primordial. Todos los países que están a la vanguardia tecnológica empezaron con un gran impulso de parte del gobierno y una labor proactiva del sector productivo hasta llegar a ser potencias en el quehacer científico y tecnológico. **iBIO**

Referencias

[1] OCDE. (2024). *OCDE Data Explorer: Gross domestic expenditure on R&D by sector of performance and source of funds*. Disponible desde: [https://data-explorer.oecd.org/vis?lc=en&pg=0&snb=19&fs\[0\]=Topic%-2C1%7CScience%252C%20technology%20and%20innovation%23INT%23%7CResearch%20and%20development%20%28R%26D%29%23INT_RD%23&f-c=Reference%20area&bp=true&df\[ds\]=dsDisseminate-](https://data-explorer.oecd.org/vis?lc=en&pg=0&snb=19&fs[0]=Topic%-2C1%7CScience%252C%20technology%20and%20innovation%23INT%23%7CResearch%20and%20development%20%28R%26D%29%23INT_RD%23&f-c=Reference%20area&bp=true&df[ds]=dsDisseminate-)

[FinalDMZ&df\[id\]=DSD_RDS_GERD%40DF_GERD_SOF&df\[ag\]=OECD.STI.STP&df\[vs\]=1.0&dq=MEX%2BGBR%2BUSA%-2BKOR%2BJPN%2BDEU%2BCHN.A..T.HES%2BNP%2BGOV%2BBES.....USD_PPP.Q&pd=1981%-2C2023&to\[TIME_PERIOD\]=falseds](https://data-explorer.oecd.org/vis?lc=en&pg=0&snb=19&fs[0]=Topic%-2C1%7CScience%252C%20technology%20and%20innovation%23INT%23%7CResearch%20and%20development%20%28R%26D%29%23INT_RD%23&f-c=Reference%20area&bp=true&df[ds]=dsDisseminate-FinalDMZ&df[id]=DSD_RDS_GERD%40DF_GERD_SOF&df[ag]=OECD.STI.STP&df[vs]=1.0&dq=MEX%2BGBR%2BUSA%-2BKOR%2BJPN%2BDEU%2BCHN.A..T.HES%2BNP%2BGOV%2BBES.....USD_PPP.Q&pd=1981%-2C2023&to[TIME_PERIOD]=falseds)

[2] Park, T., & Kim, J. (2022). An exploratory study on innovation policy in eight Asian countries. *Journal of Science and Policy Management*, 273-303. <https://doi.org/10.1108/JSTPM-03-2021-0036>

[3] OECD/Eurostat. (2018). *Oslo Manual 2018: Guidelines for Collecting, Reporting and Using Data on Innovation*. Luxemburgo: OECD publishing.

[4] Cámara de Diputados del H. Congreso de la Unión. (2021). *Ley de Impuesto Sobre La Renta*. Disponible desde: https://portalhcd.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/PortalWeb/Leyes/Vigentes/PDF/LISR_230421.pdf. Consultado: 23 de Abril, 2024.

[5] NAFIN. (2024). *Informes anuales 2013-2023*. Disponible desde: https://www.nafin.com/portalnf/content/nafin-en-cifras/informes_anuales.html Consultado: 10 de julio, 2024.

[6] CONAHCYT. (2023). *Programa de estímulos a la Innovación*. Disponible desde: <https://conahcyt.mx/conahcyt/areas-del-conahcyt/uasr/desarrollo-regional/fondos/programa-de-estimulos-a-la-innovacion/>. Consultado: 30 de junio, 2024.

[7] Gobierno de México. (2024). *Datos Abiertos: Programa de Estímulos a la innovación*. Disponible desde: <https://www.datos.gob.mx/busca/dataset/programa-de-estimulos-a-la-innovacion-pei>. Consultado: 30 de febrero, 2025.

Publica con nosotros

¿Qué artículos se reciben?

Se aceptarán trabajos escritos en español o inglés cuyo tema central sean la biotecnología o los bioprocesos. Se publican únicamente artículos originales y de revisión, siempre y cuando su objetivo sea la divulgación. Los trabajos deberán estar escritos con lenguaje sencillo, siendo el público objetivo estudiantes de bachillerato, licenciatura y posgrado.

¿Quién puede escribir?

Se reciben colaboraciones de técnicos, investigadores, administrativos, alumnos, representantes de empresas de base científica, divulgadores y periodistas científicos de cualquier institución nacional o internacional.

¿Qué debe contener tu manuscrito?

1. **Carta de presentación**
 - i. **Título del artículo en español e inglés** (Máximo 12 palabras).
 - ii. **Autor(es)**: Nombres y apellidos de cada autor acompañados de su afiliación institucional. Máximo se aceptan 3 autores para secciones largas, y dos para secciones cortas. Incluir el correo electrónico del autor de correspondencia.
 - iii. **Resumen en español e inglés**: Máximo 100 palabras cada uno.
 - iv. **Palabras clave en español e inglés** (3 palabras clave que describan el contenido del manuscrito).
2. **Carta de originalidad**
3. **Artículo en formato Word**
 - i. **Título del artículo en español e inglés** (Máximo 12 palabras).
 - ii. **Resumen en español e inglés**: Máximo 100 palabras cada uno.
 - iii. **Palabras clave en español e inglés** (3 palabras clave que describan el contenido del manuscrito).
 - iv. **Texto**: Mínimo 9,000 y máximo 10,000 caracteres totales para secciones largas. Mínimo 4,500 y máximo 5,000 caracteres totales para secciones cortas. El conteo de caracteres totales incluye espacios. La extensión del texto no incluye las referencias, los títulos, los datos de los autores, las palabras clave, el resumen ni los pies de figura.
 - v. **Por lo menos 2 imágenes citadas en el texto**: propias, sin derechos de autor o referenciadas, que apoyen al entendimiento de su manuscrito. Deben estar en formato PNG, JPG o JPEG, mínimo de 300 ppi y requieren estar acompañadas de su correspondiente pie de figura.
 - vi. **Referencias**: En formato APA, incluyendo identificador DOI, citas dentro del texto entre corchetes y en negritas. Mínimo 2 y máximo 6 referencias.

¿Cómo envío mi manuscrito?

Revisa información complementaria y envía tu manuscrito a través de nuestra plataforma:

<https://revistaibio.com/ojs33/index.php/main/about/submissions>

