

elementos

BENEMÉRITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE PUEBLA • No. 142 • Volumen 33 • abril - junio 2026 • \$40.00

CONAHCYT
Incluida en el Índice de Revistas
Mexicanas de Divulgación Científica
y Tecnológica del CONAHCYT



EXHIBIR HASTA EL 30-JUNIO-2026

El neoscurantismo | De toxina a fármaco: moléculas con doble función | Del romance al desgaste: cómo mitocondrias y lisosomas envejecen juntos | Terapia génica: del cine de ciencia ficción a la medicina actual | Compuestos vegetales con efecto neuroprotector en la enfermedad de Parkinson | *Art déco*: centenario de la Exposición Internacional de Artes Decorativas... | Caries temprana de la infancia: un reto para la salud bucal pediátrica | Células germinales y biotecnología reproductiva: una esperanza para el ajolote mexicano | Humedales artificiales: soluciones verdes para tratar aguas grises... | Microplásticos: una pequeña gran amenaza para nuestro mundo | La diversidad de hongos en México y el mundo... | Rumbo a la acuaponía inteligente con tecnología 4.0 | Plantaciones de árboles de navidad en el Estado de México... | Cuando las abejas dejan de oler: plaguicidas que silencian señales químicas | El metaboloma del maíz: claves para su mejora y producción sostenible | Frass de mosca soldado negra: un biofertilizante emergente para la agricultura | Obra gráfica: Ivette Trejo





BUAP

BENEMÉRITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE PUEBLA
rectora, Ma. Lilia Cedillo Ramírez
secretario general, José Manuel Alonso Orozco
vicerector de investigación y estudios de posgrado, Ygnacio Martínez Laguna

ELEMENTOS

www.elementos.buap.mx

revista trimestral de ciencia y cultura

número 142, volumen 33, abril-junio de 2026

director, Enrique Soto Eguibar

subdirector, José Emilio Salceda

diseño y producción gráfica, Mirna Guevara

corrección de estilo, Emilio Salceda y Leopoldo Noyola

sitio web y laboratorio multimedia, Leopoldo Noyola

redes sociales, Mirna Guevara

administración y logística, Lorena Rivera e Ileana Gómez

redacción, 14 Sur 6301, Ciudad Universitaria

Apartado Postal 406, Puebla, Pue., C.P. 72570

email: esoto24@gmail.com

consejo editorial, Itziar Aretxaga (CAB CSIC-INTA, España),

Beatriz Eugenia Baca (ICUAP, BUAP),

María Emilia Beyer Ruiz (DGDC, UNAM),

María de la Paz Elizalde, (ICUAP, BUAP),

Ana Lidya Flores Marín (IBERO Puebla),

Marcelo Gauchat (FUNDACIÓN FORMA, A. C.),

Sergio Segundo González Muñoz (COLPOS Montecillo),

Federico Méndez Lavielle (Facultad de Ingeniería, UNAM),

Jesús Mendoza Álvarez (Instituto Politécnico Nacional),

Ricardo Moreno Botello (Ediciones de Educación y Cultura),

Francisco Pellicer Graham (Instituto Nacional de Psiquiatría),

Adriana Pliego Carrillo (Facultad de Medicina, UAEM),

Leticia Quintero (Facultad de Ciencias Químicas, BUAP),

José Emilio Salceda (Instituto de Fisiología, BUAP),

Gerardo Torres del Castillo (ICUAP, BUAP), Catalina Valdés Baizabal

(Laboratorio de Neurobiología Celular,

Universidad de La Laguna), Enrique Vergara (ICUAP, BUAP)

obra gráfica, © Ivette Tejero

Portada, © *Diablo de San Martín Tilcajete IV*.

De la Serie México Mágico. Óleo/cartón, 43 x 28 cm, 2023

2° de forros, © *Diablo de San Martín Tilcajete I*.

De la Serie México Mágico. Óleo/cartón, 43 x 28 cm, 2023

3° de forros, © *México: surrealista por excelencia*.

De la Serie México Mágico. Óleo/tela, 140 x 100 cm

Contraportada, © *Diablo de San Martín Tilcajete III*.

De la Serie México Mágico. Óleo/cartón, 43 x 28 cm, 2023

CINTILLO LEGAL

ELEMENTOS, Año 41, No. 142, abril a junio de 2026, es una publicación trimestral editada por la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, con domicilio en 4 Sur número 104, Col. Centro, C. P. 72000, Puebla, Pue., y distribuida a través de Revista Elementos, con domicilio en Av. 14 Sur No. 6301, Col. San Manuel, Puebla, Pue. C. P. 72570. Tel. 222 229 55 00 ext. 7316. Editor responsable Dr. Enrique Soto Eguibar, esoto24@gmail.com. Reserva de derechos al uso exclusivo 04-2018-101113435900-102. ISSN 0187-9073, ambos otorgados por el Instituto Nacional del Derecho de Autor de la Secretaría de Cultura. Este número se terminó de imprimir en marzo de 2026. Las opiniones expresadas por los autores no necesariamente reflejan la postura del editor de la publicación.

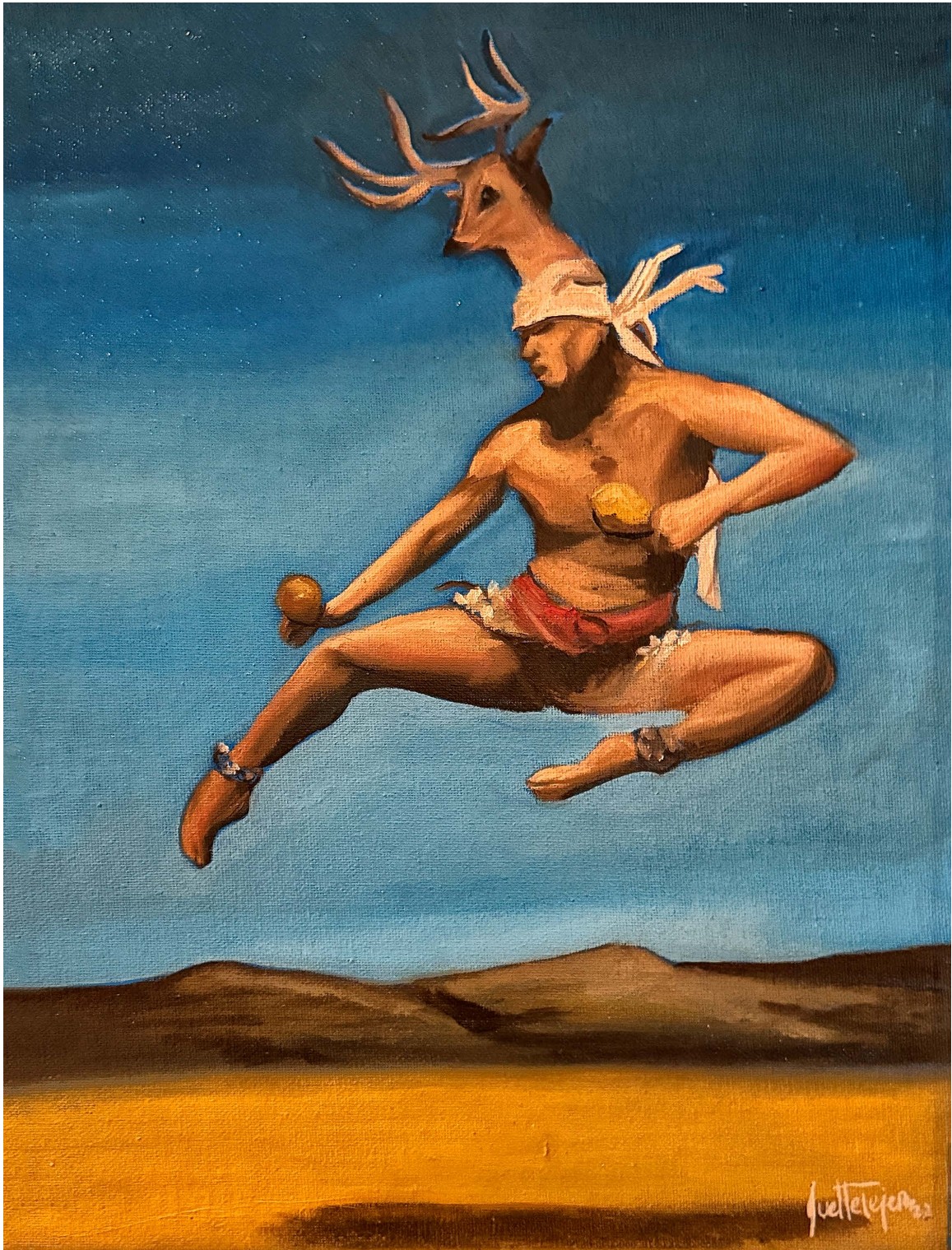


ÍNDICE DE REVISTAS MEXICANAS
DE DIVULGACIÓN CIENTÍFICA Y TECNOLÓGICA



El neoscurantismo	3
Francisco Pellicer Graham	
De toxina a fármaco: moléculas con doble función	13
Doralba Barrita Betanzos, Jovani Ruiz Toledo	
Del romance al desgaste: cómo mitocondrias y lisosomas envejecen juntos	19
Daniela T. Curiel, Sandra A. Niño	
Ivette Tejero: obra gráfica	25
Terapia génica: del cine de ciencia ficción a la medicina actual	29
Miguel Ángel Torres Vega, Ana Gabriela Montiel Martínez	
Compuestos vegetales con efecto neuroprotector en la enfermedad de Parkinson	37
Luis Jesús Castillo Pérez, Ángel Josabad Alonso Castro	
Art decó: centenario de la Exposición Internacional de Artes Decorativas e Industrias Modernas	43
Ramón Ramírez Ibarra	
Rápido y sin pensar: sobre la impulsividad	51
María Fernanda Guardado Xolo, Ana Lis Heredia Espinosa	
Caries temprana de la infancia: un reto para la salud bucal pediátrica	57
José María Hernández Castillo, Julieta Sarai Becerra Ruiz	
Células germinales y biotecnología reproductiva: una esperanza para el ajolote mexicano	63
Tania J. Porras-Gómez, Noé Zacauala-Juárez	
Plasmodium aviar: un parásito que amenaza a las aves	69
Carlos Antonio Abella Medrano, César Antonio Sandoval Ruiz	
Vulnerabilidad socioeconómica y urbanización, factores en la degradación ambiental de humedales	73
Sonia Morán-Rodríguez, Raymundo Dávalos Sotelo	
Humedales artificiales: soluciones verdes para tratar aguas grises en zonas rurales	81
Daniel Alejandro García López	
Microplásticos: una pequeña gran amenaza para nuestro mundo	87
Yailly Fernández Arteaga	
La diversidad de hongos en México y el mundo: dificultades de estimación y relevancia biológica	93
Marko Gómez-Hernández, Etelvina Gándara	
Rumbo a la acuaponía inteligente con tecnología 4.0	99
Jesús Josafat de León-Ramírez, Juan Fernando García Trejo	
Plantaciones de árboles de navidad en el Estado de México: especies, distribución y retos	105
Tania María Vega Valero, Zuleyma Zarco González	
Cuando las abejas dejan de oler: plaguicidas que silencian señales químicas	III
Jovani Ruiz Toledo, David Alavez-Rosas	
El metaboloma del maíz: claves para su mejora y producción sostenible	III
Juan José Romero Tovar, Jorge Vargas Almaraz	
Frass de mosca soldado negra: un biofertilizante emergente para la agricultura	123
Hugo González-Lara, Juan Fernando García-Trejo	

© Ivette Tejero. *Danzante del Venado*.



El neoscurantismo

Francisco **Pellicer Graham**

*Maiori forsan cum timore sententiam in me fertis quam
ego accipiam*

*Tembláis acaso más vosotros al anunciar esta sentencia
que yo al recibirla*

Giordano Bruno, Quemado vivo el 17 de febrero de
1600 en el Campo de' Fiori, Roma.

De nuevo, el juego de las definiciones; el Diccionario de la
Lengua Española define obscurantismo con dos acepciones:

1. Oposición sistemática a la difusión de la cultura.
2. Defensa de ideas o actitudes irracionales o retrógradas.

Nunca pensé utilizar al Génesis como fuente biblio-
gráfica referencial en mis escritos, pero así es la vida,
nunca digas nunca:

En el principio Dios creó los cielos y la tierra. Y la tierra
era caos y vacuidad, y las tinieblas cubrían la faz del
abismo, y el Espíritu de Dios se movía sobre la faz de
las aguas. Entonces dijo Dios: Sea la luz. Y hubo luz.
Y vio Dios que la luz era buena; y separó Dios la luz de
las tinieblas. Y llamó Dios a la luz día, y a las tinieblas
llamó noche. Y fue la tarde y fue la mañana: un día.

Es con esta alegoría primigenia, por cierto, sacada de
una biblia denominada Biblia de 42 líneas, rebautizada
después como la Biblia de Johannes Gutenberg en 1452
(Figura 1), estallido luminoso y paradójico que da cuenta
de que hay que separar las cosas que están en lo *obscurum*



Figura 1. Johannes Gutenberg, Maguncia Alemania (c. 1400-1468).



Figura 2. Hans Lipperhey, Alemania (1570-1619).

y allegarlas hacia la luminosa verdad del conocimiento; es a este proceso al que llamamos “rupturas epistemológicas”. Este es el concepto con el que podemos connotar la línea de construcción (*fabrica*) con la cual los humanos hemos forjado la cultura.

VISITEMOS PRIMERO LA PARTE LUCIFERINA

El contexto es único; se sitúa a fines del siglo XV y en el transcurso del XVI de nuestra era: Colón *et al.* encuentran América y se rompe con la creencia de la superficie plana del planeta; Copérnico ordena racionalmente el cosmos cercano al Sol; Galileo observa ese cosmos con sus propios ojos, con la vista amplificada mediante el invento de Hans Lipperhey (Figura 2), el cual patentó como telescopio de refracción en 1608 en los Países Bajos. Con este instrumento Galileo inicia el escrutinio de la razón en el territorio de Dios y por eso es dolorosamente castigado. Peor suerte tuvo su antecesor, Filippo Bruno, nacido cerca de Nápoles en 1548 y convertido en monje dominico, donde cambia su nombre por Giordano y su convicción por

la de hereje que desafió al *status quo* eclesiástico en más de un sentido¹ (Figura 3). Leonardo, el bastardo de Vinci: dueño de la intuición, la lógica, el arte que lo lleva a hacer invenciones premonitórias de la ciencia y la tecnología contemporáneas. Este es el caldero de donde surge también Vesalio de Bruselas (Figura 4), personaje que rompe con la línea epistemológica galénica, en parte errónea, por la falta de coherencia y sistematización en la obtención del conocimiento, en parte dada por prohibiciones del poder hegemónico. Andreas centra su trabajo con una serie de actitudes y procedimientos que los diccionarios hoy connotan como *Ciencia*, es decir, el conjunto de conocimientos obtenidos mediante la observación y el razonamiento, sistemáticamente estructurados y de los que se deducen principios y leyes generales. Parafraseando lo anterior, el quehacer que Andreas realizó y que hoy calificamos como científico se podría definir como el conjunto de actividades que efectuó en torno y para la obtención del conocimiento mediante el ejercicio racional que se apoya en la instrumentación y observación metodológica, replicable y comprobable por terceros. Aún más, diría que esta es una actividad que tiene como



Figura 3. Giordano Bruno (1548-1600).



Figura 4. Andreas Vesalius (1514-1564).

esencia la búsqueda de la verdad; entendiéndose como verdad la resultante de comparar el modo de operar de la naturaleza con un constructo intelectual –teórico o empírico– inherente al observador, que se lleva a cabo mediante pasos y reglas que es lo que comúnmente denominamos método científico. Es en la medida en que esta comparación se acerca a la identidad, que estamos más cerca del concepto de verdad. En realidad, hacer ciencia no es apegarse a las definiciones engendradas por lo que hoy conocemos como teoría del conocimiento, sino un quehacer más emparentado con la intuición, la artesanía, el arte; en síntesis, es una postura filosófica en relación con el concepto de verdad y el de naturaleza.

Existiría otro inicio de la misma historia, más renacentista en su concepción, por ende más luminoso, y este diría que el ejercicio de la investigación científica es una actividad que tiene como esencia el divertimento; sí, una actividad lúdica y divertida

del intelecto, en la cual la “verdad” forma parte esencial del juego y que en el tiempo de Andreas, y por desgracia también de forma contemporánea y por las mismas razones, podría, puede ser tan peligrosa de realizar, que va la vida en ello, de ahí también su riqueza.

Verdad y verosimilitud: estos dos conceptos son fundamentales para dar un marco de referencia al conocimiento que está a punto de sufrir un quebranto epistemológico; es decir, pasar a ser luciferino o pretender ser luz, pero en realidad ser *lux obscura*. En este sentido, verosimilitud se define como la apariencia de verdad en las cosas –aunque en la realidad no la tengan–, lo suficiente para formar un juicio prudente. El adjetivo verosímil designaría “lo que tiene apariencia de verdadero, aunque en realidad no lo sea”. Esto contrasta con el concepto muy preciso de verdad: el de la verdad como adecuación entre el

entendimiento y las cosas. Lo que interesa destacar en esta contraposición entre verosimilitud y verdad, es que en la noción de verdad se da la concordancia entre el entendimiento y la cosa, cuanto más estricta mejor, mientras que en la noción de verosimilitud se da un tipo de concordancia ligera o poco estricta: un parecido con la verdad que no llega a ser adecuación plena.

Sin saberlo, desde el punto de vista epistemológico, Andreas Vesalio de Bruselas deconstruyó el cuerpo humano en todos sus componentes para después realizar dos procesos fundamentales. Uno, la reconstrucción, fragmento por fragmento, capa por capa, develando y volviendo a armar para dejar oculto lo que estaba oculto en un principio, pero ahora con la diferencia de saber qué hay dentro, su disposición, sus relaciones, y que al final resulta concordar con la verdad anatómica del hombre; construyó el *De Humani Corporis Fabrica*. El segundo proceso fue todo el andamiaje con el que rompió la línea galénica, transgredió a la hegemonía y nos regaló de forma impecable la manera de hacer ciencia, buena ciencia.²

Con un último ejemplo de este periodo de obscurantismo visitaré el terreno de la moral, la ética y las buenas costumbres; que no la ciencia. Se trata de un suceso que en realidad ha estado presente desde tiempos inmemoriales, pero la sábana oscura de este periodo, e inclusive más en el tiempo, los amplifica.

Los sucesos acontecidos a finales del siglo XVI, de una historia que relacionaba a Marianna de Leyva, aristócrata hija del conde de Monza, embarazada fuera del matrimonio, lo que la obliga a recluirse en el convento de Santa Margherita, donde la obligarán a adoptar el eufemístico nombre de Sor Virginia María, y que tras el juicio eclesiástico que le realizan es recluida en una celda por catorce años. El 18 de octubre de 1608, el tribunal eclesiástico de Milán emitió al respecto esta sentencia:

Sor Virginia María De Leyva, monja profesa en el monasterio de Santa Margherita di Monza, en la diócesis de Milán, sujeta a la jurisdicción de esta Curia, fue real y efectivamente, no solo



Figura 5. Escultura de Salvatore Grita (Caltagirone 1828 - Roma 1912), titulada *El voto contra natura*; Palazzo Pitti, Galería de Arte Moderno, Florencia.

por muchos testimonios, sino también por sus propias confesiones, condenada por muchos crímenes graves, enormes y atroces, de los cuales se da a conocer el juicio instituido contra ella y los demás cómplices religiosos; por lo tanto, aparece con toda evidencia como culpable, muy culpable y punible bajo todos los títulos: por lo tanto, la condenamos al castigo, mientras viva encerrada y amurallada tanto de día como de noche, y hasta su muerte.

Los documentos de este juicio se mantuvieron en secreto hasta 1957, cuando salieron a la luz pública, con lo cual se pudo dar cuenta de este suceso. Esta historia, y la propia, inspiró a Salvatore Grita, nacido en Caltagirone en 1828, escultor, fotógrafo, crítico de arte, a realizar entre 1860 y 1870 una escultura que tituló *El voto contra natura*; la misma representa a una joven monja en avanzado estado de gestación, arrinconada entre agobiantes muros, dentro de una celda. La escultura se puede ver en la actualidad



Figura 6. Jacques Monod, Francia (1910-1976).

en la Galería de Arte Moderno del Palazzo Pitti en Florencia (Figura 5). Esta obra le confiere al espectador un sentimiento demoledor, justamente por la reflexión que implica imaginar la catástrofe humana de esa futura madre y su vástago; todo, cortesía del más profundo oscurantismo social.

UN PEQUEÑO SALTO DE 500 AÑOS

Hace poco tiempo escribí aquí mismo:³

Por qué revisitamos: revisitamos porque tuvo valor la visita original y esto tiene una gama amplia de valencias: afectivas, filosóficas, científicas, epistémicas, artísticas, de lugar y una larga cadena de preferencias personales. Hace cincuenta años, Jacques Monod [Figura 6] dio a luz un texto titulado *El azar y la necesidad*, con el subtítulo de “Ensayo sobre la filosofía natural de la biología moderna”; hoy que la revisitamos, cincuenta años después, la connotaría como una obra epistémica en el más estricto

sentido de la palabra: fuente de conocimiento, abrevadero de transversalidades y, claro está, limitaciones, controversias y, a la luz del tiempo, inexactitudes, todo ello constituyente de la verdadera epistemología que permite la remodelación del conocimiento.

Esta revisita a un viejo amigo es lo que nos convoca aquí y ahora. Diecisiete autores formados en campos diversos que le ofrecen al lector un recorrido guiado por expertos, los cuales abren las salas de este museo virtual del conocimiento y nos regalan su punto de vista, su actualización en sus diversos campos al respecto, de los conceptos vertidos por Monod hace cincuenta años sobre la importancia de esos acontecimientos que al parecer suceden, simplemente suceden, y que denominamos azar en supuestos procesos determinísticos, ensamblados, estructurados, todos engranados y concatenados en el complejo, muy complejo, concepto que es la vida y su consecuencia temporal: la evolución, además de, tal vez, la más peligrosa trampa de la epistemología: las propiedades emergentes.

Propiedades de las que el lado oscuro ha hecho, en muchas ocasiones, su liturgia.

EL LADO NEOSCURO

Es increíble que con todo este constructo de la “fábrica de conocimiento” estemos viviendo un nuevo oscurantismo, ya no totalmente generado por las religiones, sino por los pueblos sabios, sus gobiernos y sus creencias. En este sentido, parece que algunas democracias han retrocedido en la escalinata hacia la generación de cultura fundamentada en la verdad, lo justo, la seguridad y el real bienestar de todos. A continuación, enlistaré una serie de pensamientos y actitudes que nos rodean y asfixian y que, por supuesto, están afectando a las sociedades enteras.

Uno de los clásicos es el pertenecer a una secta religiosa que prohíbe tratamientos médicos que, de hecho, pueden salvar sus vidas.⁴ Aquí el problema es



Figura 7. Edward Jenner, Inglaterra (1749-1823).

la transferencia a un tercero menor de edad o sin decisión propia; me explico: el derecho a rehusar una intervención o medicamento médico por parte de un individuo que conserva sus facultades de decisión y lo asiste el derecho en función de su autonomía, es inalienable; el problema ocurre cuando un tercero decide por ti, por minoría de edad o cobertura de potestad. Aquí incluiría de forma muy importante al movimiento antivacunas, precisamente porque el principal objetivo de esta acción preventiva son los niños, y la decisión de no efectuarla es de los padres. Momento de encender la *lux* y poner en el reflector a Edward Jenner (Figura 7), médico inglés y hombre de ciencia, diría yo, que en 1796 genera la vacuna contra la viruela a partir de las *variola vaccinae* (pústulas de vaca); lo demás es historia.⁵

Otro de los mitos, sostenido desde hace al menos una veintena de años, es la inexistencia o el poco impacto del efecto invernadero ocasionado por las altas emisiones de CO₂ en la atmósfera del planeta, con el consecuente cambio en el clima; recomiendo ver el clip de la NASA al respecto, es

contundente, medido, con línea temporal y aterrador.⁶ Las consecuencias del aumento en la temperatura de un sistema adiabático cerrado es la oscilación, y es por eso por lo que estamos viviendo sequías extremas, incendios, mientras de forma simultánea se presentan disminuciones drásticas de temperatura, fuertes lluvias y mega huracanes con graves pérdidas en la infraestructura necesaria para la subsistencia humana.

Por supuesto, todo esto sustentado con la pseudofilosofía de la teoría de la conspiración orquestada por intereses económicos y de control que dieron origen en los siglos XI al XV al obscurantismo puro y duro, con la diferencia de que la magnitud en la economía, la cantidad de personas controladas, su poder, en una contundente palabra, es en la actualidad de varias decenas en orden de magnitud.

Hoy tenemos herramientas cibernéticas y de comunicación –gracias a la tecnología satelital– que nos dan la oportunidad de la inmediatez y la simultaneidad de sucesos; ejemplo: internet. Esto ha posicionado a las noticias –verdaderas y falsas– en un plano muy relevante, con un poder de penetración social enorme y con una regulación



Figura 8. Traslado y enterramiento de cadáveres, víctimas de la peste negra en el pueblo de Turnai. Pictograma de Pierart dou Tielst, c 1353.

deficiente, propositiva o no, lo que desde mi punto de vista empodera al lado oscuro más que al luminoso, por razones de pereza cognoscitiva social, asunto que no analizaré aquí.

¿Cómo podemos contrarrestar el mal? Con la nobilísima tarea, por parte de los científicos y tecnólogos o profesionales éticos en las artes de la divulgación de la ciencia y la tecnología, para la educación y la construcción de cultura. Esta debe tener tales características que sea mejor que los constructos conspirativos y las noticias falsas para relacionar los avances positivos con la educación temprana, dando a la niñez las herramientas para el discernimiento y la valoración de juicio; solo creando cultura cívica sólida será posible; con el “pueblo sabio” no es suficiente.⁷

De forma reciente, cuando me han preguntado cómo veo la política científica del gobierno y del país en general, he respondido: los países que no son capaces de producir su propia cultura, y con esto me refiero a producir: arte, literatura, gastronomía, arquitectura, ciencia, tecnología, por solo citar algunos de los ingredientes que conforman la cultura, están condenados a comprarla y lo que

es peor, están condenados a comprar lo que nos vendan; y para estar acorde con los vientos que soplan, con los aranceles que nos impongan... Si el gobierno no favorece, genera y jerarquiza las políticas de desarrollo necesarias para propiciar esta cultura, generará dependencia y abstinencia catastrófica; un ejemplo sensible y de mucho peso tecnológico-científico, de gran repercusión en la salud y por ende en el bienestar social, es la producción de vacunas en nuestro país.

Realizando una acrobacia temporal, ahora estamos en 1340-1350, en medio de la “gran peste”, causante, según modelos contemporáneos de mortalidad demográfica, de la muerte del 50 % de la población de Europa; incluyendo a Asia y el norte de África podrían ser alrededor de 100 millones de habitantes humanos del planeta; por supuesto, castigo divino por nuestro mal comportamiento, ayudado por las ratas, sus pulgas y la bacteria *Yersinia pestis* (Figura 8). Para este suceso no hubo tecnología sanitaria ni médica alguna para contenerla; pero sí manipulación religiosa y feudal, oscurantismo puro y duro



Figura 9. Pieter Brueghel “el Viejo” *El triunfo de la Muerte*, 1562, Museo del Prado, Madrid España.

de poblaciones ignorantes y manipulables; para mejor comprensión visual ver: *El triunfo de la Muerte*, pintura de Pieter Brueghel “el Viejo”, 1562 (Figura 9).

Al respecto, hemos tenido recientemente dos pandemias, una en el 2009 ocasionada por el virus de influenza A H1N1, la segunda diez años después, producida por un coronavirus llamado SARS-CoV-2, esta última *totis orbis*. En la primera, independientemente del manejo político y sanitario de muy bajo desempeño, tuvimos que importar de Canadá la vacuna contra el virus y las pruebas clínicas para realizar los diagnósticos, precisamente por falta de políticas de desarrollo científico-tecnológico nacional; el gasto que se erogó por este rubro fue descomunal. La pregunta de banqueta es qué hubiera pasado si tan solo el 10 % de este gasto catastrófico se hubiera invertido, tiempo atrás, para su desarrollo; bueno, el hubiera... y no aprendimos. La segunda pandemia nos pilló en peores condiciones: la compra

de miles de aparatos para respiración asistida, y no quiero hacer una lista que está en el “consciente colectivo”, incluidas, por supuesto, las pérdidas humanas. Ese viejo anhelo de tener una secretaría de estado encargada de la ciencia y la tecnología se realiza hoy, enhorabuena por eso, pero es el paso cero; a partir de aquí, hay mucha responsabilidad en su buen desempeño, por supuesto en la cancha de la clase política relacionada, pero también en nosotros, los que trabajamos profesionalmente en la construcción del patrimonio cultural del país, para hacer y dar el contrapeso necesario para lograr un buen desempeño en este ámbito.

Con lo expuesto, es evidente que estamos viviendo una nueva era de obscurantismo, misma que habremos de superar, como sociedades, en la medida que generemos cultura que rompa, cada vez más, con atavismos ideológicos, sean religiosos, políticos o de los poderes económicos. La verdadera libertad y felicidad se genera de la reflexión, la información y la libre decisión.



© Ivette Tejero. *Diablo de San Martín Ticaljete II*. De la Serie México Mágico. Óleo/cartón, 28 x 43 cm, 2022.

NOTAS

¹ Las ocho posturas a las que Giordano Bruno se negó a renunciar ante la inquisición fueron:

I. La declaración de dos principios reales y eternos de la existencia: el alma del mundo y la materia original de la que se derivan los seres.

II. La doctrina del universo infinito y los mundos infinitos en conflicto con la idea de la Creación: el que niega el efecto infinito niega el poder infinito.

III. La idea de que toda realidad, incluyendo el cuerpo, reside en el alma eterna e infinita del mundo: No hay realidad que no se acompañe de un espíritu y una inteligencia.

IV. El argumento según el cual no hay transformación en la sustancia, ya que la sustancia es eterna y no genera nada, sino que se transforma.

V. La idea del movimiento terrestre, que –según Bruno– no se oponía a las Sagradas Escrituras, las cuales estaban popularizadas para los fieles y no se aplicaban a los científicos.

VI. La designación de las estrellas como mensajeros e intérpretes de los caminos de Dios.

VII. La asignación de un alma tanto sensorial como intelectual a la Tierra.

VIII. La oposición a la doctrina de Santo Tomás sobre el alma: la realidad espiritual permanece cautiva en el cuerpo y no es considerada como la forma del cuerpo humano.

² Pellicer F (2014) Andreas Vesalius: la construcción de la *Fabrica*. *Elementos* 95:47-48.

³ El texto original se publicó a raíz de la presentación del libro *El Azar y la necesidad cincuenta años después*, El Colegio Nacional, 2025. Pellicer Graham F (2025). El azar y la necesidad cincuenta años después. *Elementos* 138:117-118.

⁴ Besio MR y Besio HF (2006). Testigos de Jehová y transfusión sanguínea. Reflexión desde una ética natural. *Revista Chilena de Obstetricia y Ginecología* 71(4):274-279.

⁵ Fernández-Niño JA y Baquero LH (2019). El movimiento anti-vacunas y la anti-ciencia como amenaza para la Salud Pública. *Revista de la Universidad Industrial de Santander. Salud* 51(2), Bucaramanga.

⁶ Calentamiento global NASA. YouTube Cambio 16: <https://www.youtube.com/watch?v=rzweq8WgKjo&t=5s>.

⁷ Pellicer F (2025). Traduzcámonos todos. *Elementos* 59:3-4.

Laboratorio de Neurofisiología Integrativa
Instituto Nacional de Psiquiatría
Ramón de la Fuente Muñiz
pellicer@inprf.gob.mx

© Ivette Tejero. *Chinelo danzando con el viento*". Óleo/madera y lino 43 x 33 cm.





De toxina a fármaco: moléculas con doble función

Doralba **Barrita Betanzos**
Jovani **Ruiz Toledo**

La naturaleza está compuesta de pequeñas moléculas que, aunque invisibles a simple vista, son responsables de gran parte de la vida en nuestro planeta. Por ejemplo, en los insectos, algunos de estos compuestos funcionan como señales químicas que los atraen o los repelen, mientras que otros actúan como mecanismos de defensa contra depredadores. Lo sorprendente es que muchas de estas mismas sustancias, creadas originalmente para la supervivencia, también han sido utilizadas por los humanos para aliviar el dolor, combatir enfermedades o protegernos de los insectos que las transmiten.

A lo largo de la historia natural, la misma sustancia que protege a una especie puede convertirse en un remedio para otra. En determinados contextos, una molécula actúa como veneno o defensa química, mientras que en otros se transforma en un agente terapéutico con valor farmacológico. Esta dualidad revela una interdependencia profunda entre los sistemas biológicos: la salud humana y la de los ecosistemas forman parte de un mismo entramado. Lo que la naturaleza produce para conservar la vida en un organismo puede, con conocimiento y equilibrio, servir para restablecerla en otro (Fordjour *et al.*, 2023).

En ese cruce de ideas, la ecología química y la farmacología comenzaron a hablar el mismo lenguaje. La ecología química explica cómo los organismos usan

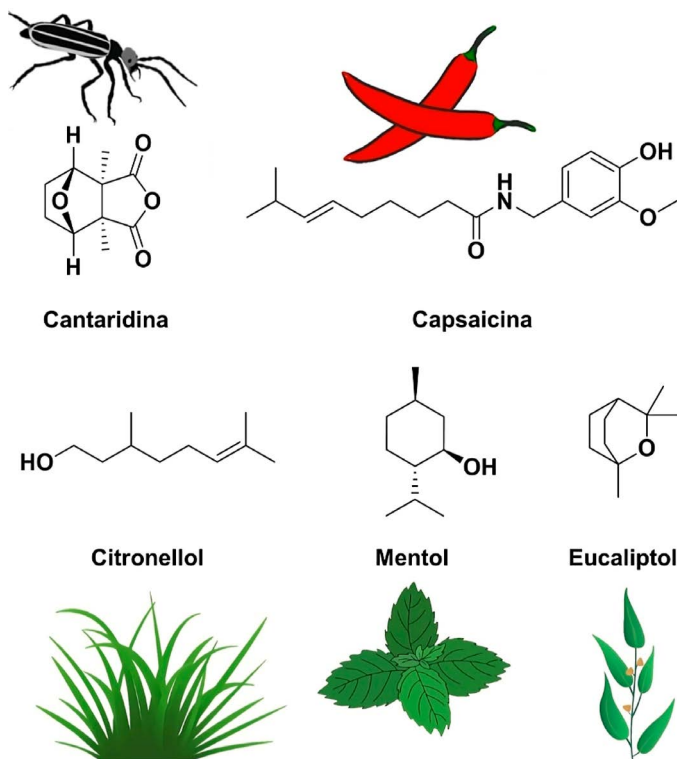
Figura 1. Moléculas de doble cara producidas por insectos o plantas para mediar interacciones ecológicas, pero utilizadas por los humanos como fármacos. Imagen de David Alavez Rosas.

moléculas para comunicarse, defenderse o adaptarse a su entorno. A través de esas diminutas señales, los seres vivos logran sobrevivir y mantener el equilibrio en los ecosistemas. Por su parte, la farmacología aprovecha muchas de esas mismas moléculas y las transforma en compuestos útiles para la salud humana. Cuando ambas disciplinas se encuentran, se revela un vínculo profundo entre la química de la vida y la química de la curación. Explorar la naturaleza con una mirada científica nos permite descubrir conexiones que antes pasaban desapercibidas. En cada organismo y en cada molécula existe una historia química que puede enseñarnos cómo mantener el equilibrio y cuidar la salud. La naturaleza continúa siendo, sin lugar a duda, un recurso interminable de saber y de motivación para la ciencia.

Para prevenir posibles malentendidos sobre el tema, comenzamos con una corta explicación de los conceptos que se tratarán en este artículo. Los metabolitos secundarios son sustancias que desempeñan roles ecológicos particulares en plantas e insectos. En el sector farmacéutico, comúnmente se les denomina sustancias bioactivas o principios activos.

MOLÉCULAS NATURALES CON FUNCIONES DUALES

A lo largo de la evolución han aparecido múltiples moléculas que cumplen funciones particulares en los ecosistemas. Por ejemplo, en el caso de los insectos, intervienen en aspectos como la defensa, la comunicación, la atracción y el rechazo entre diversas especies. Lo increíble es que estas mismas sustancias, que antes se veían como irrelevantes para la humanidad, se convierten en recursos valiosos para la salud y la medicina. Tal es el caso de la cantaridina,



un compuesto producido por el escarabajo *Epicauta chinensis* (Figura 1). El macho la ofrece como “regalo de bodas”, mientras que la hembra la usa para cubrir sus huevos, haciéndolos inaccesibles a los depredadores debido a su toxicidad (Jiang *et al.*, 2017). Esta misma molécula, que puede ser peligrosa para los humanos en dosis altas, se está investigando actualmente como agente antitumoral, ya que tiene el potencial de inducir la apoptosis, es decir, la muerte celular programada (Zhang *et al.*, 2017). Esta molécula se ha utilizado en dermatología para eliminar verrugas. Este ejemplo transmite una lección clara: lo que funciona como un veneno en la naturaleza tiene el potencial, con el conocimiento y el manejo adecuados, de transformarse en una valiosa herramienta para la medicina.

La capsaicina es otra sustancia conocida que le da a los chiles su característico picante. En las plantas del género *Capsicum*, se produce como defensa contra los mamíferos herbívoros; sin embargo, no tiene efecto en las aves, lo que les permite seguir propagando sus semillas. En farmacología, esta misma molécula se utiliza como analgésico tópico, ya que ayuda a reducir la sensibilidad al dolor y

a aliviar afecciones como neuropatías diabéticas, neuralgias y artritis (Arora *et al.*, 2021).

Diversos compuestos naturales ilustran la amplia gama de funciones ecológicas y farmacológicas que pueden presentar los metabolitos secundarios. El mentol de la menta, el eucaliptol del eucalipto y el citrionelol de la citronela son ejemplos representativos. En el contexto ecológico, estas moléculas actúan como mecanismos de defensa, ya que repelen o resultan tóxicas para ciertos insectos. No obstante, en el ámbito humano, se valoran por sus aplicaciones terapéuticas y cosméticas, al formar parte de formulaciones con propiedades repelentes, analgésicas y antiinflamatorias (Rito-Rueda *et al.*, 2023).

Los ejemplos anteriores demuestran que una molécula puede desempeñar la función de medicina en un organismo y de defensa en otro. No se trata de coincidencias independientes, sino de la expresión de algo más esencial: la química que sustenta la vida es compartida. Una molécula que funciona como veneno, señal o escudo en la naturaleza, puede transformarse en medicamento. Por esta razón, el fenómeno conocido como la “función dual” de las moléculas no es simplemente una curiosidad, sino que demuestra claramente la íntima conexión entre la salud y la ecología.

IMPlicaciones en Salud Pública y Farmacología

La exploración de moléculas naturales que desempeñan doble función ha establecido un auténtico vínculo entre la farmacología aplicada y la ecología química. En consecuencia, actualmente disponemos de una gama más extensa de compuestos bioactivos que no solo poseen capacidad terapéutica, sino también fomentan la creación de productos más sustentables, con ventajas para el balance ambiental y la salud de las personas.

Este conocimiento ha sido útil en el control de vectores de enfermedades compuestos como el citrionelal, el eucaliptol y el geraniol han probado su eficacia frente a insectos como la vinchuca, portadora del *Trypanosoma cruzi* (el parásito responsable de la enfermedad de Chagas), y el *Aedes*

aegypti, transmisor del dengue (Narawi *et al.*, 2020). Aunque estos compuestos son de procedencia vegetal y suelen ser más seguros, su efectividad y toxicidad dependen tanto de la dosis como del método en uso. Al mismo tiempo, algunas de estas moléculas poseen propiedades antiinflamatorias, analgésicas y antimicrobianas, lo que las hace útiles en formulaciones que combinan la protección con beneficios terapéuticos (Alavez-Rosas y Cruz-Esteban, 2022). Por ejemplo, los aceites esenciales como los de citronela o eucalipto muestran una eficacia comprobada como repelentes, aunque su desempeño depende en gran medida de la concentración del compuesto activo, el tipo de formulación y las condiciones ambientales donde se apliquen. En general, ofrecen protección más corta que los productos sintéticos, pero con la ventaja de ser opciones más seguras y menos agresivas para el entorno.

Estas moléculas han influido de manera importante en la medicina complementaria y en la medicina tradicional. A lo largo de siglos, varias culturas han empleado extractos vegetales para calmar el dolor y defenderse de los insectos. La ciencia está empezando a avalar ahora prácticas ancestrales, como las infusiones de menta para los problemas gástricos o los ungüentos de capsaicina para el malestar en los músculos. Los procesos bioquímicos que explican estos efectos han podido ser entendidos gracias a investigaciones recientes. Los estudios computacionales y clínicos que evidencian la actividad de sus principios activos han hecho posible, a su vez, esta investigación.

La noción de “una molécula, múltiples funciones” ha servido como fuente de inspiración para la generación de productos novedosos que incorporan una variedad de funciones. Hay fármacos que, aparte de mitigar el dolor, tienen la capacidad de rechazar insectos o fusionar efectos sedantes con características antiparasitarias. Estas soluciones completas, seguras, económicas y culturalmente pertinentes tienen una eficacia particular en comunidades que no tienen fácil acceso a la medicina tradicional.



© Ivette Tejero. *Fiesta nocturna en Tultepec, Estado de México*. Óleo/cartón, 46 x 31 cm.

Las moléculas naturales se vislumbran como una opción alentadora en un contexto global marcado por la resistencia a los fármacos y la crisis ecológica. Su origen renovable, su especificidad biológica y la escasa aparición de efectos secundarios serios son las razones por las cuales generan cada vez más interés, tanto en la comunidad científica como en la sociedad.

No es una coincidencia que numerosos grupos de investigación, entre ellos el nuestro, estén creando fórmulas con aceites esenciales para manejar insectos de relevancia médica en áreas tropicales. El propósito es evidente: desarrollar alternativas que sean seguras, efectivas y sostenibles, que mantengan la salud de las personas sin poner en riesgo el equilibrio del medio ambiente.

CONCLUSIONES Y PERSPECTIVAS

Aunque las moléculas naturales con doble función tienen un gran potencial, todavía afrontan retos signi-

ficativos para su aplicación. Una de las variables más destacadas es la química: una planta puede generar compuestos diversos dependiendo del lugar donde se sitúe, el clima en el que crezca o el método utilizado para extraer sus aceites e ingredientes activos. La complejidad legal agrava esta situación. Según el país y la aplicación, una misma sustancia puede ser clasificada como un medicamento, un plaguicida o un cosmético. Esto produce un gran número de normas y criterios. La ausencia de uniformidad produce vacíos regulatorios y trámites extensos y costosos para analizar la seguridad y efectividad de los productos, lo cual frecuentemente obstaculiza o limita su comercialización.

El conocimiento todavía limitado acerca de sus mecanismos de acción es otro gran reto. Aunque se ha comprobado que una gran cantidad de estas moléculas tienen efectos biológicos evidentes, aún se requiere un entendimiento más exacto de su interacción con las células y los sistemas orgánicos. Un examen más detallado de estos mecanismos permitiría la creación de productos que sean más eficaces, específicos y seguros, con la capacidad

de ser aprovechados al máximo sin comprometer la salud ni el medio ambiente.

A pesar de que en ensayos *in silico*, *in vitro* y en modelos con animales se ha evidenciado la actividad biológica de muchos compuestos, no se ha llegado a entender del todo su interacción molecular exacta con dianas biológicas. Esa carencia de exactitud obstaculiza el progreso racional de análogos más eficaces, seguros y precisos. Por esta razón, fomentar una cooperación más cercana entre farmacólogos, bioquímicos, ecólogos químicos y biotecnólogos es fundamental.

Se plantea además una cuestión importante en el terreno ético y ambiental: el uso sostenible de las plantas autóctonas. Si no se utilizan métodos sostenibles para la cosecha y el cultivo, la creciente necesidad de aceites esenciales o extractos puede amenazar las especies vegetales y los ecosistemas. La biotecnología presenta en este contexto oportunidades innovadoras, como la generación de compuestos naturales mediante enzimas o microorganismos y el cultivo de líneas celulares *in vitro*. Estas estrategias pueden reducir la presión sobre los recursos naturales y hacer que el uso de estas sustancias sea más sostenible.

A pesar de estos obstáculos, la visión es positiva. En años recientes, instrumentos como la metabolómica y la química computacional han revolucionado la forma en que se identifican y mejoran los compuestos naturales. La metabolómica facilita la observación de cómo las moléculas influyen en los procesos biológicos de plantas, insectos o microorganismos, mientras que la química computacional asiste en la predicción de sus posibles interacciones con el organismo humano. Gracias a esta integración, en la actualidad es factible identificar con mayor exactitud qué sustancias poseen potencial terapéutico o ambiental y crear versiones más seguras y eficaces (Wang *et al.*, 2022). Simultáneamente, el creciente interés en los productos naturales y la valorización de los conocimientos tradicionales están creando nuevas oportunidades para la innovación y el emprendimiento en el campo de la farmacología ecológica, un área donde ciencia y naturaleza pueden avanzar conjuntamente

NOTA

Para la elaboración de este artículo se emplearon herramientas de asistencia lingüística basadas en inteligencia artificial con el fin de optimizar la redacción y la coherencia del texto, bajo supervisión directa de los autores. El contenido conceptual, las referencias y los resultados estuvieron a cargo exclusivo de los autores.

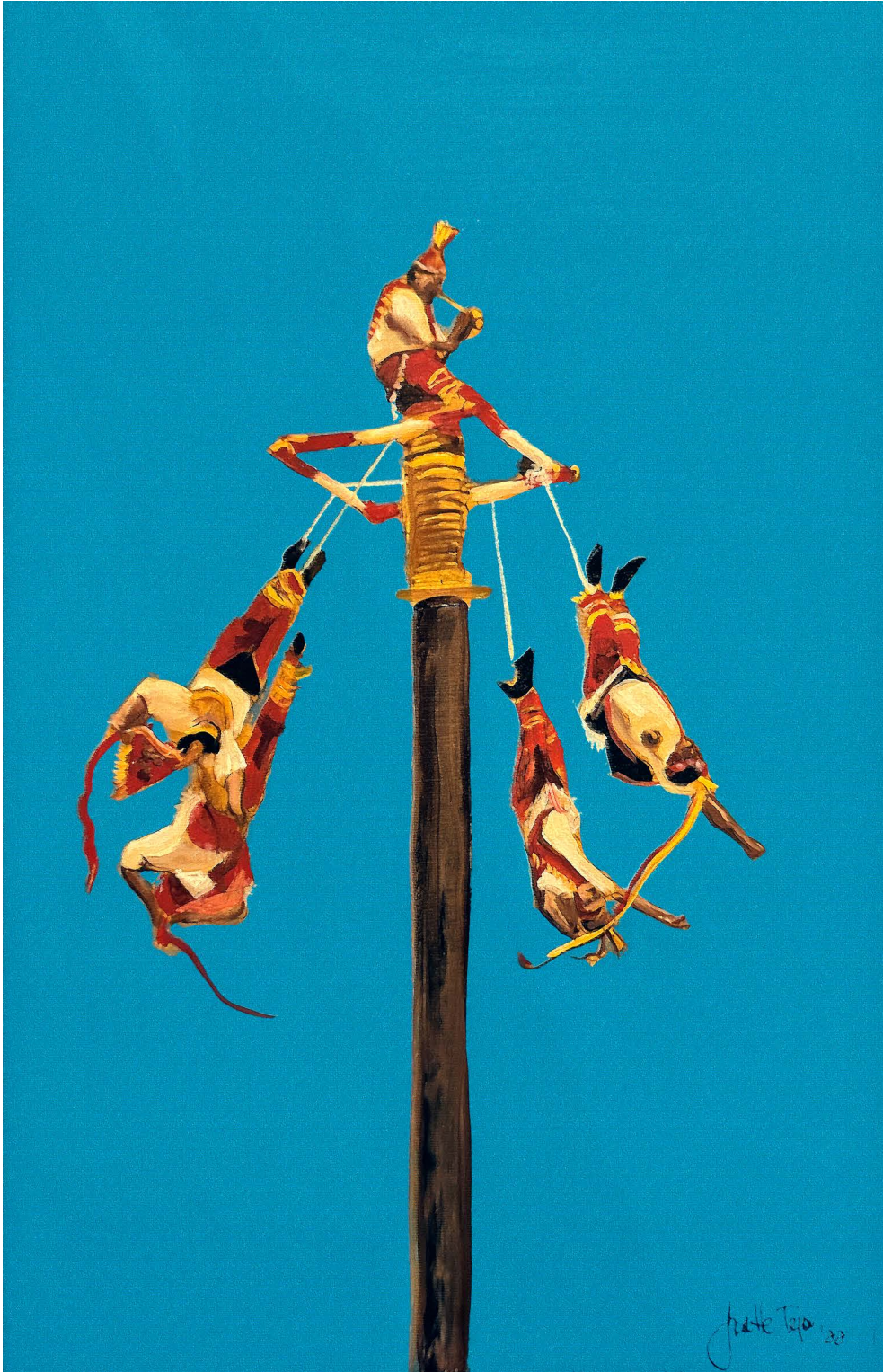
REFERENCIAS

- Alavez-Rosas D y Cruz-Esteban S (2022). Enervantes aromas que matan o ahuyentan. *Elementos* 127:23-26. Recuperado de: <https://elementos.buap.mx/post.php?id=722>.
- Arora V, Campbell J and Chung M (2021). Fight fire with fire: Neurobiology of capsaicin-induced analgesia for chronic pain. *Pharmacology & Therapeutics* 220:1-21. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.pharmthera.2020.107743>.
- Fordjour E, Manful C, Sey A *et al.* (2023). Cannabis: a multifaceted plant with endless potentials. *Frontiers in Pharmacology* 14:1-36. DOI: <https://doi.org/10.3389/fphar.2023.1200269>.
- Jiang M, Lü S and Zhang Y (2017). The potential organ involved in cantharidin biosynthesis in *Epicauda chinensis* Laporte (Coleoptera: Meloidae). *Journal of Insect Science* 17:1-9. DOI: <https://doi.org/10.1093/jisesa/iex021>.
- Narawi M, Chiu H, Yong Y *et al.* (2020). Biocompatible nutmeg oil-loaded nanoemulsion as phyto-repellent. *Frontiers in Pharmacology* 11:1-15. DOI: <https://doi.org/10.3389/fphar.2020.00214>.
- Rito-Rueda A, Flores-Jiménez E, Gutiérrez-Cabrera A *et al.* (2024). How to repel a killer; chemical identification and effective repellent activity of commercial essential oils against kissing bugs. *Medical and Veterinary Entomology* 38:148-159. DOI: <https://doi.org/10.1111/mve.12702>.
- Wang X, Hu Y, Zhou X and Li S (2022). Network pharmacology and traditional medicine: Setting the new standards by combining *in silico* and experimental work. *Frontiers in Pharmacology* 13:1-5. DOI: <https://doi.org/10.3389/fphar.2022.1002537>.
- Zhang L, Cheng S, Chen C *et al.* (2024). Application of cantharidin, retinoic acid cream and salicylic acid in multiple palmoplantar warts. *Skin Research and Technology* 30:1-5. DOI: <https://doi.org/10.1111/srt.13586>.

Doralba Barrita Betanzos
Facultad de Ciencias Químicas
Universidad Autónoma de Chiapas

Jovani Ruiz Toledo
Facultad de Ciencias Químicas
Universidad Autónoma de Chiapas
jovani.ruiz@unach.mx

© **Ivette Tejero**. *Voladores de Papantla*. De la Serie México Mágico. Óleo/cartón, 35 x 25 cm.



Del romance al desgaste: cómo mitocondrias y lisosomas envejecen juntos

Daniela T. Curiel
Sandra A. Niño

De acuerdo con la Organización Mundial de la Salud (OMS), el envejecimiento es resultado de la acumulación gradual de daños celulares a lo largo de la vida. Este proceso natural implica una disminución progresiva de nuestras capacidades físicas y mentales (OMS, 2024). Estudios longitudinales como el de Lehallier y colaboradores (2019) han identificado puntos de inflexión en el proteoma sanguíneo alrededor de los 30, 60 y 75 años, lo que sugiere que el envejecimiento no es un proceso lineal, sino que ocurre en etapas definidas. Estos cambios reflejan alteraciones profundas en la comunicación metabólica entre orgánulos.

México se encuentra en camino a convertirse en una población envejecida, lo cual significa que una de cada cinco personas tendrá 60 años o más, es decir, cerca del 20 % de la población del país. En 2015, la población mexicana aún era considerada una nación joven, pero el Consejo Nacional de la Población (CONAPO) proyecta que para el año 2030 iniciará oficialmente esta transición. Cada estado sigue su propio ritmo en este proceso; sin embargo, la CDMX ya encabeza esta transformación, siendo la entidad federativa con la mayor proporción de personas con 60 años o más, una tendencia que se espera continúe en los próximos años (González, 2016).

EL ORIGEN DEL ENVEJECIMIENTO: LA MITOCONDRIA

Aunque los signos externos del envejecimiento son evidentes, el verdadero desgaste comienza mucho antes en el nivel celular. Existen diferentes tipos de envejecimiento: el cronológico (desde el nacimiento), el psicológico (cambios mentales), el funcional (habilidad para realizar las tareas) y el biológico (decline celular). El envejecimiento biológico es uno de los cambios más significativos que ocurre cuando los sistemas internos de mantenimiento y reciclaje empiezan a perder eficiencia. En un organismo joven, la producción de energía y la eliminación de componentes dañados funcionan de manera coordinada. Sin embargo, con el paso del tiempo, estos procesos se desacoplan. Entre los actores más importantes de este equilibrio se encuentran las mitocondrias, encargadas de generar ATP, y los lisosomas, responsables de degradar y reciclar los componentes celulares dañados. Cuando la capacidad de uno de estos orgánulos disminuye, el otro debe compensar, y este esfuerzo adicional puede desencadenar un ciclo de deterioro. En este artículo se evidencia cómo el envejecimiento altera la cooperación entre mitocondrias y lisosomas, y cómo esta ruptura contribuye al deterioro funcional celular.

Esta se manifiesta por una producción desmedida de especies reactivas del oxígeno (ROS, por sus siglas en inglés), mutaciones en el ADN mitocondrial, oxidación de proteínas, reducción en procesos de biogénesis mitocondrial y una alteración en el metabolismo energético (Ying *et al.*, 2023).

ESTRÉS OXIDATIVO Y FUNCIÓN MITOCONDRIAL

Las mitocondrias son los centros energéticos de la célula, pero también su principal fuente de especies reactivas de oxígeno (ROS). Durante la fosforilación oxidativa, una pequeña fracción de electrones se escapa de la cadena respiratoria y reacciona con el oxígeno para formar superóxidos. En condiciones normales, las células mantienen un equilibrio dinámico entre la generación de ROS y su neutralización

por sistemas antioxidantes como el superóxido dismutasa, la catalasa y el glutatión peroxidasa (Picard & Shrihail, 2022).

Las enzimas antioxidantes neutralizan las ROS mediante la transferencia controlada de electrones, funcionando como amortiguadores redox, que impiden que el daño se propague a proteínas, lípidos o ADN, además de tomar un rol en la señalización, proliferación y diferenciación celular (Venza *et al.*, 2021). Sin embargo, con la edad o ante estrés metabólico crónico, este equilibrio se rompe. El exceso de ROS oxida lípidos de membrana, daña el ADN mitocondrial (ADNmt) y reduce la eficiencia de los complejos respiratorios. Este fenómeno genera un círculo vicioso: la mitocondria dañada produce más ROS, y estas, a su vez, lesionan aún más las mitocondrias.

Cuando esto ocurre, la célula activa mecanismos compensatorios como la biogénesis mitocondrial y la mitofagia, regulados por PGC-1 α , NRF1 y TFAM, o por vías energéticas dependientes de AMPK y SIRT1. Estas rutas detectan la caída de energía (reflejada en niveles bajos de ATP y altos de AMP) y promueven la reparación o eliminación de mitocondrias defectuosas. En resumen, son cinco controles principales que activan la mitocondria (Ying *et al.*, 2023):

- Las proteasas, que se encargan de degradar proteínas dañadas
- Una respuesta a proteínas mal formadas, como si fueran piezas defectuosas, que activan el sistema inmune
- Los procesos de fisión (división) y fusión (unión), llamado dinámica
- La mitofagia, que se encarga de eliminar partes defectuosas de la mitocondria
- Un sistema de liberación de vesículas, las cuales transportan desechos hacia los lisosomas, encargados de degradar y reciclar dentro de la célula.

No obstante, en el envejecimiento patológico estos mecanismos se vuelven inefficientes. La acumulación de mutaciones en el ADNmt y la disfunción del sistema de control de calidad reducen la capacidad de regeneración energética. El resultado es una célula menos flexible, más propensa al daño y con menor capacidad de respuesta ante estrés.

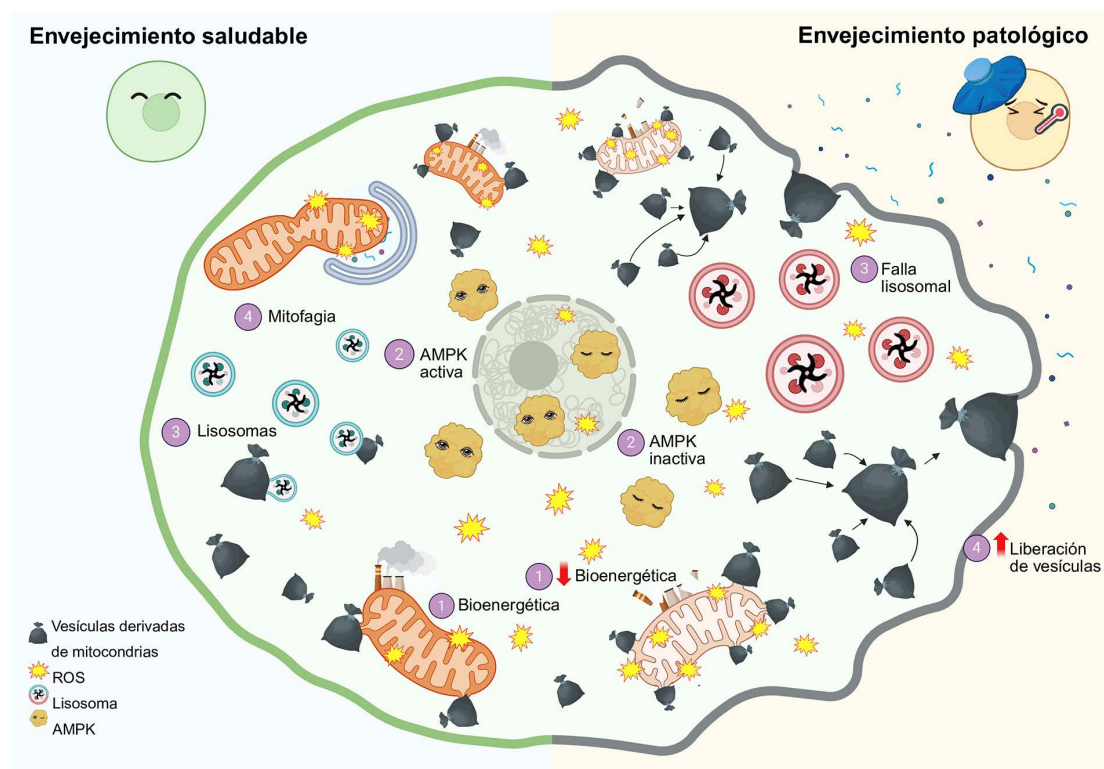


Figura 1. Sello biológico del envejecimiento saludable y patológico. El envejecimiento saludable (ES) se representa a la izquierda y el envejecimiento patológico (EP) a la derecha; (1) Bioenergética: producción de energía en mitocondria se mantiene estable en ES, a diferencia del EP; (2) enzima AMPK: capaz de reconocer cambios en los niveles de energía celular; en condiciones de estrés metabólico, como el envejecimiento, puede inactivarse; (3) Lisosomas: organelos degradadores funcionales en el ES. En el EP, pierden función degradativa; (4) Mitofagia: eficiente en el ES, disminuida en EP, fomentando la generación de vesículas.

LISOSOMAS Y CONTROL DE CALIDAD CELULAR

Los lisosomas actúan como el sistema digestivo de la célula, responsables de degradar macromoléculas, organelos dañados y restos intracelulares. En su interior, un ambiente ácido (pH ~4.5) y un conjunto diverso de hidrolasas permiten la descomposición controlada de proteínas, lípidos y ácidos nucleicos. Este proceso garantiza que los productos resultantes, aminoácidos, ácidos grasos y azúcares, sean reutilizados en nuevas rutas metabólicas. Desde una perspectiva funcional, los lisosomas representan nodos de reciclaje y control de calidad esenciales para la homeostasis celular.

Con el envejecimiento, la eficiencia lisosomal disminuye. Las enzimas se vuelven menos activas, las membranas pierden permeabilidad selectiva y se acumulan pigmentos no degradables, como la lipofusina. Este residuo, de color marrón, se asocia con la edad y con una menor capacidad de respuesta ante el estrés oxidativo. La alteración de la función

lisosomal afecta directamente a la autofagia, el proceso mediante el cual la célula elimina organelos y proteínas disfuncionales. Si los lisosomas no logran fusionarse correctamente con los autofagosomas, el material dañado permanece en el citoplasma, interrumpiendo la renovación celular.

Además, los lisosomas participan en la señalización metabólica a través de vías como mTORC1. Este complejo se activa en la superficie lisosomal en respuesta a nutrientes y regula el crecimiento y la síntesis proteica. Cuando la comunicación entre los lisosomas y sensores energéticos como AMPK se altera, se pierde la capacidad de equilibrar entre anabolismo y catabolismo. En conjunto, la disfunción lisosomal no solo provoca acumulación de desechos, sino también un fallo en la percepción del estado energético celular. Esta doble afectación convierte a los lisosomas en un punto crítico en la transición del envejecimiento saludable al patológico.

COMUNICACIÓN MITOCONDRIA-LISOSOMA Y ENVEJECIMIENTO CELULAR

Las mitocondrias y los lisosomas no funcionan como entidades aisladas; se comunican física y bioquímicamente para coordinar la calidad y disponibilidad de los recursos celulares. En condiciones fisiológicas, esta comunicación permite que las mitocondrias dañadas sean reconocidas y degradadas eficientemente a través de la mitofagia.

Uno de los mecanismos clave en esta comunicación son los puntos de contacto mitocondria-lisosoma (MLC, por sus siglas en inglés). Estos sitios de interacción directa facilitan el intercambio de iones, metabolitos y señales de calcio. Estudios recientes han demostrado que el calcio liberado desde los lisosomas puede modular la dinámica mitocondrial, afectando la fusión y fisión de estos orgánulos.

En el envejecimiento, la frecuencia y funcionalidad de los MLC disminuyen. Esto limita la capacidad de la célula para detectar y eliminar mitocondrias dañadas, promoviendo su acumulación. Cuando los MLC fallan, también se altera la homeostasis del calcio y la respuesta al estrés energético, generando una cascada de desajustes metabólicos (Deus *et al.*, 2020). Esta pérdida de sincronía entre los sistemas degradativos y energéticos representa un sello distintivo del envejecimiento patológico. Diversos mediadores moleculares participan en esta comunicación. Entre ellos, las proteínas RAB7, TBC1D15, LAMP1/2 y componentes del sistema PINK1-Parkin, que regulan la fusión lisosomal y el reconocimiento de mitocondrias alteradas. Cuando estas proteínas se desregulan, como se ha observado en modelos de envejecimiento y neurodegeneración, se compromete tanto la degradación como la biogénesis mitocondrial (Cisneros *et al.*, 2022).

De hecho, Onnis y colaboradores (2022) han señalado que la pérdida de conectividad mitocondria-lisosoma no solo limita la eliminación de desechos, sino que altera la percepción global del estado energético y redox celular, afectando rutas como mTORC1 y AMPK. Este tipo de desconexión, más que un evento

aislado, parece formar parte de una firma molecular del envejecimiento celular.

MITOCONDRIA-LISOSOMA

EN ENFERMEDADES NEURODEGENERATIVAS

Las alteraciones en la comunicación entre mitocondrias y lisosomas se han asociado con múltiples enfermedades neurodegenerativas, donde el envejecimiento celular actúa como factor de riesgo principal. En el cerebro, las neuronas son particularmente vulnerables a este tipo de fallos, ya que dependen de un metabolismo energético estable y de un sistema de reciclaje eficiente.

En la enfermedad de Alzheimer, la acumulación de mitocondrias fragmentadas y la disfunción lisosomal son hallazgos constantes. Los niveles elevados de ROS dañan proteínas y lípidos de membrana, y la reducción en la actividad de enzimas lisosomales, como la cathepsina D, agrava la acumulación de material no degradado. Además, el acoplamiento deficiente entre PINK1 y Parkin reduce la eliminación de mitocondrias disfuncionales, favoreciendo la neuroinflamación.

En la enfermedad de Parkinson, la pérdida de función en genes como PARK2, PINK1 o LRRK2 afecta directamente la comunicación entre ambos orgánulos. Estos genes participan en la detección de mitocondrias dañadas y en la regulación de su transporte hacia los lisosomas para su degradación. Cuando esta vía se interrumpe, las mitocondrias defectuosas permanecen activas, liberando ROS y contribuyendo a la muerte neuronal.

De manera similar, en la enfermedad de Huntington y en la esclerosis lateral amiotrófica (ELA) se ha descrito una disfunción lisosomal progresiva, acompañada de fallos en la dinámica mitocondrial. Estos procesos convergen en un mismo resultado: la pérdida de homeostasis celular y la activación de respuestas inflamatorias crónicas. En conjunto, estos hallazgos apoyan la idea de que la interrupción del eje mitocondria-lisosoma constituye un punto de convergencia en la fisiopatología del envejecimiento y la neurodegeneración. Comprender este eje puede abrir nuevas oportunidades terapéuticas.

Fármacos capaces de restaurar la mitofagia, modular mTOR o mejorar la biogénesis mitocondrial se perfilan como estrategias prometedoras para ralentizar la progresión del daño neuronal.

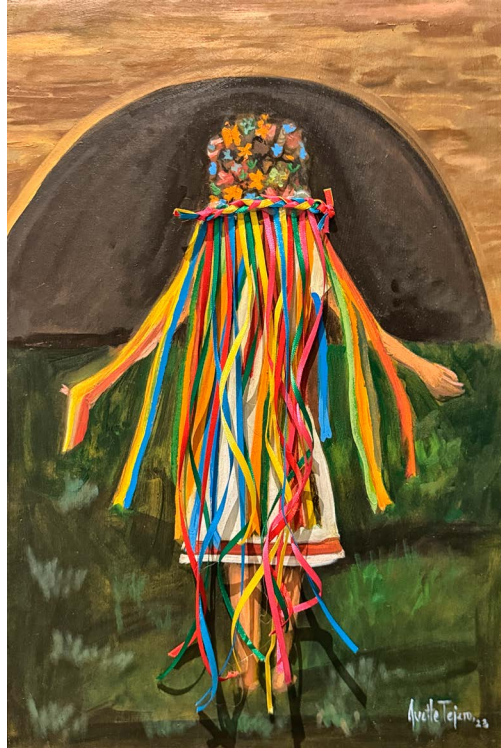
CONCLUSIÓN

El envejecimiento celular no puede entenderse únicamente como un desgaste progresivo, sino como la pérdida de coordinación entre sistemas que antes trabajaban en sincronía. La relación entre mitocondrias y lisosomas es un ejemplo claro de ello: mientras en etapas tempranas de la vida cooperan en el mantenimiento energético y la degradación de componentes dañados, en el envejecimiento patológico esta comunicación se debilita y desencadena un deterioro acumulativo. El aumento de ROS, el mal funcionamiento lisosomal, la reducción de la mitofagia y la alteración de rutas como AMPK y mTOR forman parte de un mismo eje de disrupción celular. Este proceso no solo acelera el envejecimiento, sino que favorece la aparición de enfermedades crónico-degenerativas como Alzheimer, Parkinson y otras patologías neurodegenerativas.

Más allá de la metáfora, lo que se observa es una pérdida de integración funcional que afecta la capacidad adaptativa de la célula. Comprender los mecanismos que deterioran esta comunicación ofrece una vía estratégica para el desarrollo de terapias preventivas. Intervenciones dirigidas a restaurar la función lisosomal, mejorar la biogénesis mitocondrial o reforzar los puntos de contacto entre ambos orgánulos podrían ayudar a ralentizar, o incluso revertir, aspectos clave del envejecimiento patológico. Más que un desenlace inevitable, el envejecimiento celular podría reorientarse modulando los vínculos que sostienen la homeostasis interna. La interacción entre mitocondrias y lisosomas representa uno de los nodos centrales donde ese cambio es posible.

REFERENCIAS

Cisneros J, Belton TB, Shum GC, Molakal CG y Wong YC (2022). Mitochondria-lysosome contact site dynamics and misregulation in neurodegenerative diseases. *Trends in Neuroscience* 45(4):312-322.



© Ivette Tejero. Fiesta de Takari en Zacapu Michoacán. De la Serie México Mágico. Óleo/cartón, 45 x 39 cm.

Deus CM, Yambire KF, Oliveira PJ y Raimundo N (2020). Mitochondria-lysosome crosstalk: From physiology to neurodegeneration. *Trends in Molecular Medicine* 26(1):71-88.

González KD (2016). Envejecimiento demográfico en México: análisis comparativo entre las entidades federativas. CONAPO. Recuperado de: http://www.conapo.gob.mx/work/models/CONAPO/Resource/2702/06_envejecimiento.pdf.

Lehallier B, Gate D, Schaum N, Nanasi T, Lee SE, Yousef H, Moran Losada P, Berdnik D, Keller A, Verghese J, Sathyan S, Franceschi C, Milman S, Barzilai N y Wyss-Coray T (2019). Undulating changes in human plasma proteome profiles across the lifespan. *Nature Medicine* 25(12):1843-1850.

OMS (Organización Mundial de la Salud) (2024). Envejecimiento y salud. Organización Mundial de la Salud. Recuperado de: <https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/ageing-and-health>.

Onnis A, Cassioli C, Finetti F y Baldari CT (2020). Regulation of selective Bcell autophagy by the pro-oxidant adaptor p66SHC. *Front Cell Dev Biol* 8:193.

Picard M y Shirihai OS (2022). Mitochondrial signal transduction. *Cell Metabolism* 34(11):1620-1653.

Venza I, Venza M, Visalli M, Lentini G, Teti D y d'Alcontres FS (2021). ROS as regulators of cellular processes in melanoma. *Oxidative Medicine and Cellular Longevity* 2021:1208690.

Ying G, Teng G, Kashfia S, Qiang Y, Xin J, Donghui N, Meiyu L, Guohui Z, Jiming K (2023). Mitochondrial dysfunction in aging. *Ageing Research Reviews* 88:101955.

Daniela T. Curiel

Sandra A. Niño

**Departamento de Genética y Biología Molecular
CINVESTAV-IPN, Unidad Zacatenco**

sandra.esquivel@cinvestav.mx



© Ivette Tejero. *Chiapaneca con iguana en Mazapán, Chiapas*. De la Serie México Mágico, Óleo/cartón, 40 x 29 cm.

Ivette Tejero

Obra gráfica



© Ivette Tejero.

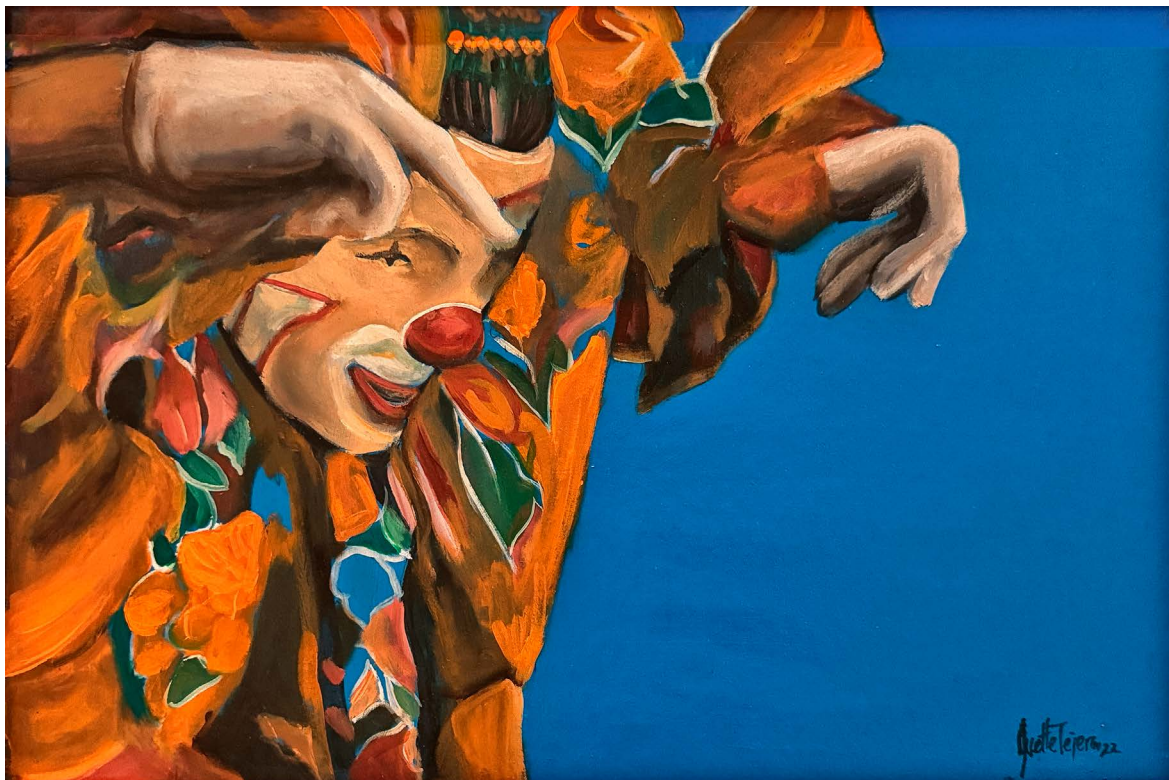
Estudió la Licenciatura en Pintura en la Escuela Nacional de Pintura, Escultura y Grabado “La Esmeralda”, obteniendo el título en 2016. En 2013, realizó un diplomado sobre el “Método de la pintura al óleo de los siglos XVI, XVII y XVIII” en Florencia, Italia, en la Angel Art Academy con el maestro Michael John Angel. Obtuvo el título de Maestría en Diseño Gráfico e Ilustración en CUMP en 2023. Es directora y docente del Taller de Arte Firenze desde 2013.

Ha participado en cerca de 60 exposiciones colectivas y 7 exposiciones individuales. Su obra se ha exhibido en galerías, parques, foros culturales y museos de México, Estados Unidos, Canadá, Italia, Francia, España y China. Recientemente expuso en Tenango del Aire, Madrid, Málaga y Praga.

También ha formado parte de 23 concursos y simposios internacionales de escultura monumental en nieve, hielo, arena y madera, realizados en Italia, Francia, Estados Unidos y Canadá, en los que ha obtenido varios premios representando a su país.

Su obra forma parte de colecciones como la Colección OQLI, la Colección Atelier La Silvestre, el Fondo Cultural del Carmen y el Sinissippi Park en Rockford, EE. UU.

© Ivette Tejero. *Payasos de Xico Veracruz*. De la Serie México Mágico. Óleo/cartón, 32 x 22 cm.



© Ivette Tejero. *Rarámuris en Semana Santa en la Sierra Tarahumara*. Óleo/ilustración, 53 x 43 cm.



© **Ivette Tejero**. *Ceremonia de Año Nuevo Seri en Comcaac, Sonora*. De la Serie México Mágico. Óleo/cartón, 28 x 40 cm.



© **Ivette Tejero**. *Día de Muertos en Oaxaca*. De la Serie México Mágico. Óleo/ilustración, 32 x 23 cm.

© Ivette Tejero. *México Menos 43*. Óleo/tela y madera, 120 x 100 cm.



Terapia génica: del cine de ciencia ficción a la medicina actual

Miguel Ángel **Torres Vega**
Ana Gabriela **Montiel Martínez**

Todos sabemos que si alguno de nosotros tiene el cabello rizado o los ojos de un color particular, son características que heredamos de nuestros padres, abuelos o familiares. Sin embargo, detrás de estas similitudes visibles existen procesos celulares complejos: si pudiéramos analizar las células de cada miembro de la familia a nivel molecular, podríamos entender mejor la relación entre la herencia genética y la apariencia física. Dentro de cada célula se encuentra el ácido desoxirribonucleico o ADN, encargado de transmitir esta información genética de padres a hijos. El ADN guarda la información en fragmentos llamados genes, que contienen las instrucciones para que se sinteticen proteínas y otros elementos clave del cuerpo. Esto ocurre de acuerdo con un dogma central que establece que en todos los organismos, excepto algunos virus, la información fluye del ADN al ARN mensajero (sí, esa molécula que se utilizó en las vacunas contra COVID19) y hacia las proteínas. Las características heredables, como el color de ojos o el tipo de cabello, están codificadas en el ADN de cada persona. Y si bien estas características suelen ser inofensivas, el ADN también puede aportar información sobre enfermedades que afectan la salud.

Este es el caso de la amaurosis congénita de Leber, una enfermedad genética causada por un cambio o mutación en el gen RPE65. Este gen produce una proteína esencial para el funcionamiento adecuado de la retina, pero cuando porta la mutación, la retina no puede realizar el ciclo visual, que es la conversión biológica de un fotón de luz en una señal eléctrica. Esto ocasiona problemas visuales en la niñez que, con el transcurrir de la edad, pueden alcanzar una ceguera total. Durante años, esta enfermedad no tuvo ningún tratamiento, por lo cual las personas afectadas estaban destinadas a vivir con una discapacidad visual severa, teniendo un impacto profundo en sus vidas.

DE LA CIENCIA BÁSICA A LA CIENCIA FICCIÓN Y A LA REVOLUCIÓN MÉDICA

Hasta hace pocos años, hablar de enfermedades genéticas y de la posibilidad de corregirlas modificando el ADN, era algo a lo que solo podíamos aspirar en películas de ciencia ficción. Actualmente, este concepto ha sido explorado en varias producciones cinematográficas, lo que también ha ayudado a popularizar y desmitificar la terapia génica. Una de las primeras películas en abordar este tema fue *GATTACA*, una producción de 1997 dirigida por Andrew Niccol.

En *GATTACA* se plantea la posibilidad de alcanzar la perfección física y mental de los individuos mediante la selección y la modificación genética antes del nacimiento. Esto permitiría a los padres eliminar en sus descendientes enfermedades y rasgos físicos no deseados, haciéndolos lucir perfectos, para que sus hijos “optimizados o válidos” tuvieran mayores oportunidades en la vida. En este universo, los válidos disfrutaban de los mejores trabajos y una posición privilegiada en la sociedad. Mientras que los no válidos, individuos sin selección ni modificación, son relegados a empleos de bajo estatus, estrictamente por su condición genética. Este es el conflicto que enfrenta Vincent Freeman (interpretado por Ethan Hawke), el protagonista,

quien al ser no válido tiene que usurpar la identidad de un válido (Jude Law) para cumplir su sueño de ser astronauta.

Aunque en la película no se explica cómo se puede modificar el genoma de una persona, es evidente que el objetivo es cambiar el ADN en las células embrionarias. Este detalle es importante, ya que en 1997, cuando se filmó *GATTACA*, aún no existían los avances científicos ni las herramientas de edición genética que tenemos hoy en día. Desde entonces, la biotecnología ha avanzado enormemente y lo que antes parecía imposible, hoy es una realidad.

En 2017, gracias a las investigaciones realizadas en el Hospital Infantil de Filadelfia, se diseñó la primera terapia que cambió el curso de la amaurosis congénita de Leber. La estrategia empleada consistió en utilizar un virus no patógeno, llamado vector viral (Figura 1), para transportar una copia normal del gen RPE65 hacia las células de la retina, en donde la proteína que codifica se puede sintetizar de manera funcional. La terapia permite que la retina recupere el ciclo visual, restaurando así la visión en los pacientes.

Este tipo de terapia fue revolucionaria, ya que los pacientes que antes del tratamiento tropezaban con objetos en habitaciones poco iluminadas, después de una sola dosis del vector con el gen RPE65 lograron desplazarse sin dificultad. Los resultados fueron tan impactantes que este tratamiento, llamado Luxturna, fue la primera terapia génica aprobada en Estados Unidos por la FDA (2017) para su uso en humanos. Este avance científico, comercializado por la compañía Spark Therapeutics, representó un cambio radical en el tratamiento de las enfermedades genéticas.

Cabe mencionar que previamente se aprobaron otras terapias génicas en el mundo, tales como Gendicine, contra el cáncer de células escamosas de cabeza y cuello (State Food and Drug Administration, SFDA, China, 2003); Glybera, contra la pancreatitis debido a una deficiencia en la lipoproteína lipasa (European Medicines Agency, EMA, 2012); y Strimvelis, contra la enfermedad del niño de la burbuja, esto es, una inmunodeficiencia severa combinada, provocada por la carencia en

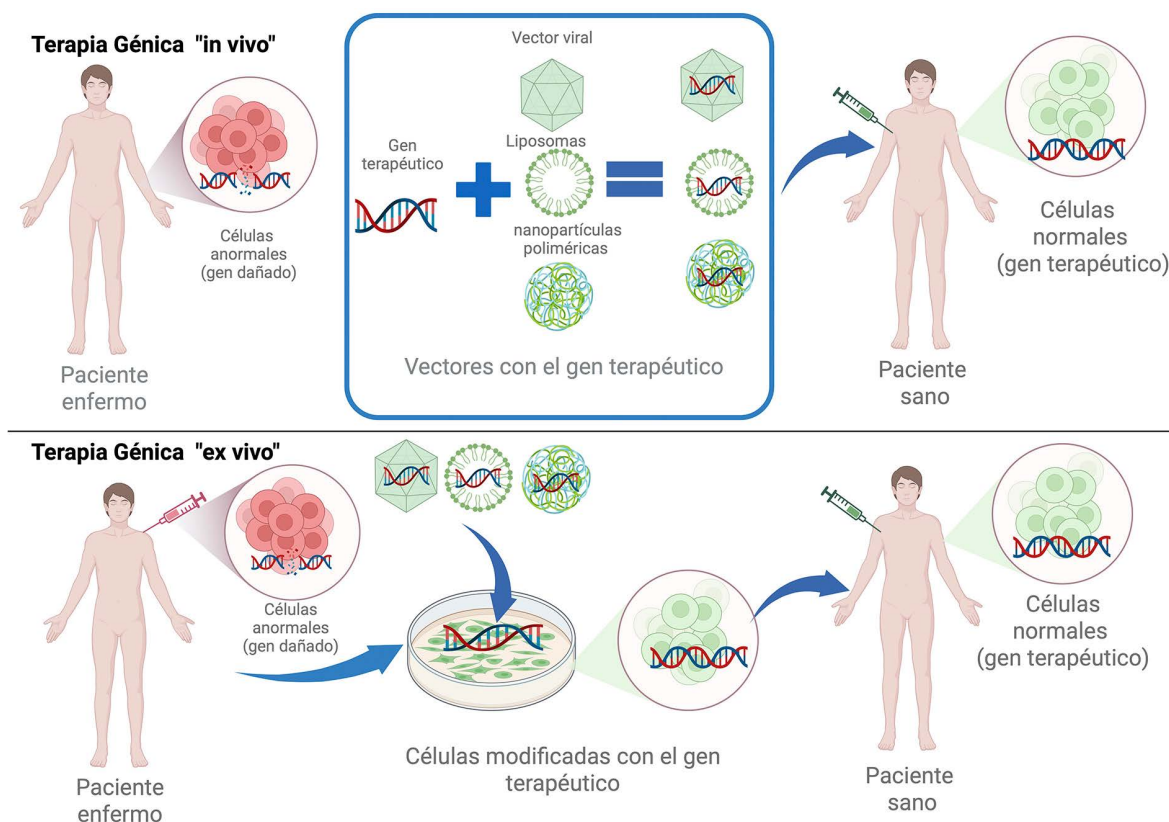


Figura 1. Principio de la terapia génica. Existen dos estrategias principales: in vivo, donde el gen terapéutico se introduce directamente en el cuerpo del paciente mediante vectores como virus recombinantes inertes, liposomas o nanopartículas poliméricas; y ex vivo, donde las células del paciente se extraen, se modifican genéticamente en el laboratorio y se reintroducen con nuevas propiedades (como en la terapia CAR-T). En ambos casos, el objetivo es restaurar o mejorar la función celular y tratar la enfermedad. Creado en BioRender.

adenosina deaminasa, ADA-SCID (EMA, 2016). Glybera fue discontinuado, mientras que Strimvelis es controlado por la Fundación Teletón y administrado en el Hospital San Rafael de Milán, ambos de Italia.

UN FUTURO EN EL TRATAMIENTO DE ENFERMEDADES QUE AVANZA A PASOS AGIGANTADOS

Como observadores, es difícil imaginar todos los esfuerzos detrás de los avances de la terapia génica. En el cine, una parte de estos empeños se refleja en películas como *El origen del planeta de los Simios* (2011), dirigida por Rupert Wyatt, en donde el protagonista Will Rodman (James Franco) es un científico que desarrolla una terapia génica para multiplicar las células neuronales y así tratar el Alzheimer. Antes de probar esta terapia en humanos la administra en chimpancés, quienes sirven de modelos experimentales. Entre ellos destaca una hembra embarazada, llamada Ojos Brillantes,

quien hereda los genes modificados y los efectos de la terapia a su cría. Este chimpancé macho es rescatado por Will al nacer, quien lo adopta y le da el nombre César. Con el paso del tiempo y el ambiente que lo rodea, César aumenta sorprendentemente su inteligencia y adquiere razonamiento. ¿Algún día podremos aumentar nuestra inteligencia con un tratamiento genético?

Aunque esta película sigue siendo una ficción, cada año nuevos descubrimientos y avances tecnológicos acercan la terapia génica a realidades antes inimaginables. En el presente existen varias terapias génicas aprobadas para tratar diversas enfermedades (Tabla 1). Por ejemplo, Zolgensma y Elevidys son tratamientos que emplean virus adenoasociados (VAA) como vehículos para expresar los genes terapéuticos SMN1 y microdistrofina, respectivamente. Estas terapias pueden corregir

Nombre Comercial	Indicación Principal	Tipo de Terapia
Luxturna	Amaurosis congénita de Leber (mutación RPE65)	Terapia génica
Zolgensma	Atrofia muscular espinal (SMA)	Terapia génica
Hemgenix	Hemofilia B	Terapia génica
Roctavian	Hemofilia A	Terapia génica
Beqvez	Hemofilia B	Terapia génica
Elevidys	Distrofia muscular de Duchenne	Terapia génica
Casgevy	Anemia falciforme y beta talasemia	Edición génica
Lyfgenia	Anemia falciforme	Terapia génica
Zynteglo	Beta talasemia dependiente de transfusiones	Terapia génica
Libmeldy / Lenmeldy	Leucodistrofia metacromática (MLD)	Terapia génica
Strimvelis	Inmunodeficiencia combinada grave por ADA (ADA-SCID)	Terapia génica
Kymriah	Leucemia linfoblástica aguda de células B	Terapia celular CAR-T
Yescarta	Linfoma de células B grandes	Terapia celular CAR-T
Tecartus	Linfoma de células del manto y leucemia linfoblástica aguda	Terapia celular CAR-T
Breyanzi	Linfoma de células B grandes	Terapia celular CAR-T
Abecma	Mieloma múltiple	Terapia celular CAR-T
Vyjuvek	Epidermólisis bullosa distrófica	Terapia génica
Imlygic	Melanoma metastásico	Virus oncolítico
Kebilidi	Deficiencia de AADC	Terapia génica
Adstiladrin	Cáncer de vejiga no músculo-invasivo	Terapia génica

Tabla 1. Terapias génicas y celulares aprobadas recientemente para uso clínico en seres humanos. La tabla muestra los tratamientos que han recibido autorización por agencias regulatorias como la FDA (Administración de Alimentos y Medicamentos de EE. UU.) y la EMA (Agencia Europea de Medicamentos), junto con su indicación terapéutica principal y el tipo de tecnología empleada (como terapia génica con vectores virales, edición génica o células CAR-T). Esta recopilación evidencia el avance de la biotecnología médica en el tratamiento de enfermedades genéticas, hematológicas y oncológicas, y refleja cómo distintas plataformas están siendo utilizadas para desarrollar terapias innovadoras con potencial curativo.

la atrofia muscular espinal y la distrofia muscular de Duchenne en bebés, logrando mejoras en su calidad de vida y en sus expectativas de longevidad.

Otra terapia aprobada es Hemgenix, un tratamiento para la hemofilia tipo B que utiliza VAA para expresar el factor IX de coagulación, lo cual ayuda a reducir los episodios de sangrado en los individuos afectados. Roctavian sigue una estrategia similar

para la hemofilia tipo A, empleando VAA para expresar el factor VIII de coagulación. Además, también se está revolucionando el tratamiento de algunos cánceres mediante inmunoterapias celulares denominadas CAR-T (Receptor de antígeno quimérico de células T). En ellas se extraen las células inmunitarias del paciente para ser modificadas en cultivo con genes para proteínas activadoras y luego son reintroducidas en el cuerpo (Figura 1). Este tipo de terapias celulares permiten atacar tumores

específicos y ya se utilizan en casos de linfoma, mieloma y melanoma.

Un avance reciente es la aprobación de Casgevy, una terapia para la anemia de células falciformes y la betatalasemia que emplea la tecnología de edición genética CRISPR/Cas9 (a las repeticiones palindrómicas cortas agrupadas y regularmente espaciadas se les denomina en inglés CRISPR; Cas9 es una enzima que corta el ADN). En la anemia de células falciformes y en la betatalasemia hay una deficiencia en la producción de hemoglobina normal y en la función de los glóbulos rojos. Por medio de la edición genética con CRISPR/Cas9, en las células madre sanguíneas se reactiva la síntesis de hemoglobina fetal, compensando así la deficiencia de hemoglobina en los glóbulos rojos de los niños y adultos y aliviando los signos y síntomas de estas enfermedades. Las pioneras de la tecnología de edición genética CRISPR/Cas9, Jennifer A. Doudna y Emmanuelle Charpentier, recibieron el Premio Nobel de Química en 2020. Otro ejemplo es el trabajo sobre sordera que se presentó en el Congreso de Terapia Génica y Celular en Roma, en octubre del 2024. El doctor Yilai Shu, de Fudan University, hizo reproducir videos mostrando a varios niños con una mutación en el gen OTOF que les impide oír. Luego de su tratamiento de terapia génica, los niños respondieron rápidamente a los sonidos identificando la dirección, comenzaron a hablar y a socializar.

MÉXICO TAMBIÉN DISEÑA TERAPIAS GÉNICAS

Hasta ahora, las terapias génicas aprobadas para uso en humanos han sido desarrolladas en países con una infraestructura científica robusta como Estados Unidos, China, Reino Unido o Italia. Sin embargo, es importante mencionar que en distintos centros de investigación de nuestro país, grupos de científicos están explorando el potencial de esta tecnología para tratar diversas enfermedades, aunque la mayoría de estos proyectos están aún en etapa preclínica.

Un ejemplo claro de esto es el trabajo del doctor Rogelio Hernández Pando, investigador del Instituto

Nacional de Ciencias Médicas y Nutrición “Salvador Zubirán”, quien está desarrollando una terapia para combatir la tuberculosis pulmonar progresiva ocasionada por *Mycobacterium tuberculosis*, utilizando un adenovirus recombinante que media la expresión de interleucina-12 (IL-12) (Mata-Espinoza *et al.*, 2019).

En este mismo Instituto, nuestro grupo en el Departamento de Gastroenterología ha propuesto un tratamiento para la encefalopatía hepática, que es común en personas con daño hepático crónico o cáncer de hígado, y que ocasiona problemas mentales, motores e inclusive la muerte. La estrategia consiste en aplicar un baculovirus modificado que acarrea el gen de la glutamina sintetasa, una enzima que ayuda a normalizar los niveles de amoníaco, agente causante de la enfermedad. Lo interesante es que esta terapia se aplica en músculo esquelético, por lo cual este tejido se está “transformando” en hígado (Espíritu-Ramírez *et al.*, 2019).

Otro ejemplo es el trabajo del doctor Juan Socorro Armendáriz Borunda y su equipo en la Universidad de Guadalajara. En este caso, han logrado revertir la fibrosis hepática a la mitad, disminuyendo la acumulación de colágeno tipo I en el hígado de ratas, a través de un vector adenoviral que media la síntesis de la proteína metaloproteínasa de matriz 8 (MMP-8), también en el músculo esquelético (García-Bañuelos *et al.*, 2023).

En la terapia contra el Parkinson que está desarrollando el doctor Daniel Martínez Fong en el CINVESTAV, se están administrando nanopartículas “funcionalizadas” con neurotensina a las neuronas dopaminérgicas dañadas para que expresen el factor neurotrófico cerebral dopaminérgico humano (hCDNF). En un modelo en rata de la enfermedad, se obtuvo una recuperación en la arquitectura del cerebro y en la conducta motora (Fernández-Parrilla *et al.*, 2022).

También en el CINVESTAV, el doctor Luis Marat Álvarez Salas y su grupo de investigación han trabajado en el diseño de aptámeros, los cuales son moléculas de ARN que pueden unirse específicamente a una

proteína o un patógeno. Ellos han desarrollado el aptámero Sc5c3, que es capaz de bloquear en células en cultivo la infección del virus del papiloma humano tipo 16 (HPV16), uno de los principales causantes del cáncer cervicouterino. (Valencia-Reséndiz *et al.*, 2018).

Y finalmente, una investigación mexicana que trascendió a la fase clínica encabezada por el doctor Hugo Barrera Saldaña, quien es investigador de la Universidad Autónoma de Nuevo León, y el doctor Estuardo Aguilar Córdova, quien trabaja en Massachusetts, Estados Unidos. Ellos evaluaron una inmunoterapia génica en pacientes con cáncer de próstata localizado, por medio de un vector adenoviral con el gen de la timidina quinasa del virus del herpes simple tipo 1, que promueve la muerte solo de las células tumorales. El seguimiento a largo plazo mostró que el tratamiento fue bien tolerado y que los pacientes no desarrollaron metástasis, lo cual fue muy alentador (Rojas-Martínez *et al.*, 2013).

Todos estos trabajos muestran que, aunque el desarrollo de terapias génicas en México aún enfrenta retos importantes, el conocimiento, la creatividad y la capacidad técnica ya están presentes. Lo que sigue es fortalecer los puentes entre la investigación, los inversionistas, los órganos de regulación (COFEPRIS), las farmacéuticas y su aplicación clínica, para que, en el futuro cercano, estos avances puedan convertirse en tratamientos reales para pacientes en nuestro país.

EL GRAN DESAFÍO: DEMOCRATIZAR LA TERAPIA GÉNICA

En una aproximación a la problemática que enfrenta la población en general para tener acceso a los tratamientos novedosos, podemos referirnos a la película *Decisiones extremas* (2010). En este filme podemos atestiguar la lucha de John Crowley (Brendan Fraser), un padre de familia que busca incansablemente una opción de tratamiento para sus dos hijos, quienes han sido diagnosticados con la enfermedad de Pompe. Este padecimiento es causado por una deficiencia de la enzima alfa glucosidasa ácida (GAA) que afecta a los músculos, y si no se

trata es incurable y mortal. En la búsqueda de una cura para esta enfermedad, John conoce al científico Robert Stonehill (Harrison Ford), quien ha estado investigando un fármaco basado en el remplazo enzimático que, si bien no está enfocado en la modificación genética, ejemplifica perfectamente el desafío que involucra la obtención de fondos económicos para realizar investigación y desarrollar fármacos que no cumplen con el objetivo de obtener grandes ganancias monetarias.

En *Decisiones extremas* también se recrea el proceso extraordinario de la generación de una *startup*, esto es, la transición de un desarrollo científico en una universidad a la formación de una empresa biotecnológica, un aspecto muy poco explorado en México. En esta transición, el doctor Stonehill y John se enfrentan a la obtención de fondos por medio de donativos, a la compra de equipo para llevar a cabo un proceso de producción en masa –o escalamiento– y al crecimiento de la empresa a través de socios que aportan capital, ideas y directrices. También a la implementación de buenas prácticas en la producción de la enzima para la aprobación por la FDA; a la competencia con otros grupos de investigadores con diferentes propuestas y, luego, a la absorción de la *startup* por una empresa farmacéutica gigante. Ya superadas estas etapas, confrontan la implementación de los ensayos clínicos y la difícil decisión ética de seleccionar al grupo de pacientes que recibirá el primer lote de enzima terapéutica con criterios “objetivos”.

Facilitar el acceso a las terapias génicas aprobadas es un objetivo crucial. Sin embargo, los altos precios en el mercado farmacéutico son la principal barrera que impide que estén al alcance de todos. Por citar ejemplos, Luxturna tiene un precio de 850,000 dólares por el tratamiento para ambos ojos, mientras que Zolgensma y Casgevy superan los 2 millones de dólares.

Para hacer más equitativo el acceso a los fármacos biotecnológicos, cobra un sentido enorme el apoyar e incentivar a la investigación científica, especialmente aquella centrada en tratamientos novedosos que se desarrollan en instituciones públicas de nuestro país. Solo de esta manera podremos

competir con las grandes industrias farmacéuticas para reducir los costos de este tipo de terapias y permitir que, en un futuro cercano, muchas de las enfermedades que heredamos de nuestros ancestros o que adquirimos en el transcurso de nuestras vidas puedan tratarse o curarse desde los genes.

OTROS RETOS DE LA TERAPIA GÉNICA

En *El origen del planeta de los simios*, hay varias escenas que ilustran algunas de las dificultades que la terapia génica ha tenido que resolver. Cuando Will administra el vector viral terapéutico a su padre, él mejora en sus capacidades mentales y físicas, pero el efecto es de corta duración debido a que el sistema inmunitario neutraliza el tratamiento. Este vector viral aparentemente puede replicarse, exhibe toxicidad y logra diseminarse por aire, por lo que otros humanos se contagian y empiezan a sangrar y a enfermar. Actualmente, los vectores para terapia génica son de familias de virus más seguras (como el VAA), no se replican y pueden sostener la expresión de un gen terapéutico por más de 10 años (Moldavskii *et al.*, 2025; Booth *et al.*, 2025).

Algunas terapias génicas exhiben efectos secundarios, tales como una respuesta exacerbada del sistema inmunitario (inflamación); sin embargo, se han logrado controlar con medicamentos. Cuando se utilizan vectores como el lentivirus, que pueden insertar al azar su genoma en el DNA humano, se corre el riesgo de alterar la expresión de un gen del huésped, pudiendo desarrollar cáncer. No obstante, este riesgo es muy bajo. Por otra parte, las terapias génicas se han concentrado en las células somáticas, esto es, no son heredables. La UNESCO ha recomendado no llevar a cabo terapias génicas en células germinales (gametos o embriones) que sí pueden transmitirse a los descendientes, debido al desconocimiento a largo plazo de los efectos de estos tratamientos; también a la posibilidad de una “mejora genética” que sea discriminatoria, como fue vislumbrado en *GATTACA*.

La aplicación de terapias génicas requiere de instalaciones y de entrenamiento muy especializado, con el que cuentan solo algunos centros de

investigación y hospitalarios de élite. Para pensar en la aplicación masiva de estas terapias a la población se deben multiplicar los esfuerzos por incrementar la infraestructura hospitalaria y el entrenamiento con capacidades especiales, así como implementar un seguimiento permanente de los pacientes.

Con esta aproximación terapéutica, la relación riesgo/beneficio ha sido favorable para el beneficiario, sobre todo para aquellos pacientes que no tenían ninguna alternativa de tratamiento y ahora llevan varios años de sobrevida. Esto ha resultado en la aprobación para uso en humanos de más de 20 terapias génicas y la lista se incrementará muy rápidamente con las nuevas investigaciones que están en marcha.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece al Posgrado en Ciencias Biológicas de la Universidad Nacional Autónoma de México y a la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación por la beca otorgada a A.G.M.M durante sus estudios de doctorado (CVU 631032).

R E F E R E N C I A S

- Booth C, Masiuk K, Vazouras K *et al.* (2025). Long-Term Safety and Efficacy of Gene Therapy for Adenosine Deaminase Deficiency. *New England Journal of Medicine* 393:1486-1497.
- García-Bañuelos J, Oceguera-Contreras E, Sandoval-Rodríguez A *et al.* (2023). AdhMMP8 Vector Administration in Muscle: An Alternate Strategy to Regress Hepatic Fibrosis. *Cells*, 12:17, 2127.
- EMA (European Medicines Agency). Recuperado de: <https://www.ema.europa.eu/en/human-regulatory-overview/advanced-therapy-medicinal-products-overview#committee-for-advanced-therapies-12383>.
- Espíritu-Ramírez P, Ortega-Balderas NY, Sevilla-Tapia L *et al.* (2019). Gene therapy for treatment of chronic hyperammonemia in a rat model of hepatic encephalopathy. *Annals of Hepatology* 17(6):1026-1034. DOI: <https://doi.org/10.5604/01.3001.0012.7203>.
- Fernandez-Parrilla MA, Reyes-Corona D, Flores-Martinez YM *et al.* (2022). Cerebral dopamine neurotrophic factor transfection in dopamine neurons using neurotensin-polyplex nanoparticles reverses 6-hydroxy-dopamine-induced nigrostriatal neurodegeneration. *Neural Regeneration Research* 17(4):854-866. DOI: <https://doi.org/10.4103/1673-5374.321001>.



© Ivette Tejero. *Chuntae de Ocuozautla Espinoza, Chiapas*. De la Serie México Mágico. Óleo/madera, 43 x 34 cm.

Mata-Espinoza DA, Francisco-Cruz A, Marquina-Castillo B *et al.* (2019). Immunotherapeutic effects of recombinant adenovirus encoding interleukin 12 in experimental pulmonary tuberculosis. *Scandinavian Journal of Immunology* 89(3):e12743. DOI: <https://doi.org/10.1111/sji.12743>.

Moldavskii D, Gilazieva Z, Fattakhova A *et al.* (2025). AAV-Based Gene Therapy: Opportunities, Risks, and Scale-Up Strategies. *International Journal of Molecular Sciences* 26(17):8282. DOI: <https://doi.org/10.3390/ijms26178282>.

Rojas-Martínez A, Manzanera AG, Sukin SW *et al.* (2013). Intraprostatic distribution and long-term follow-up after AdV-tk immunotherapy as neoadjuvant to surgery in patients with prostate cancer. *Cancer Gene*

Therapy 20(11):642-649. DOI: <https://doi.org/10.1038/cgt.2013.56>.

Valencia-Reséndiz DG, Palomino-Vizcaino G, Tapia-Vieyra JV *et al.* (2018). Inhibition of human papillomavirus type 16 infection using an RNA aptamer. *Nucleic Acid Therapeutics* 28(2):97-105. DOI: <https://doi.org/10.1089/nat.2017.0687>.

Miguel Ángel Torres Vega
Instituto Nacional de Ciencias Médicas y Nutrición
Salvador Zubirán
miguel.torresv@incmnsz.mx

Ana Gabriela Montiel Martínez
Posgrado en Ciencias Biológicas
Universidad Nacional Autónoma de México
agaby.m.m@gmail.com

Compuestos vegetales con efecto neuroprotector en la enfermedad de Parkinson

Luis Jesús **Castillo Pérez**
Ángel Josabad **Alonso Castro**

Se estima que, a escala global, la prevalencia de la enfermedad de Parkinson es del 0.3 % en la población en general, alrededor del 1 % en personas mayores de 60 años y del 3 % en personas mayores de 80 años (Poewe *et al.*, 2017). La enfermedad de Parkinson es el segundo trastorno neurodegenerativo más frecuente en el mundo, en el cual ocurre una disminución del 80 % al 90 % de los niveles de dopamina en el cerebro y hay una pérdida de entre 40 % y 60 % de las neuronas en la sustancia negra del cerebro.

Diversos estudios estiman que la cifra de pacientes con enfermedad de Parkinson se triplicará en el mundo durante las siguientes dos décadas y que, para 2040, será de alrededor de 17 millones (Poewe *et al.*, 2017). Por lo tanto, entre las enfermedades neurodegenerativas, este padecimiento es el de más rápido crecimiento a nivel mundial (Poewe *et al.*, 2017).

La prevalencia de la enfermedad de Parkinson se ha duplicado desde el año 2000. En 2019 se reportaron 8.5 millones de personas en el mundo diagnosticadas con la enfermedad de Parkinson y durante ese mismo año hubo 329,000 muertes debido a esta enfermedad (OMS, 2023). En México, la prevalencia de la enfermedad de Parkinson

varía de 40 a 50 casos por cada 100,000 habitantes por año (Secretaría de Salud, 2018).

La enfermedad de Parkinson causa discapacidad y puede ocasionar demencia. Las personas mayores de 60 años son las más afectadas, pero también hay casos en los que esta enfermedad ocurre en personas de alrededor de 40 años (OMS, 2023). Hasta ahora, las causas de la enfermedad de Parkinson son desconocidas; sin embargo, se han identificado algunos factores como los antecedentes familiares, la contaminación ambiental y ciertos plaguicidas que pueden estar involucrados en el desarrollo de esta enfermedad (OMS, 2023). Investigaciones recientes señalan que las alteraciones en la microbiota intestinal podrían ser uno de los factores desencadenantes de la enfermedad de Parkinson (Tanner y Ostrem, 2024).

LA ENFERMEDAD DE PARKINSON

El Parkinson es una enfermedad neurodegenerativa crónica que causa principalmente trastornos del movimiento. Sus manifestaciones clínicas tienen su origen en la pérdida de células nerviosas en una parte del cerebro llamada sustancia negra. Este trastorno progresivo se manifiesta por signos como temblor, rigidez muscular, lentitud de movimientos, movimientos involuntarios, dificultad para caminar y pérdida de equilibrio. Otras manifestaciones no motoras características de la enfermedad de Parkinson son la demencia, los trastornos del sueño, el dolor y las alteraciones sensoriales, entre otras (OMS, 2023).

La enfermedad de Parkinson fue dada a conocer en 1817 por James Parkinson, en un estudio donde reportó seis casos, describió el cuadro clínico y estableció el diagnóstico diferencial; él llamó por primera vez a esta condición médica “parálisis temblorosa”.

La levodopa es usada para mitigar los síntomas motores de la enfermedad de Parkinson, ya que se convierte en dopamina en el cerebro y, por tanto, compensa la deficiencia de este neurotransmisor en los pacientes (Tanner y Ostrem, 2024). Sin

embargo, este fármaco ocasiona reacciones adversas como náusea, baja presión arterial, confusión, alucinaciones, estreñimiento, boca seca, diarrea, pérdida del apetito, entre otros (Tanner y Ostrem, 2024). Otro medicamento muy usado para tratar la enfermedad de Parkinson es la combinación de levodopa y carbidopa, que aumenta la cantidad de dopamina en el cerebro (OMS, 2023). Hasta el momento, solo existen tratamientos para reducir los síntomas de esta enfermedad. Por otra parte, la fisioterapia puede ser de gran ayuda para mejorar la fuerza motora, la movilidad y el equilibrio.

A pesar de los avances en la medicina moderna, es necesaria la búsqueda de tratamientos eficaces y accesibles. La medicina tradicional ha sido una fuente importante de compuestos bioactivos que actualmente se usan para el tratamiento de diversos padecimientos como diabetes, infecciones microbianas y cáncer, entre otros (OMS, 2023). Es pertinente, por tanto, la búsqueda de compuestos de origen natural que puedan ayudar a combatir los síntomas asociados con la enfermedad de Parkinson.

INVESTIGACIONES MEXICANAS SOBRE COMPUESTOS VEGETALES CONTRA EL PARKINSON

No existen reportes que agrupen todas las plantas mexicanas utilizadas como potencial tratamiento contra la enfermedad de Parkinson, y no hay registros que comprueben de forma científica este potencial medicinal.

En la medicina tradicional mexicana no existe el término “enfermedad de Parkinson”, solo hay afiliaciones culturales como “susto”, “espanto” o “nervios”, que pueden referirse a enfermedades neurodegenerativas o trastornos mentales. Nuestro grupo de investigación está realizando el aislamiento e identificación química de compuestos derivados de plantas medicinales de México, especialmente de las familias Lamiaceae, Orchidaceae, Papaveraceae y Malvaceae, entre otras, que son usadas en el tratamiento empírico de trastornos como la ansiedad y la depresión. Anteriormente determinamos que algunos de estos compuestos pueden actuar a través del sistema dopaminérgico, que es un blanco terapéutico



© Ivette Tejero. *Tlacoleros de Tixtla Guerrero*. De la Serie México Mágico. Óleo/tela, 30 x 20 cm.

en la enfermedad de Alzheimer. Estos compuestos de origen vegetal son conocidos como metabolitos secundarios; se trata de compuestos orgánicos producidos por varios organismos, incluyendo las plantas, como un mecanismo de adaptación al estrés ambiental y de defensa ante depredadores y microorganismos patógenos.

Los modelos preclínicos, que incluyen el uso de animales de experimentación, constituyen una etapa importante en la evaluación farmacológica de nuevos compuestos. Antes de realizar un estudio clínico, es necesario presentar la seguridad de un compuesto, la forma en la que actúa y el tiempo que permanece en el organismo. Existe un modelo de inducción de signos asociados con la enfermedad de Parkinson mediante la administración del neuroquímico 1-metil-4-fenil-1,2,3,6-tetrahidropiridina (MPTP) en la cepa de ratones C57BL/6, la cual presenta una alta susceptibilidad a desarrollar manifestaciones motoras y neurológicas asociadas con la enfermedad de Parkinson. La inyección intraperitoneal de MPTP durante 5 días consecutivos es un modelo bien caracterizado que simula la enfermedad de Parkinson y que ha sido ampliamente usado para la búsqueda de tratamientos potenciales contra esta enfermedad neurodegenerativa. En este modelo se induce una degeneración bilateral del tracto nigroestriatal que, en los ratones, se traduce en acinesia, bradiquinesia y catalepsia. Este neuroquímico destruye el 60 % de las neuronas en la sustancia negra del cerebro y disminuye en un 76 % la producción de dopamina. En todos los estudios que se describen a continuación se empleó la cepa de ratones C57BL/6 y se usó el MPTP como agente inductor de síntomas asociados al Parkinson.

El D-pinitol es un compuesto de tipo poliol que identificamos por cromatografía de gases en la planta *Senna septemtrionalis*, conocida comúnmente como retama o candelilla. Esta especie vegetal es nativa de la América tropical y es usada en la medicina tradicional mexicana para tratar la epilepsia y la ansiedad. Estudios recientes de nuestro grupo de

investigación indican que este compuesto, administrado de manera oral por más de 20 días, protegió a ratones de la cepa C57BL/6 de tener síntomas asociados a la enfermedad de Parkinson como pérdidas de la coordinación motora, el equilibrio y la fuerza en las extremidades. D-pinitol disminuyó estos síntomas al evitar la muerte neuronal ocasionada por el agente neurotóxico MPTP.

Otra investigación realizada en México determinó que la administración de silimarina por más de 10 días protegió a las neuronas del daño y muerte ocasionados por el MPTP (Pérez *et al.*, 2014). La silimarina es una mezcla de varios flavonolignanos y se obtiene principalmente del cardo mariano (*Silybum marianum*), una planta de origen europeo. En una investigación posterior, se determinó que la administración oral por más de 7 días de silibina, el compuesto mayoritario de la silimarina, disminuyó el estrés oxidativo y la inflamación en el cerebro de los ratones (Ramírez-Carreto *et al.*, 2023). Este compuesto mejoró también las actividades locomotoras de los ratones.

El ácido valerénico es un compuesto bioactivo de la planta *Valeriana officinalis* que, aunque no es originaria de México, se usa en diversos medicamentos herbolarios avalados por COFEPRIS. La administración de este compuesto por 14 días disminuyó la inflamación en el cerebro de los ratones que recibieron el neuroquímico MPTP. El ácido valerénico actúa disminuyendo la neuroinflamación (Rodríguez-Cruz *et al.*, 2020).

Asimismo, el β -cariofileno, un compuesto de tipo sesquiterpeno obtenido del clavo (*Syzygium aromaticum*), mejoró la coordinación motora en los ratones a través de la disminución del estrés oxidativo y de la cantidad de mediadores inflamatorios en el cerebro (Viveros-Paredes *et al.*, 2017).

Los cinco compuestos mencionados (D-pinitol, silimarina, silibina, ácido valerénico y β -cariofileno) han sido probados en animales de experimentación y se descubrió que tienen efectos neuroprotectores. Es decir, podrían prevenir o retardar el desarrollo de enfermedades neurodegenerativas como el Parkinson. Sin embargo, es necesario realizar más estudios, por ejemplo, pruebas de toxicidad y otras

pruebas antes de poder efectuar un estudio clínico en seres humanos. Las investigaciones reseñadas constituyen un punto de partida en la búsqueda de compuestos que pueden ayudar a mejorar la calidad de vida de pacientes con la enfermedad de Parkinson. En estudios posteriores se podrían cuantificar los niveles de dopamina en el tejido cerebral de los ratones para determinar si alguno de estos compuestos es capaz de incrementar la concentración de dopamina en el cerebro, efecto deseable para el tratamiento de los síntomas de la enfermedad de Parkinson. También sería interesante evaluar la combinación de alguno de estos compuestos con la L-dopa, con el objetivo de disminuir la dosis de L-dopa de manera que se presenten menos efectos adversos. La combinación es posible debido a que estos compuestos de origen vegetal presentan un mecanismo de acción distinto al de la L-dopa.

PERSPECTIVAS

La herbolaria mexicana puede ser una fuente importante de biomoléculas activas que puedan prevenir el desarrollo de enfermedades neurodegenerativas como el Parkinson. Nuestro país cuenta con información muy valiosa sobre el uso de plantas medicinales para el tratamiento de enfermedades relacionadas con el sistema nervioso central. Sin embargo, los compuestos activos y los efectos farmacológicos de muchas especies vegetales aún no se han reportado científicamente. En este trabajo hemos mostrado que diversas plantas usadas en la medicina tradicional mexicana tienen compuestos con efectos neuroprotectores en ratones a los que se les indujeron síntomas asociados con la enfermedad de Parkinson. Estos efectos se deben a la disminución de la inflamación, del estrés oxidativo en el cerebro y a la prevención de la muerte neuronal. Los efectos neuroprotectores no implican que puedan ser empleadas para el tratamiento de la enfermedad de Parkinson, solamente indican que, en el modelo empleado para los estudios, disminuye la probabilidad de la aparición y desarrollo de enfermedades neurodegenerativas. Si bien estos datos aportan conocimiento para el posible

aprovechamiento de recursos naturales con fines terapéuticos, se requieren más investigaciones antes pasar a la fase de estudios clínicos en seres humanos. Para llegar a ese punto del trabajo se requiere la participación interdisciplinaria de especialistas en biología, farmacología, toxicología, medicina y fitoquímica, entre otras áreas.

REFERENCIAS

- Organización Mundial de la Salud (2023). Enfermedad de Parkinson. Recuperado de <https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/parkinson-disease>.
- Pérez-H J, Carrillo-S C, García E *et al.* (2014). Neuroprotective effect of silymarin in a MPTP mouse model of Parkinson's disease. *Toxicology* 319: 38-43. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tox.2014.02.009>.
- Poewe W, Seppi K, Tanner C *et al.* (2017). Parkinson disease. *Nature Reviews in Neurology* 3(6):1-21. DOI: <https://doi.org/10.1038/nrnp.2017.13>.
- Ramírez-Carreto RJ, Zaldívar-Machorro VJ, Pérez-Ramírez DJ *et al.* (2023). Oral Administration of silybin protects against MPTP-induced neurotoxicity by reducing pro-inflammatory cytokines and preserving BDNF levels in mice. *Molecular Neurobiology* 60(12):6774-6788. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12035-023-03485-7>.
- Rodríguez-Cruz A, Romo-Mancillas A, Mendiola-Precoma J, *et al.* Effect of valerenic acid on neuroinflammation in a MPTP-induced mouse model of Parkinson's disease. *International Brain Research Organization Reports* 8:28-35. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ibror.2019.12.002>.
- Secretaría de Salud (2018). Diagnóstico y tratamiento de la Enfermedad de Parkinson inicial y avanzada en el tercer nivel de atención. Guía de referencia rápida. Recuperado de: <https://www.facmed.unam.mx/sig/css/GPC/SIDSS-GPC/gpc/docs/SSA-305-10-RR.pdf>.
- Tanner CM and Ostrem JL (2024). Parkinson's Disease. *The New England Journal of Medicine*, 391(5):442-452. DOI: <https://doi.org/10.1056/NEJMr2401857>.
- Viveros-Paredes JM, González-Castañeda RE, Gertsch J *et al.* (2017). Neuroprotective Effects of β -caryophyllene against dopaminergic neuron injury in a murine model of Parkinson's disease induced by MPTP. *Pharmaceuticals* 10(3):60. DOI: <https://doi.org/10.3390/ph10030060>.

Luis Jesús Castillo Pérez
Facultad de Estudios Profesionales Zona Huasteca
Universidad Autónoma de San Luis Potosí
Ángel Josabad Alonso Castro
División de Ciencias Naturales y Exactas
Universidad de Guanajuato
angeljosabad@ugto.mx



© Ivette Tejero. *Huehues de Tlaxcala*. De la Serie México Mágico. Óleo/cartón, 43 x 28, 2022.

Art decó: centenario de la Exposición Internacional de Artes Decorativas e Industrias Modernas

Ramón **Ramírez Ibarra**

Del 29 de abril al 25 de octubre de 1925 se celebró en París la Exposición Internacional de Artes Decorativas e Industrias Modernas, ubicada en la explanada de Les Invalides, justo entre las entradas del Grand Palais des Champs-Élysées y el Petit Palais (Figura 1). A cien años de este evento que marcó un hito cultural moderno, quisiera plantear un recorrido histórico partiendo de los principales tópicos de discusión estética que hicieron posible el surgimiento de la abstracción artística sustentada en una valoración de la ciencia y la tecnología del primer tercio del siglo XX.

Esta época trajo un escenario de innovaciones técnicas en las primeras máquinas. Las calderas de vapor impulsadas por carbón mutaron a motores de combustión propulsados por petróleo, mientras la movilidad ferroviaria enfrentaba ahora la competencia de autos y aeroplanos; además, la química inorgánica se complementaba con el desarrollo de la orgánica, indispensable en la producción masiva de fármacos. Las tecnologías de sistemas eléctricos mejoraron y nuevos medios de comunicación aparecieron. La radio y el cine amplificaron el alcance mediático de la cultura impresa. La industria pasó a demandar mayores

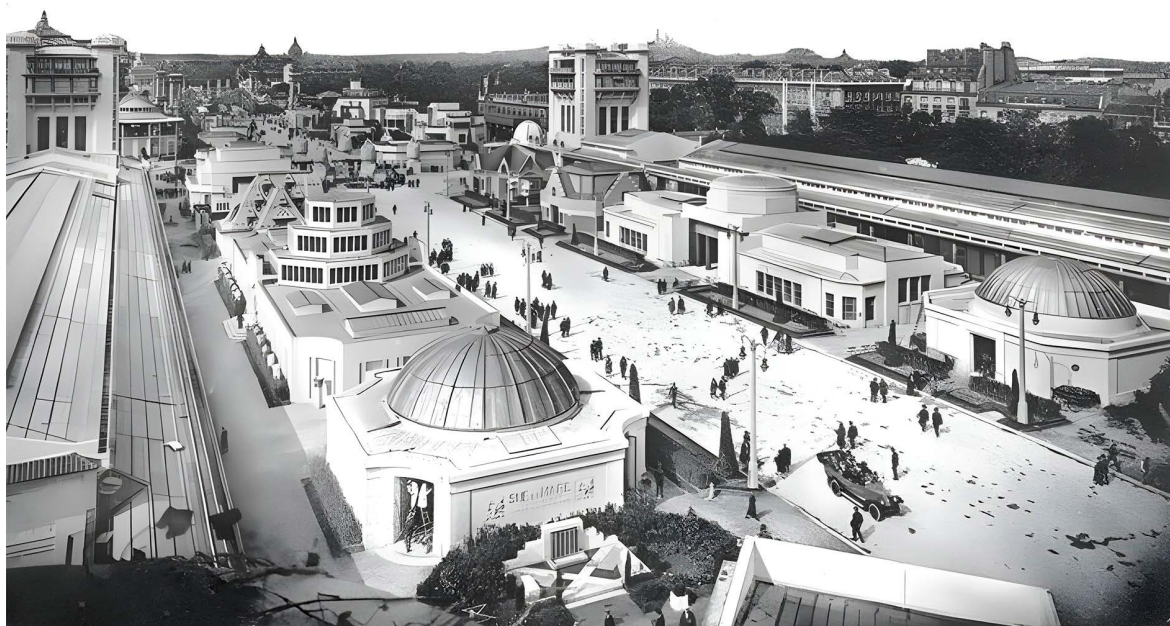


Figura 1. Panorama de la Exposición Internacional de Artes Decorativas e Industrias Modernas de 1925. Imagen de dominio público.

niveles educativos de la sociedad con saberes enfocados en el perfeccionamiento de los procesos productivos. Así, una segunda revolución industrial tomó el relevo de la acaecida entre los siglos XVIII y XIX en Inglaterra, motivada por una transformación tecnológica de carácter global (Zamagni, 2011).

Los estados nación y sus burguesías apostaron al dúo entre comercio y tecnología, manifestándose a través de grandes consorcios empresariales que requerían una circulación constante de novedades. Estas se presentaban en las ferias internacionales, que tuvieron cifras multitudinarias de visitantes en la Gran Exposición de Londres (1851) o las primeras ferias de Nueva York (1853) y París (1855). Pero, a fines del siglo XIX, dichos eventos, además de su significado comercial, requirieron un contacto cada vez más intenso entre mercados y primicias tecnológicas, debido a características inéditas en sus espacios como la realización de transacciones económicas sin tener que mover recursos u objetos al evento muestra, dándoles a estos una función de exhibición anticipada de productos.

Un momento importante en esta serie de eventos fue la Exposición Universal de París (1889), donde se vivió un curioso oxímoron entre la representación de la tecnología y las artes. La Torre Eiffel, símbolo principal de este evento, trató de articular un lenguaje común entre arquitectura e ingeniería, todavía bajo el eclecticismo, tendencia historicista basada en una visión estructural combinada con una plástica tradicional. La contradicción entre progreso técnico y pasado artístico reflejó un agotamiento en las convenciones compositivas, las cuales, en el caso francés, provenían del popular ideario restaurativo de las catedrales medievales propuesto por E.E. Viollet-le-Duc. La modernidad industrial recurría a un imaginario tecnológico que parecía agotado. En respuesta, nuevas generaciones de artistas y arquitectos experimentaron una vuelta a modelos exóticos o cosmopolitas.

Cuarenta años antes, el Palacio de Cristal de Joseph Paxton, experimentado paisajista y constructor de invernaderos, capturó la imaginación progresista del público con una imponente estructura de hierro y vidrio ordenada en una forma clásica; en los albores del siglo XX algo faltaba en esa comunicación



Figura 2. Comparativa de carteles de las exposiciones francesas de 1925-1931. Elaboración propia a partir de imágenes de dominio público.

o puente entre tecnología y experiencia estética. Aquí surgió ese momento modernizador de las artes que el filósofo alemán Jürgen Habermas (2002:26) caracterizó como pluralismo estilístico basado en el olvido de una reconciliación entre tradición y novedad. Dicha olvidanza tomó los nombres de Art Nouveau (Francia), Sezession (Austria), Jugendstil (Alemania), Modern Style (Gran Bretaña) o Liberty (Italia). Sus artistas tuvieron en común una oposición al academicismo mediante el uso de formas orgánicas, alternancia en el uso del color, secuencias de motivos étnicos, manejo arrítmico de volúmenes y un vocabulario ornamental que disolvió la hegemonía del clasicismo mediante un acercamiento a las artesanías y la naciente industria manufacturera.

LA EXPOSITION INTERNATIONALE DES ARTS DÉCORATIFS ET INDUSTRIELS MODERNES, 1925

Eva Weber (1993), reconocida historiadora del tema, señala que la idea de esta exposición surgió en 1912 como reacción al movimiento Deutscher Werkbund de Alemania, pero con el estallido de la Primera Guerra Mundial hubo que ponerse en pausa, interrumpiendo un ciclo de interesantes colaboraciones de artes gráficas, artesanías y talleres.

El movimiento Deutscher Werkbund fue una asociación entre artistas y arquitectos que se remonta a 1907 bajo el liderazgo del político y arquitecto Hermann Muthesius, que contó con importantes figuras del arte y la arquitectura moderna como Josef Maria Olbrich, Peter Behrens, Lilly Reich y Henry Van de Velde. Una de las ideas defendidas férreamente en sus manifiestos fue la creación de una simbiosis entre arte e industrialización como una instancia económica para la generación de productos y objetos de exportación.

Esta rivalidad creativa tomó forma desde una competencia mercadológica entre artistas y estados. Un grupo de colaboradores, entre los que destacaron el ebanista Paul Follot (1877-1941), el diseñador Maurice Dufrène (1876-1955) o el arquitecto Pierre Chareau (1883-1950), recuperaron la idea del evento en 1925, debido al interés del gobierno motivado por un posicionamiento político y económico. Trabajos en tejidos y alfombras de Sonia Delaunay-Terk (1885-1979) y Raoul Dufy (1877-1953), bisutería de Gérard Sandoz Cartier (1902-1995), Jean Puiforcat (1897-1945) o Paul Brandt (1883-1952), muebles de Émile-Jacques Ruhlmann (1879-1933), René



Figura 3. Vista de fotograma de la película *La inhumana*. Fuente: Réplica de Ximena Hernández Thomas.

Herbst (1891-1982) o Eugène Printz (1889-1948), se convirtieron en objetos que capturaron la imaginación y el deseo de aristócratas europeos como la duquesa de Alba o la baronesa Eugène de Rothschild (Maenz, 1974).

Además, utilizando el sitio del evento como una muy particular expresión de imagen arquitectónica, se propuso una combinación entre la visión geométrica del arte racionalista y una plástica inspirada en una visión de lo exótico proyectada desde lo nacional. Este imaginario promocionado por la Tercera República francesa (1870-1940), se nutría de un pensamiento colonialista en el cual el gobierno trataba de potenciar una especie de refundación cultural a través de productos y decoraciones vinculadas a sus posesiones y protectorados del norte africano, Indochina, Medio Oriente y el Caribe. Dicha visión se extendió con la Exposición Colonial de 1931, en la cual dominó la apelación primitivista y arqueológica, como efecto del interés y éxito comercial de la exhibición ahora recordada (Figura 2).

ESTADOS UNIDOS Y LA EXPOSICIÓN DEL 25: DEL CINE A LA ARQUITECTURA

Una notable discusión en una disciplina en particular, la arquitectura, transitó con la exposición. A

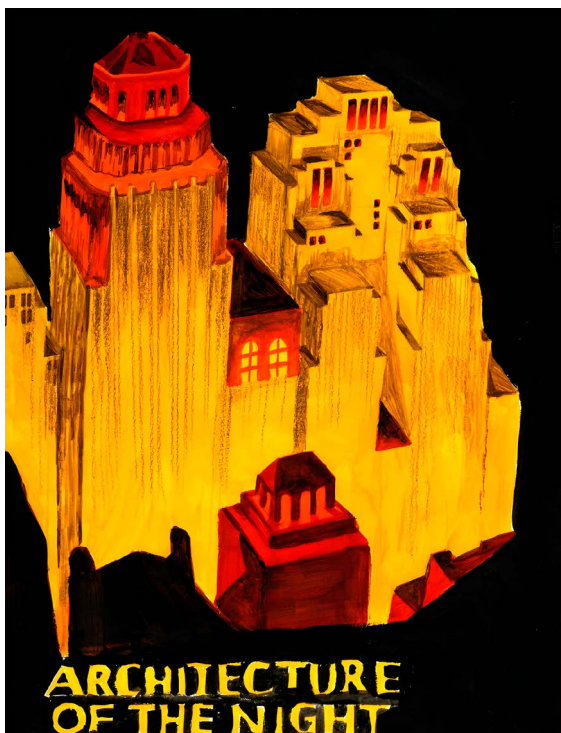


Figura 4. Portada de *Architecture of the Night*. Fuente: réplica en tinta de Tabatha Paola León Elizondo.

través de una decena de pabellones bajo una visión de lo moderno que aún no superaba el historicismo, se fincó en términos de producto industrial una hibridación cultural bajo un fondo de exotismo, haciendo perceptible una mirada optimista al futuro. Los Estados Unidos, con su economía boyante y ajena a la reconstrucción europea de la recién terminada Primera Guerra Mundial, fusionaron a través de los llamados “locos años veinte” y el *american way of life* toda una imagería del consumo y la producción emanada de su creciente industria inmobiliaria (Sternau, 1997).

En esta perspectiva, Román Gubern (2015) ha explorado el papel de una tecnología en específico que sería la contraparte a la política de difusión de las vanguardias: el cine y la industria de Hollywood. Robert Mallet-Stevens (1886-1945), presidente de la Unión de Artistas Modernos (1929) y el director de cine Marcel L'Herbier (1888-1979), produjeron las películas *La inhumana* (1924) y *El vértigo* (1926) que causaron un gran impacto en la crítica americana, exportándose más tarde a la escenografía de sus films (Figura 3).



Figura 5. Terminal de Ómnibus de Cleveland, 1936. Fuente: elaboración propia.

La arquitectura influyente en estas escenografías presentó una visión geométrica vertical basada en el uso del concreto armado a gran escala, el rascacielos, con una imagen de lo cinético-abstracto como telón de fondo panorámico alejada de la primera modernidad de Chicago –Adler y Sullivan–, mientras en el diseño de ambientes interiores dominaron las nociones de confort y sofisticación orientadas a una supresión ornamental. Los volúmenes zigzagueantes de esos rascacielos impulsaron una reinterpretación del *art déco* francés, mientras los espacios internos claros, abiertos y suntuosos gracias al uso del mármol, apelaban a un lujo con cierto remanente elitista o aristocrático.

La visión tecnológica de la arquitectura americana llevó esta búsqueda de lo cinético-visual a los edificios de iluminación nocturna. Sin tener ambiciones de manifiesto como en su contraparte europea, el galardonado arquitecto estadounidense Raymond Hood en *Architecture of the Night* (1930), expresó a través de los panfletos comerciales de la compañía General Electric las aspiraciones de novedad y progreso encarnadas en la posibilidad de apreciación visual del ambiente urbano nocturno (Figura 4).

En la década de los treinta, los nuevos aparatos de comunicación electrónica influyeron en la generación de iconos visuales-urbanos más fluidos que sustituyeron formas escultóricas y vocabulario estilístico de remates, molduras, guardapolvos y



Figura 6. Vista del pabellón de General Motors en la Feria Mundial de Nueva York. Fuente: Licencia: <https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/>.

ochavos en cerramiento de la vertiente francesa, por una plástica orientada a las formas de motores, fuselaje de aviones y transatlánticos, denominada Streamline, aplicada a numerosos espacios y tipologías (Figura 5).

Aquí es importante señalar que el ciclo de exposiciones industriales, menguante después de la recesión económica de 1929, revivió en Estados Unidos gracias a la promoción de una visión escapista y consumidora de la sociedad, la cual se hizo visible a través del imaginario tecnológico de sus ciudades y arquitecturas, en abierta confrontación con las imágenes futuroológicas promovidas por las proyecciones colosales del fascismo y el vanguardismo racionalista, en un inicio vinculado al comunismo.

La Exposición Mundial de Nueva York de 1939 (Figura 6), conocida como Construyendo el mundo del mañana, prospectó una estética aerodinámica del capitalismo americano. Una visión de macrociudad donde sus pabellones aludían una tecnocrática ambición global, como en el famoso Futurama de la General Motors. Estos hicieron de la verticalidad un símbolo del progreso futuro del mundo (Canogar, 1996). La exposición de 1925 y su recepción en la arquitectura norteamericana son parte de una mutación del colonialismo francés al futurismo tecnológico liberal.



Figura 7. Pabellón “El espíritu nuevo” de Le Corbusier. Fuente: dominio público.

LA EXPOSICIÓN DE 1925 Y LA ESCISIÓN MODERNA EUROPEA

En Europa, en el instante mismo del evento, hubo un contexto arquitectónico mucho más complejo, específicamente desde la exhibición de los pabellones de Le Corbusier y Konstantin Melnikov. Por un lado, la experiencia del racionalismo suizo y, por otro, del constructivismo soviético y escuelas de diseño moderno como Vkhutemas, representaban la visión de las vanguardias artísticas y arquitectónicas europeas, decididas a romper en definitiva con el historicismo promoviendo un imaginario maquinal a través de un programa que abarcara tanto forma como espacio interior. Ponderemos sus diferencias con el *déco* a fin de resignificar el gesto que llevó a los organizadores del evento a tratar de bloquear, mediante una cerca, la exhibición del pabellón *L'Esprit Nouveau* de Le Corbusier (Figura 7).

La tendencia *déco* fue una expresión modernizadora en cuanto a interacción de la técnica con fines comerciales. Gestada dentro de una lógica patrimonial, aspiraba a producir objetos bellos y consumibles, fuese un collar, un mueble o una casa. De cierta forma, no es muy diferente en intención a las exposiciones del último tercio del siglo XIX. Las

vanguardias artísticas, empero, tenían un objetivo más ambicioso; ciencia y técnica no solo eran agentes de producción, sino formas de interacción social influyentes en usos y representaciones de las cosas. Por lo tanto, el objeto arquitectónico orientaba su composición y estructuración desde los materiales aplicados, producto de una época precisa, al proyecto y su producción racionalmente cumplida en el producto como una relación de costo-eficiencia; por ende, el iconografismo arqueológico o colonial no tenía cabida en sus proyecciones.

En las vanguardias arquitectónicas se ofrecía una solución técnica aplicada, inspirada no en el artista o la artesanía, sino en los ingenieros. La Deutscher Werkbund, antagonista de la Exposición de 1925, presentó en 1927 la Colonia Weissenhof de Stuttgart, una exhibición que partía de vivienda real objetivada como solución tecnológica y que tuvo entre otros expositores a figuras del movimiento moderno internacional como Walter Gropius, Le Corbusier, Mies Van Der Rohe o J. J. P. Oud con una idea muy proactiva: las nuevas técnicas de construcción crean nuevas formas de vida. Los organizadores de la Exposición de 1925, deudores de la experiencia colonialista de la primera revolución industrial, avocados a una recuperación de la tradición frente a una experiencia temporal cada vez más efímera y contingente, enfrentaron esta idea con la censura, pero más tarde apareció con espontaneidad en diversos lugares del mundo por medio de un *art déco* influido por variantes de estilemas y materiales locales, convirtiéndose más en coadyuvante receptivo que antagonista de la modernidad arquitectónica racionalista.

EL ART DÉCO EN MÉXICO

En México, y concretamente en el período posrevolucionario, aparecieron las primeras expresiones renovadoras del eclecticismo difundido en el porfiriato y aún persistente en la etapa constitucionalista. Artistas del movimiento estridentista y muralista tuvieron importantes conexiones con las nuevas tendencias vanguardistas y prepararon el terreno para una difusión que pasó de la Ciudad



Figura 8. Centro Escolar Revolución en 1934. Fuente: archivo fotográfico IIE-UNAM.

de México a las entidades federativas, adoptando desde variantes neomayas en Yucatán a formas monumentales en escuelas y edificios públicos como en Nuevo León. En la capital, arquitectos como Carlos Obregón Santacilia, José Villagrán García, Vicente Mendiola, Guillermo Zárraga, Manuel Ortiz Monasterio, Francisco Serrano y Juan Segura Gutiérrez, entre otros, tendieron un puente tanto en dirección reconciliadora con formas tradicionales, en un primer momento, y más tarde a direcciones rupturistas que pronto tomaron una referencia urbana en colonias como Hipódromo Condesa o Roma.

La popularidad del *art déco* transitó entre la adopción del lenguaje neocolonial e indigenista con una primera generación de obras cuyo arranque es el edificio de la Secretaría de Salud (1925) de Obregón Santacilia, a edificios como la Alianza Ferrocarrilera de Greenham & Alvarado (1926) o el Instituto Mier y Pesado (1926) de Juan Segura y Manuel Cortina, hasta la expresión de obras públicas que enmarcaron la tendencia desde el ángulo patrimonial como el Monumento a la Revolución o el Centro Escolar

(Figura 8) de Antonio Muñoz García (1934). Tras los vaivenes interpretativos de esta corriente y el famoso debate Pláticas sobre la arquitectura convocado por la Sociedad de Arquitectos Mexicanos (1933), donde el tema a discusión enfrentó posicionamientos historicistas o partidarios de la conservación de elementos ornamentales con los seguidores del funcionalismo corbusiano como Juan O'Gorman y Juan Legarreta.

El papel secundario de esta tendencia en la historia de la arquitectura moderna mexicana fue ilustrado por el célebre teórico y arquitecto José Villagrán García a manera de memorial en torno a esta primera época:

[...] en la que se sostiene la reacción contra el exotismo y se inaugura e intenta una creación no sólo nacional, sino a la vez actual. Esta reacción se finca fundamentalmente en lo ornamental o lo decorativo de las formas, sin alcanzar la

comprensión integral de lo arquitectónico, por lo que propiamente da origen a lo que hemos denominado nacional y actual, pero individualista” (2001:58).

La gradual preferencia mexicana por la vanguardia arquitectónica racionalista no estuvo exenta en los años cuarenta de apelar a variantes *déco* como el *streamline*. Reconocidas figuras del funcionalismo como Agustín Yañez o Mario Pani plantearon obras en esta tendencia a través de vivienda en régimen departamental y usos mixtos.

El éxito en esta tipología aerodinámica propulsó su aplicación a edificios comerciales de oficinas y cines. Ciudades mexicanas como Guadalajara, Monterrey, Torreón, San Luis Potosí o Chihuahua conservan aún los vestigios de esta corriente modernizadora que terminó ampliando horizontes mucho más allá de su exposición iniciática.

CONCLUSIÓN: ART DÉCO, VALOR Y SIGNIFICADO

En la famosa exposición de 1925 tenemos un origen histórico preciso, aunque también ambiguo, para valorar su significado. El Art Decó en las historias del arte ocupa un lugar ocasional dentro de la narrativa de las vanguardias y marginal en la arquitectura moderna. El historiador mexicano Enrique X. De Anda (1997) se ha referido a esta tendencia como una especie de significación plástica y conceptual que combina composición e iconografía dentro de una expresión modernizadora de las artes y la cultura.

Para Alistair Duncan (1994) lo que llamamos *art déco* es una corriente francesa de las artes aplicadas que se nutre de una multitud de influencias vanguardistas como el cubismo, futurismo y constructivismo, sin una motivación impulsada por la guerra o la depresión económica (1929) directamente, sino vía experimentación plástica de lo moderno en tránsito, cuyas diferencias con el vanguardismo proceden de espacios, influencias y contextos de comunicación.

Esto es importante para identificar el origen del término. Como tendencia estilística unitaria surgió hasta 1966 con la retrospectiva *Les Années 25* organizada por el Musée des Arts Décoratifs de París bajo la dirección de la curadora Yvonne Brunhammer (1927-2021). En este evento, se creó el concepto en tanto rescate patrimonial, lo cual explica su ausencia de manifiestos y la poca atención de la crítica o la historiografía de la arquitectura moderna, a pesar de que en su difusión trató de alinearse a las tendencias vanguardistas. Empero, hay que señalar la notable influencia ejercida por su plástica en diversas ciudades del planeta, así como el diseño de objetos atractivos y funcionales cuya huella persiste a nivel comercial. En la actualidad, su imaginario aún captura el interés mediático desde el paisaje turístico de ciudades como Miami, Casablanca y Mumbai o se revalora como objeto *vintage* en una cultura posmoderna necesitada de abundantes mitos creativos y seducciones culturales.

R E F E R E N C I A S

- Astrágalo: *Cultura de la Arquitectura y la Ciudad*, 4:17-30.
- De Anda EX (1997). *Art Déco. Un país nacionalista/Un México cosmopolita*. Instituto Nacional de Bellas Artes, México.
- Duncan A (1994). *El Art Déco*. Destino, Barcelona.
- Gubern R (2015). Fundación Juan March. Recuperado de Art Déco en el cine: <https://www.march.es/es/madrid/conferencia/universo-deco-i-art-deco-cine>.
- Habermas J (2002). *Escritos políticos*. Península: Barcelona.
- Maenz P (1974). *Art Decó:1920-1940*. Gustavo Gili: Barcelona.
- Sternau S (1997). *Art Decó. Flights of Artistic Fancy*. Diane Pub Co: USA.
- Villagrán G (2001). *Textos escogidos*. Conaculta: México.
- Weber E (1993). *Art Decó*. Libsa: Madrid.
- Zamagni V (2011). *Historia económica de la Europa contemporánea*. Crítica: Barcelona

Ramón Ramírez Ibarra
Facultad de Arquitectura
Universidad Autónoma de Nuevo León
rramib44@gmail.com

Rápido y sin pensar: sobre la impulsividad

María Fernanda **Guardado Xolo**
Ana Lis **Heredia Espinosa**

¿Alguna vez te has preguntado cuántas decisiones tomas de manera impulsiva a lo largo de tu vida? Desde iniciar una discusión solo por miedo a quedarte en silencio, hasta encender un cigarrillo antes de recordar que intentabas dejar el hábito, la impulsividad es una fuerza que atraviesa decisiones grandes y pequeñas. Es la reacción que se anticipa al pensamiento (Abella Pons *et al.*, 2015). Por ello, la psicología se ha interesado tanto en estudiarla, medirla, clasificarla y desarrollar estrategias para contrarrestarla.

¿QUÉ ES LA IMPULSIVIDAD?

Históricamente, el acto impulsivo ha sido una inquietud observada tanto con angustia como con fascinación no solo por la psicología, sino también por otras disciplinas como la filosofía. Los estoicos, por ejemplo, ya advertían sobre la pasión como una amenaza al dominio racional y, mucho antes, Platón la describía en su alegoría del carro alado, ilustrando la lucha de fuerzas opuestas en el alma –el alma racional y el alma irascible. No es sorprendente entonces que, tras siglos de ser contemplada con desconfianza, la impulsividad terminara atrayendo la mirada de la psicología como un fenómeno digno de estudio y entendimiento. El acto impulsivo es la fuerza que nos golpea antes de preguntar. Y, ciertamente, su

etimología no decepciona, pues *impulsus*, del latín, literalmente quiere decir “golpear” o “empujar” (Sánchez *et al.*, 2013). Si bien su estudio ha atravesado las décadas, definir la impulsividad con precisión todavía es una tarea compleja debido a su naturaleza multifacética.

Pero, ¿qué es en esencia la impulsividad? A primera vista, podría pensarse como una emoción o incluso una reacción. Sin embargo, los autores coinciden en que la impulsividad es, más bien, un rasgo de personalidad, un patrón del ser relativamente estable a lo largo del tiempo (Abella Pons *et al.*, 2015).

Entre los estudiosos que se han aproximado al constructo con la intención de analizarlo con mayor profundidad destaca Ernest S. Barratt (1994), quien lo define como un rasgo de personalidad complejo, vinculado al actuar precipitado y sin planificación (citado en Vales *et al.*, 2018; Rueda *et al.*, 2016). Esta tendencia puede expresarse mediante la conducta observable y que, además de caracterizarse por el actuar apresurado y sin reflexión, suele desentonar con el contexto y trae consigo un elevado nivel de riesgos.

Una escena quizás demasiado humana que esclarezca esta idea puede ocurrir cuando, en medio de una discusión, uno levanta la voz o lanza un golpe sobre el escritorio en un intento de enfatizar cierto punto, pero sin detenerse a pensar en el efecto que el arrebato podría tener sobre la relación o sobre la imagen que uno mismo ha construido. Este componente se ha descrito como “impulsividad motora”, una suerte de “acción por la acción”, como ya lo mencionaba Barratt (citado en Vales *et al.*, 2018). Sin embargo, abordar la impulsividad como un fenómeno unidimensional sería ignorar su carácter multidimensional. El constructo va mucho más allá de una reacción puramente motora. De manera simultánea, la impulsividad puede presentarse como un fenómeno cognitivo, asociado con la capacidad con la que se hace frente a tareas caracterizadas por la incertidumbre. En este caso, la conducta impulsiva recae, no en el acto motor en sí, sino en el mecanismo mental apresurado y

proclive al error. Como si lo importante fuera resolver la tarea ya, y no necesariamente resolverla bien. De ahí que se observe un rendimiento intelectual significativamente inferior en sujetos impulsivos frente a sujetos reflexivos, destacando la propensión a desarrollar problemas de aprendizaje en el ámbito académico. A nivel cognitivo, un ejemplo de impulsividad ocurre cuando emitimos un juicio apresurado que desemboca en una narrativa completa sin tomarnos la molestia de confirmar los hechos. Basta con una voluntad impaciente y una interpretación parcial para que la impulsividad cognitiva encuentre terreno fértil donde prosperar, y la mente se equivoque con convicción.

ALGUNOS DATOS INTERESANTES SOBRE LA IMPULSIVIDAD

Ahora bien, ¿cómo nace la impulsividad? ¿Se trata de algo innato o es más bien algo que desarrollamos con el paso del tiempo? Para algunos, la idea de que el rasgo de personalidad impulsivo pueda estar inscrito en la arquitectura genética o en la biología funciona como una coartada parcial frente a la culpa que se cierne tras el acto irreflexivo. Como si el arranque se tratase de una huella primitiva trazada incluso antes de haber desarrollado conciencia. Es innegable la influencia de estos factores sobre la predisposición al desarrollo de ciertos rasgos de personalidad. Por ejemplo, se ha visto que algunos componentes del temperamento —esa pieza de la personalidad con alta carga genética que se asocia principalmente a la velocidad e intensidad de reacciones emocionales, y cuyos ecos pueden advertirse desde los primeros meses de nacimiento, determinando si los niños tienden a reaccionar con furia casi volcánica o, por el contrario, se muestran sorprendentemente serenos— se hallan relacionados con los resultados de ciertas pruebas de inhibición conductual y toma de decisiones (Aguilera y Ostrosky, 2013). Por otro lado, otro factor biológico importante en el control de impulsos es la corteza prefrontal, una estructura que se encuentra al frente del cerebro y que actúa como un faro racional. Esta región es una masa de

tejido que se enciende como una lámpara tenue cuando nos detenemos a pensar, pero que, si se avería, puede ocasionar dificultades para detener, iniciar o planificar una acción (Lezak, 1982, citado en Tirapu Ustárroz *et al.*, 2012).

Entre las coincidencias biológicas que envuelven la naturaleza humana, no todo destino está escrito. Dependiendo de las circunstancias y del entorno, hay genes que duermen eternamente y otros que se activan. Esto ocurre por un proceso de modificación del ADN que determina cómo se expresará nuestra herencia genética (Ponce y Díaz, 2019).

Experimentos con ratas revelan que el escaso o nulo acicalamiento maternal en las primeras etapas de la vida dejaba en ellas una huella emocional que modificaba el código biológico. La ausencia del cuidado materno activa ciertos genes vinculados al manejo del estrés. Este hecho se vuelve una metáfora de tantas maternidades humanas quebrantadas, donde el abuso no deja únicamente marcas físicas, sino también biológicas (Ponce y Díaz, 2019).

Asimismo, el cuidado materno deja sus ecos en ciertos sistemas fisiológicos. El eje hipotálamo-hipofisiario-adrenal (HPA), una especie de oráculo emocional que se altera con las tragedias tempranas –como la carencia de cuidado materno en la infancia–, y su desajuste repercute en la manera en que se responde al estrés. Además, se ha demostrado que cuando el eje HPA no funciona de la mejor manera puede incrementar la posibilidad de desarrollar trastornos neuropsiquiátricos que implican desregulación emocional, haciendo a la persona más propensa a comportamientos impulsivos (Archer *et al.*, 2012).

El cerebro registra más de lo que creemos, y las EAls dejan huellas persistentes en su estructura (Archer *et al.*, 2012), pavimentando las rutas que se vinculan con el miedo y con la desconfianza. Responder ante el mundo como si el peligro y la amenaza fueran la norma, y no la excepción, es una consecuencia habitual en este tipo de alteraciones neurofisiológicas. Su impacto puede alterar la forma en que los individuos sienten y procesan las emociones, y puede influir directamente en la incidencia de conductas de riesgo (Jebraeili *et al.*, 2023).

¿QUÉ PAPEL JUEGAN LAS EMOCIONES EN NUESTRA VIDA?

No obstante, si bien el impulso es en ocasiones provocado y alimentado por manos ajenas (Ladrón de Guevara, 2024), otras veces brota como un incidente súbito e íntimamente ligado a la complejidad emocional humana. Como una “urgencia”. Aunque se imagine al ser humano como un animal racional, frente a ciertas agitaciones muchos ceden al descontrol emocional. El resultado de lo que algunos llaman “tormentas internas” es el desbordamiento de esta emocionalidad no dominada. A veces la impulsividad viene como consecuencia de una alegría desbordante; en otras, deriva de una profunda melancolía, miedo o cólera. Estudios recientes confirman que cuando el dolor emocional es tan intenso, esa “urgencia” puede conducir a actos autolesivos como una vía de escape hacia la calma (Elliott *et al.*, 2023). Entonces, más allá de la genética, la biología y la crianza, la impulsividad está vinculada también con la facultad de regular el sentir (Ladrón de Guevara, 2024). Algunos cuerpos arden más rápido que otros, y no por elección. Pero el conflicto no reside en el “sentir” o “no sentir”, sino en saber controlar cómo se expresa y qué se hace con ello.

En ausencia de herramientas, el cuerpo actúa por inercia y como una falla de contención; una respuesta primitiva impropia de quien valora el control. El aburrimiento, en cambio, más que considerarse una emoción misma, es visto como un estado. Puede parecer inofensivo, pero esta búsqueda desesperada de intensidad es la antesala de muchas decisiones absurdas que se relaciona con diversos comportamientos impulsivos y destructivos, como actividad criminal, violencia, juego compulsivo y conductas sexuales, por nombrar algunas. En un intento por sentirse “más vivos”, muchos terminan arrojándose a experiencias “por la anécdota”, incluso cuando implican riesgo.

LA ADOLESCENCIA: EL ESCENARIO DE LA IMPULSIVIDAD

Quizás la adolescencia sea el escenario más adecuado por tratarse de un periodo en el que se entrelaza

la emoción de descubrir nuevas cosas con la insoponible repetición de la cotidianidad. Nadie conoce el aburrimiento con tanta frecuencia e intensidad como un adolescente y, a su vez, nadie es capaz de arrastrar consigo las consecuencias de este hastío. El adolescente ha sido encarnado en el cine, la dramaturgia y la literatura como una figura casi mítica que representa la rebeldía, lo pasional y lo impulsivo. Desde Antígona hasta Medea, al adolescente se le adjudica un espíritu intenso e impaciente. Ícaro es joven y desobedece a su padre, lanzándose al vuelo con alas de cera hacia el sol. No lo hace por idiotez, sino por la promesa de una libertad que desconoce. Y cae.

Durante la adolescencia, la mente es un palacio aún en andamiaje. Algunas salas siguen sin ser habitables del todo. Explicado desde las neurociencias, en esta etapa ciertas regiones cerebrales no han terminado de desarrollarse todavía, especialmente las encargadas de frenar impulsos o tomar decisiones (Tirapu *et al.*, 2012). Por el contrario, circuitos vinculados a la curiosidad y a la búsqueda de experiencias nuevas y emocionantes suelen desarrollarse más temprano. En este sentido, la impulsividad no es una característica accidental en este rango etario, sino un diseño. Perseguimos estímulos y sensaciones como una necesidad casi visceral debido a que nuestra forma de procesar las recompensas en este momento de la vida adquiere mayor sensibilidad (Luna *et al.*, 2013). Pero la búsqueda no es solo neuroquímica, sino simbólica: pertenencia, aceptación; la construcción de identidad. Erik Erikson hablaba de una crisis de identidad que se da justo en la adolescencia, una etapa en la que el joven tantea caminos, prueba máscaras y cuestiona su reflejo. Es entonces cuando el impulso no siempre aparece como un deseo por adrenalina, sino como la necesidad de encajar en un grupo.

CONCLUSIONES

Es entonces que la impulsividad no debe ser vista como un fenómeno unidimensional –puramente biológico, emocional o socialmente condicionado–,

sino como un rasgo complejo que responde a factores diversos pero interrelacionados. Su comprensión requiere una lectura más profunda de la mente, el cuerpo y el contexto. En condiciones que exigen respuestas rápidas o decisiones inmediatas, la impulsividad representa un mecanismo adaptativo, una respuesta funcional; un evento inevitable cuando existe un desequilibrio entre el pensamiento y la acción. Sin embargo, que esa funcionalidad surja como una adaptación no lo exonera de la crítica. No en toda situación es justificable una respuesta impulsiva, ni está libre de cargar consigo consecuencias negativas.

Finalmente, si bien existen múltiples factores predisponentes, es preciso admitir también que la ausencia de pensamiento crítico y educación son condiciones que facilitan su expansión y repetición. La urgencia se expresa como consecuencia de la falta de preparación para resistir. Y en ese descuido voluntario, en esa renuncia al criterio, la impulsividad deja de ser un fenómeno complejo y se convierte en una reacción predecible.

REFERENCIAS

- Abella Pons F, Alcántara Tadeo A, Castán Campanera E *et al.* (2015). *Bases teóricas y clínica del comportamiento impulsivo* (Celma Merola JL, coord.). Ediciones San Juan de Dios–Campus Docent, Barcelona.
- Aguilera Lázaro EC y Ostrosky Shejet F (2013). Componentes del temperamento y su relación con funciones ejecutivas en tareas de inhibición y toma de decisiones en niños. *Revista Neuropsicología, Neuropsiquiatría y Neurociencias* 13(1):15-26.
- Archer T, Oscar-Berman M, Blum K and Gold M (2012). Neurogenetics and epigenetics in impulsive behaviour: impact on reward circuitry. *Journal of Genetic Syndromes & Gene Therapy* 3(3):1000115. DOI: <https://doi.org/10.4172/2157-7412.1000115>.
- Elliott MV, Johnson SL, Pearlstein JG *et al.* (2023). Emotion-related impulsivity and risky decision-making: A systematic review and meta-regression. *Clinical Psychology Review* 100:102232. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cpr.2022.102232>.
- Jebraeili H, Davudizadeh S and Rezaee R (2023). The relationship between adverse childhood experiences and impulsive and risky behaviors: the mediating role of positive and negative emotional motivations. *Journal of Injury and Violence Research* 15(1):11.
- Ladrón de Guevara MS (2024). Detección precoz de desregulación emocional en población infanto-juvenil sana. *Perspectivas: Revista Científica de la Universidad de Belgrano* 7(2):57-71.



© Ivette Tejero. *Niño de Papantla*. De la Serie México Mágico. Óleo/cartón, 43 x 28 cm.

Rueda F, Pinto LP y Ávila Batista AC (2016). Impulsividad y facetas de la personalidad: relación entre instrumentos de medida. *Ciencias Psicológicas* 10(1):7-16.

Sánchez Sarmiento P, Giraldo Huertas JJ y Quiroz Padilla MF (2013). Impulsividad: una visión desde la neurociencia del comportamiento y la psicología del desarrollo. *Avances en Psicología Latinoamericana* 31(1):241-251.

Tirapu Ustárriz J, García Molina A, Luna Lario P et al. (2012). Corteza prefrontal, funciones ejecutivas y regulación de la conducta. En Tirapu Ustárriz J, García Molina A, Ríos Lago M y Ardila Ardila A (Eds.), *Neuropsicología de la corteza prefrontal y las funciones ejecutivas* (pp. 87-120). Viguera, Barcelona.

Vales L, Mora B, Martínez J et al. (2018). Niveles de impulsividad motora asociados a somnolencia diurna excesiva en niños y niñas en situación de vulnerabilidad social. *Cuadernos de Neuropsicología* 12(2):5.

María Fernanda Guardado Xolo
Ana Lis Heredia Espinosa
Facultad de Psicología, Universidad Veracruzana
aheredia@uv.mx



© Ivette Tejero. Yaqui Sonorense. De la Serie México Mágico. Óleo/tela, 30 x 30 cm.

Caries temprana de la infancia: un reto para la salud bucal pediátrica

José María **Hernández Castillo**
Julieta Sarai **Becerra Ruiz**

La caries de la primera infancia (CPI) es el término más aceptado en la literatura científica, así como en las definiciones de la Organización Mundial de la Salud (OMS) y la Asociación Dental Americana (ADA). Se define como la presencia de una o más superficies cariadas, perdidas o restauradas en los dientes temporales de niños menores de seis años. Esta condición, además de afectar la salud bucal de los menores, perjudica su bienestar general, ya que interfiere en funciones esenciales como la masticación, el desarrollo del lenguaje y la autoestima.

PREVALENCIA

La caries dental es una de las enfermedades crónicas más comunes en la infancia. Según datos de la OMS, más de 530 millones de niños en el mundo sufren caries dental en la dentición primaria. Por su parte, el Consenso de Expertos sobre Manejo de la Caries en la Primera Infancia, respaldado por revisiones sistemáticas, confirma que aproximadamente entre el 46 % y el 48 % de los niños presentan caries en dientes primarios. Además, describe que la cantidad de niños con CPI no ha disminuido en el curso de tres décadas (Zou *et al.*, 2022), por lo que resulta urgente modificar los modelos de intervención

con la evidencia científica, la inclusión social y la participación de las familias desde que los niños son pequeños.

En México, la prevalencia de caries dental en niños es alarmantemente alta. De acuerdo con los resultados del Sistema de Vigilancia Epidemiológica de Patologías Bucales (SIVEPAB, 2022), el 73.2 % de niñas y niños de 2 a 5 años examinados presentó CPI (Dirección General de Epidemiología, 2022). Estos datos subrayan la importancia de implementar medidas preventivas y educativas para combatir la caries de la primera infancia en México y a nivel mundial.

A pesar de los esfuerzos institucionales, la prevalencia alta en México revela una desconexión entre el conocimiento y su aplicación efectiva en la comunidad. Las cifras elevadas reflejan fallas en la política pública que no son aptas para las condiciones económicas, culturales y familiares de la población infantil. El acceso a servicios odontológicos es muy limitado en comunidades rurales y urbanas marginadas, además de que los programas preventivos se centran en escolares y dejan fuera a los menores de 5 años.

ETIOLOGÍA Y FACTORES DE RIESGO

El proceso de caries comienza con la interacción entre bacterias acidogénicas, como *Lactobacillus acidophilus* y *Streptococcus mutans*, y los azúcares de la dieta. Estas bacterias generan ácidos que desmineralizan el esmalte dental. Si no se tratan, el daño puede progresar hacia las capas internas del diente (dentina y pulpa), causando infecciones, dolor y, en casos graves, pérdida dental prematura.

La CPI es una enfermedad multifactorial en la que intervienen una higiene oral deficiente, una dieta rica en azúcares, la transmisión bacteriana, factores socioeconómicos, educativos, culturales y ciertas condiciones sistémicas. La mala higiene causa la acumulación de placa bacteriana, y esto permite que los microorganismos dañinos crezcan y provoquen caries.

Consumir muchos azúcares, sobre todo tomar bebidas dulces entre comidas, aumenta el riesgo de caries. Además, la transmisión temprana de *Streptococcus mutans* de padres o cuidadores a los niños, mediante prácticas como compartir utensilios, aumenta el riesgo de infección (Kahharova y Pappalardo, 2023).

Respecto a los factores socioeconómicos, se ha observado que las familias con ingresos bajos suelen enfrentar obstáculos para adquirir productos de higiene dental y servicios de salud bucal, lo que incrementa la incidencia de caries (Shrestha y Arora, 2024).

Finalmente, algunas enfermedades crónicas, el uso de medicamentos que reducen el flujo salival y el bajo peso al nacer, también se han asociado con un mayor riesgo de caries dental.

La etiología de la CPI comienza incluso antes de la erupción dental. Durante el embarazo, la salud de la madre y sus hábitos alimenticios influyen en el desarrollo del esmalte fetal. Tras el nacimiento, la introducción temprana de alimentos azucarados y la exposición a hábitos alimenticios prolongados, como el uso nocturno de biberones, desempeñan un papel crucial.

El diagnóstico temprano de la CPI es esencial para prevenir complicaciones y establecer un tratamiento efectivo. La Academia Americana de Odontología Pediátrica (AAPD) recomienda realizar la primera visita al odontopediatra antes del primer año de vida o al erupcionar el primer diente (alrededor de los seis meses de edad). Estas consultas iniciales son importantes porque permiten evaluar integralmente el riesgo de caries del menor, considerando factores biológicos, conductuales y ambientales. La Tabla 1 presenta algunos ejemplos de factores de riesgo. Esta clasificación permite visualizar cómo interactúan elementos como la susceptibilidad inmunológica, los hábitos alimenticios, las prácticas de higiene bucal y las condiciones socioeconómicas en el desarrollo de la enfermedad. En el contexto mexicano, estos factores se intensifican en comunidades con acceso limitado a servicios de salud, educación bucal deficiente y entornos familiares vulnerables, lo que contribuye a la alta prevalencia observada.

Factores	Categoría	Tipo	Descripción
Biológicos	Anatómicos y estructurales	Morfología dental	Fosas y fisuras profundas en molares y premolares facilitan la acumulación de placa.
		Hipoplasia del esmalte	Defectos en el esmalte por deficiencias nutricionales, enfermedades sistémicas o hipomineralización.
		Estructura y composición del esmalte	Un esmalte menos mineralizado o con menor contenido de fluoruro puede ser más susceptible.
	Microbiológicos	Presencia de <i>Streptococcus mutans</i> y <i>Lactobacillus</i> .	Bacterias asociadas a la producción de ácidos que desmineralizan el esmalte.
		Adquisición temprana de flora cariogénica.	Transmisión vertical (de madre a hijo) y horizontal (de hermanos o cuidadores).
		Desequilibrio del microbioma oral.	Desbalance que favorece la proliferación de bacterias acidogénicas.
	Genéticos	Herencia genética.	Genes que influyen en la estructura del esmalte, composición de saliva y respuesta inmune.
		Predisposición a enfermedades metabólicas.	Diabetes y alteraciones en la regulación de glucosa afectan la salud bucal.
	Salivares	Flujo salival reducido.	La saliva protege mediante neutralización de ácidos y remineralización dental.
		Composición de la saliva.	Variaciones en proteínas, minerales (calcio, fosfato, fluoruro) y pH afectan su capacidad protectora.
Conductuales		Deficiencias en higiene oral.	Ausencia de cepillado, técnica incorrecta, y falta de supervisión.
		Régimen alimenticio de la familia.	Ambiente de consumo excesivo de azúcar, ácidos y carbohidratos fermentables.
		Uso prolongado del biberón o lactancia nocturna sin higiene adecuada	Mayor riesgo de caries en niños que duermen con biberón o lactancia prolongada sin higiene.
Ambientales		Zona de vivienda, agua potable, minerales (flúor)	Influencias del lugar de residencia, acceso a agua potable, y regulaciones sobre flúor

Tabla 1. Factores de riesgo biológicos, conductuales y ambientales.

Las herramientas de diagnóstico incluyen cuestionarios y guías clínicas que ayudan al odontopediatra a evaluar factores de riesgo y de protección. Entre los factores de riesgo se consideran la presencia de lesiones activas, higiene oral deficiente, dieta rica en azúcares y uso inadecuado de flúor. Por otro lado, los factores de protección incluyen el uso regular de flúor, dieta balanceada, higiene oral adecuada y presencia de selladores dentales que protegen las

superficies propensas a caries (Lui y Wahab, 2023; Bakhoda y Haghighat, 2024).

La identificación temprana no solo facilita la intervención preventiva, sino que también reduce la necesidad de tratamientos invasivos y costosos en etapas avanzadas.

ESTRATEGIAS CLAVE PARA CUIDAR LOS DIENTES DESDE EL COMIENZO

La prevención de la CPI se basa en intervenciones dirigidas a modificar los factores de riesgo y muchas de ellas comienzan en casa, con acciones cotidianas, cuando madres, padres y cuidadores comprenden que una boca sana es parte del bienestar integral. Enseñar a limpiarse los dientes desde que aparecen, elegir alimentos que nutren sin dañar, y hablar de la caries como algo que se puede evitar, son gestos que siembran confianza y autonomía. Las escuelas también tienen un papel clave: cuando se integran programas de salud bucal, se fortalece el aprendizaje colectivo y se normaliza el cuidado como parte de la vida cotidiana.

El fluoruro es un aliado silencioso pero poderoso. Lo encontramos en pastas dentales, barnices profesionales y, más recientemente, en el fluoruro diamino de plata (FDP), una herramienta eficaz y accesible para detener el avance de lesiones en dientes temporales. Su uso es especialmente valioso en niñas y niños pequeños, o en contextos en que los tratamientos convencionales no son viables. Junto a él, los selladores de fosas y fisuras actúan como barreras invisibles que protegen las superficies más vulnerables del diente, evitando que la placa se acumule y dé paso a la caries.

Cuando la enfermedad ya está presente, el tratamiento se adapta al grado de avance y a las condiciones de cada niño. En etapas iniciales, cuando hay desmineralización sin cavidad, se puede intervenir con barnices de fluoruro, pastas de alta concentración y selladores, buscando frenar el proceso sin invadir. Si la lesión progresa, el FDP sigue siendo una opción útil, sobre todo en pacientes pequeños o con acceso limitado a atención especializada. En casos más avanzados, cuando ya hay cavidades, se requiere restaurar el diente con materiales como ionómeros de vidrio modificados, resinas o coronas de acero inoxidable, según la necesidad funcional y estética. Y cuando el daño es irreversible, la extracción se vuelve necesaria, siempre acompañada de

una planeación ortodóntica que preserve el espacio y favorezca el desarrollo de la dentición permanente.

En todo este proceso, el acompañamiento familiar es fundamental. No se trata solo de llevar al niño al consultorio, sino de comprender el porqué de cada decisión, seguir las recomendaciones con constancia y construir juntos una experiencia de cuidado que no genere miedo, sino seguridad. Porque detrás de cada diente que se cuida, hay una historia que se valida, una rutina que se transforma y un vínculo que se fortalece. (Inchingolo y Latini, 2023).

IMPACTO SOCIAL Y EMOCIONAL DE LA CPI.

Desafortunadamente, la CPI no se limita al daño de los dientes, sus efectos pueden llegar a afectar daños emocionales, sociales y familiares en los niños. Una lesión puede conllevar dolor, ausencias escolares y preocupaciones familiares.

El dolor continuo causado por la CPI puede alterar la rutina diaria de los niños que la padecen y causar que se distraigan fácilmente, dificultando su concentración en las actividades escolares y, por tanto, su disposición para aprender.

Además, los dientes oscurecidos, fracturados o ausentes pueden generar inseguridad. Algunos niños evitan sonreír o hablar por temor a recibir burlas. El impacto emocional también puede afectar a los padres o cuidadores de los pequeños, provocándoles sentimientos de culpa o angustia al ver el estado dental de sus hijos.

Finalmente, es una realidad el hecho de que, para muchas familias mexicanas, el tratamiento de CPI supone un gasto que puede desestabilizar la economía familiar, especialmente en contextos donde el servicio de salud es limitado. Esta presión financiera puede generar estrés adicional y afectar la dinámica familiar y la toma de decisiones cotidianas.

CONCLUSIÓN

La caries de la primera infancia representa un desafío para la salud pública en México. Se requiere avanzar hacia estrategias que integren educación, prevención y atención temprana en salud bucal infantil en todos



© Ivette Tejero. Corazón de León. Óleo/tela y tela, 80 x 80 cm.

los sectores de la población. Es necesario impulsar la colaboración entre escuelas, centros de salud y familias, a través de campañas educativas alineadas a las realidades culturales, así como la implementación de programas escolares de higiene bucal. Estas acciones permitirán reducir la prevalencia de CPI, y mejorar el bienestar emocional y social de los niños mexicanos.

REFERENCIAS

Bakhoda MR and Haghighat Lari MM (2024). Childhood obesity in relation to risk of dental caries: a cumulative and dose-response systematic review and meta-analysis. *BMC Oral Health* 24:966.

Dirección General de Epidemiología. Resultados del Sistema de Vigilancia Epidemiológica de Patologías Bucales (2022). Recuperado de <https://www.gob.mx/salud/documentos/informes-sivepab-2022>.

Inchingolo AM and Latini G (2023). Caries prevention and treatment in early childhood: comparing strategies. A systematic review. *European Review for Medical and Pharmacological Sciences* 27:11082-11092.

Kahharova D and Pappalardo VY (2023). Microbial indicators of dental health dysbiosis, and early childhood caries. *Journal of Dental Research* 102:759-766.

Lui DT and Wahab RMA (2023). Association of early childhood caries and nutritional status: a scoping review. *Journal of Clinical Pediatric Dentistry* 47(3):11-25.

Shrestha SK and Arora A (2024). Association of breastfeeding and early childhood caries: a systematic review and meta-analysis. *Nutrients* 16:1355.

Zou J and Du K (2022). Expert consensus on early childhood caries management. *International Journal of Oral Science* 14:35.

José María Hernández Castillo
Julieta Sarai Becerra Ruiz
Centro Universitario de Los Altos
Universidad de Guadalajara
julieta.becerra@academicos.udg.mx



© Ivette Tejero. *Niñas Rarámuri camino a la escuela*. De la Serie México Mágico. Óleo/tela y cartón, 75 x 45 cm.

Células germinales y biotecnología reproductiva: una esperanza para el ajolote mexicano

Tania J. **Porras-Gómez**
Noé **Zacaula-Juárez**

En los canales de Xochimilco, entre lirios acuáticos y agua cada vez más turbia, sobrevive una de las especies más singulares del planeta: el ajolote (*Ambystoma mexicanum*). Esta criatura de aspecto enigmático, con sus branquias en forma de plumas y su asombrosa capacidad de regeneración, ha cautivado a científicos, artistas, estudiantes y habitantes locales. Más allá de poder regenerar extremidades, cola o incluso parte de su cerebro (Vieira *et al.*, 2020), el ajolote enfrenta una amenaza silenciosa: el riesgo de desaparecer para siempre en su hábitat natural (Zambrano *et al.*, 2010).

La conservación del ajolote requiere de diferentes estrategias que incluyan tanto acciones ecológicas como de educación ambiental. No basta con limpiar sus canales o proteger su hábitat, es necesario emplear técnicas de biotecnología reproductiva para preservar las células que transmiten la herencia evolutiva, llamadas células germinales, que darán origen a los gametos (espermatozoides en los machos, óvulos en las hembras).

El término biotecnología hace referencia al uso de técnicas para mejorar los procesos fisiológicos de células u organismos (Rosete *et al.*, 2021). Su aplicación en la reproducción del ajolote con el objetivo de optimizar su reproducción mediante el empleo de técnicas de fertilización

in vitro, sigue siendo un desafío, pero constituye una herramienta clave para conservar esta especie emblemática de México.

LAS CÉLULAS GERMINALES: LAS SEMILLAS DE LA VIDA

Las células germinales constituyen un linaje celular único; son capaces de llevar a cabo recombinación genética, es decir, la mezcla de los genes provenientes de ambos padres. Gracias a ello, son portadoras de la información genética que se transmite de generación en generación. A lo largo de su desarrollo, estas células atraviesan cambios graduales: se convierten en ovogonias o en espermatogonias, según el sexo del organismo. Por esta razón, se consideran precursoras de los gametos: óvulos en las hembras y espermatozoides en los machos, indispensables para la fecundación y la formación de un nuevo individuo. Sin ellas no hay descendencia ni posibilidad de perpetuar la vida. En el caso del ajolote, estudiarlas no solo es fascinante desde el punto de vista biológico, sino también crucial para la conservación de esta especie.

El trabajo multidisciplinario realizado en el Instituto de Investigaciones Biomédicas de la UNAM, en conjunto con el ajolotario de la Facultad de Estudios Superiores Iztacala, se ha centrado en analizar a las células germinales de esta especie: ¿cómo se ven, es decir, qué forma y tamaño tienen?, ¿en qué región del ovario y testículo se localizan?, ¿cómo funcionan? y ¿cómo podemos conservarlas fuera del cuerpo del organismo sin que pierdan su capacidad de dar origen a una nueva generación? Estas preguntas orientan el desarrollo de soluciones científicas y tecnológicas como la creación de un banco de germoplasma que permita conservar al ajolote más allá de su hábitat natural.

BANCO DE GERMOPLASMA:

UN SEGURO PARA LA PRESERVACIÓN DE LAS ESPECIES

Un banco de germoplasma funciona como un “banco financiero” de la biodiversidad. Así como depositamos nuestros ahorros para protegerlos y usarlos ante alguna eventualidad, en un banco de germoplasma

se depositan las “riquezas biológicas” de las especies, como gametos, células, tejidos, polen o semillas. Cada muestra conservada es como una inversión genética que garantiza la posibilidad de restaurar poblaciones en el futuro. Es un fondo de emergencia para resguardar la biodiversidad.

El germoplasma es un recurso genético vivo que sirve como portador de la herencia. Para conservarlo, se utiliza la criopreservación, que consiste en mantenerlo a temperaturas criogénicas (-196 °C) para detener su metabolismo y garantizar su viabilidad a largo plazo. Esta tecnología se utiliza en técnicas de reproducción asistida, fecundación *in vitro* o incluso para enfrentar la vulnerabilidad genética de una especie en declive.

Aunque la criopreservación es una herramienta poderosa, no reemplaza la complejidad del ecosistema. Conservar una especie implica proteger también su hábitat, sus interacciones y su historia evolutiva.

MÉXICO Y SUS BANCOS DE GERMOPLASMA

A nivel internacional, los bancos de germoplasma cumplen un papel estratégico en la preservación de la diversidad genética. En Estados Unidos, el Programa Nacional de Germoplasma Animal del Departamento de Agricultura (USDA) conserva recursos genéticos ganaderos, acuáticos, avícolas e incluso de insectos; además, ofrece acceso a información y material biológico para investigación.

En Noruega, la Bóveda Global de Semillas de Svalbard resguarda más de un millón de muestras de cultivos básicos como trigo, arroz, cebada, sorgo, frijol y maíz, entre otras, asegurando su conservación frente a alguna catástrofe global.

México cuenta con el Centro Nacional de Recursos Genéticos (CNRG-INIFAP) en Jalisco, donde se concentra la colección más grande del país con más de 800,000 accesiones (muestras de material genético) de especies agrícolas y forestales, así como de algunos recursos ganaderos y de animales marinos. A nivel local, la Comisión de Recursos Naturales y Desarrollo Rural (CORENADR) resguarda maíces nativos (amarillos, azules, blancos, rojos, negros y mestizos), entre otras especies.

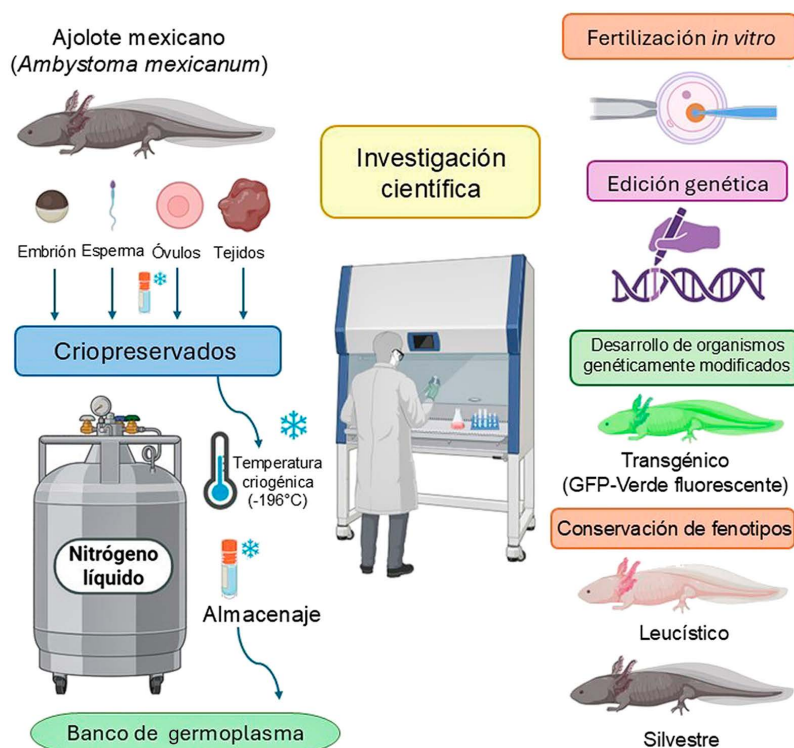


Figura 1. Representación esquemática de las aplicaciones biotecnológicas orientadas a la conservación del ajolote. Los gametos, embriones y tejidos pueden ser criopreservados en bancos de germoplasma, lo que asegura su viabilidad a largo plazo. Estas colecciones biológicas constituyen la base para desarrollar técnicas de fertilización *in vitro*, edición genética de organismos transgénicos y conservación de fenotipos. La investigación científica en este campo se orienta a la preservación de la variabilidad genética y al diseño de estrategias de conservación que permitan la supervivencia de la especie. Ilustración realizada con BioRender.

de desaparición. A la lista se suma el teporingo (*Romerolagus diazi*), un pequeño conejo endémico de los pastizales del Eje Neovolcánico Transversal. Su drástica disminución poblacional y la fragmentación acelerada de su hábitat lo mantienen al borde de la extinción en vida sil-

Existen otros bancos importantes, como el Banco de Germoplasma del Estado de México (ICAMEX), el banco forestal de CONAFOR, el banco vegetal de Coahuila, el banco del Centro de Investigación Científica de Yucatán (CICY), y los de otras importantes instituciones académicas, como la Universidad Autónoma de Nuevo León, la Universidad Nacional Autónoma de México, la Universidad Autónoma de Querétaro o la Universidad Autónoma de Chapingo.

En México, la mayoría de los bancos de germoplasma se han enfocado en la agricultura y la ganadería, mientras que los esfuerzos dirigidos a la conservación de la fauna silvestre han sido limitados. Sin embargo, existen algunos ejemplos que muestran la importancia de resguardar el patrimonio genético de especies en riesgo. Tal es el caso del lobo mexicano (*Canis lupus baileyi*), cuya recuperación ha sido posible gracias a programas que combinaron colecciones genéticas con la reproducción en cautiverio y la elaboración de convenios binacionales con Norteamérica. Otro ejemplo es la vaquita marina (*Phocoena sinus*), el cetáceo más amenazado del planeta, para la cual se desarrollan proyectos que buscan preservar su material genético ante la inminente posibilidad

de desaparición. Esta situación no solo amenaza la permanencia de una especie única de México, sino que también implica la alteración de un ecosistema completo, ya que el teporingo es un consumidor clave de pastos y un importante dispersor de semillas. Su eventual desaparición afectaría la dinámica de los pastizales de alta montaña y repercutiría en otras especies que dependen de este hábitat, como el zorro gris, la comadreja, el coyote y el águila cola roja.

EL CASO DEL AJOLOTE MEXICANO

Para el ajolote mexicano (*Ambystoma mexicanum*), la situación ecológica es crítica. De acuerdo con la Norma Oficial Mexicana NOM-059-SEMARNAT-2010, esta especie está en peligro de extinción. El ajolote representa, al mismo tiempo, la fragilidad y la resiliencia de la biodiversidad mexicana. En torno a él se han impulsado diversas iniciativas de conservación *in situ*, como la restauración de chinampas en Xochimilco para recuperar y proteger su hábitat (Chávez *et al.*, 2019). En paralelo, se han implementado estrategias

de conservación *ex situ* (fuera de su hábitat), como la criopreservación de gametos. En el ámbito del conocimiento básico, se ha demostrado que la especificación de células germinales ocurre por inducción, y se han identificado genes clave en este proceso (Extavour y Akam, 2003). Estos avances abren la posibilidad de desarrollar cultivos de células germinales, una herramienta con gran potencial para la conservación genética del ajolote y de otras especies silvestres en México.

Nuestro grupo de trabajo se ha sumado a estas iniciativas a través del estudio de la biología de las células germinales. Hemos logrado identificar y caracterizar el linaje germinal de ovarios y testículos adultos del ajolote, y hemos reportado la presencia de células troncales de ovogonias y espermatogonias (Porras y Moreno, 2023). Actualmente nos encontramos en la siguiente fase, que es el aislamiento y cultivo de estas células troncales de la línea germinal. Un avance prometedor es el desarrollo de métodos para congelar y preservar esperma. En pruebas de laboratorio, se recolectaron pequeñas cantidades de fluido espermático (Coxe *et al.*, 2024; Mansour *et al.*, 2012), y se observó que, incluso tras varios días en solución salina y después del proceso de congelación y descongelación, más de la mitad de los espermatozoides mantuvieron su motilidad. Lo más notable es que, al usarlos en ensayos de fertilización *in vitro*, algunos huevos lograron desarrollarse hasta la eclosión de embriones (Coxe *et al.*, 2024). Estos resultados constituyen una evidencia experimental sólida y un precedente directo para la creación de bancos de gemoplasma que puedan ayudar a preservar esta singular especie (Figura 1).

Las posibles aplicaciones de este conocimiento en la preservación a largo plazo de gametos, células o tejidos, y la eventual reintroducción de ajolotes a su hábitat, deben entenderse como perspectivas y líneas de investigaciones en curso, aún no plenamente desarrolladas, pero viables en el futuro.

UN SÍMBOLO VIVO DE MÉXICO QUE DEBEMOS PRESERVAR

El ajolote no solo es un organismo fascinante por su biología regenerativa, también es un símbolo vivo

de la riqueza natural, histórica y cultural de México (López-Ortiz, 2018). Desde la época prehispánica fue venerado por los mexicas como representación del dios Xólotl, y utilizado por los pueblos de Xochimilco en su alimentación, medicina tradicional y con fines rituales. Hoy, sin embargo, enfrenta una situación crítica: la contaminación, la urbanización, la introducción de especies invasoras y la pérdida de su hábitat han reducido drásticamente sus poblaciones silvestres. La ciencia ofrece nuevas herramientas para su conservación, desde la criopreservación de gametos y tejidos, hasta la exploración de su extraordinaria capacidad de regeneración, lo que lo convierte en un importante modelo de estudio biomédico (Faisal *et al.*, 2024).

A pesar de los avances, aún queda un largo camino que recorrer en el desarrollo de la biotecnología reproductiva aplicada al ajolote. Es necesario perfeccionar técnicas como la criopreservación y la fertilización *in vitro*, que permitan su uso seguro y contribuyan a garantizar la preservación de esta especie.

¿QUÉ PUEDES HACER POR EL AJOLOTE?

La conservación es tarea de todos; no necesitas tener un laboratorio para ayudar. Acciones sencillas como cuidar el agua; evitar su contaminación, interesarte por las especies endémicas de México y difundir la importancia del ajolote pueden marcar la diferencia.

El ajolote ha sobrevivido desde tiempos prehispánicos hasta hoy, y su futuro depende de nuestra capacidad para combinar ciencia, conciencia y acción. Al conservar el ajolote, también salvaguardamos una parte de nuestra identidad y riqueza cultural. Cada célula preservada representa un compromiso con la vida y con México, un esfuerzo para evitar que desaparezca el encanto ancestral de esta especie única en el mundo.

AGRADECIMIENTOS

TJPG agradece al Programa de Becas Posdoctorales de la UNAM por el apoyo otorgado durante el periodo 2019-2021, así como a la Facultad de Ciencias de la UNAM por el respaldo brindado en esta etapa. Este trabajo está dedicado a la memoria de la doctora Norma Moreno Mendoza.



© Ivette Tejero. En tu lugar seguro. Óleo/tela, 100 cm x 100 cm, 2023.

REFERENCIAS

Chávez C, Ramírez J y González A (2019). Conservación comunitaria en Xochimilco: chinampas y ajolotes. En Pérez M (Ed.), *Agua Cultura en México* (pp.120-142). Secretaría de Cultura, México.

Coxe N, Liu Y, Arregui L et al. (2024). Establishment of a Practical Sperm Cryopreservation Pathway for the Axolotl (*Ambystoma mexicanum*): A Community-Level Approach to Germplasm Repository Development. *Animals* (Basel) 14(2):206. DOI: <https://doi.org/10.3390/ani14020206>.

Extavour CG y Akam M (2003). Mechanisms of germ cell specification across the metazoans: epigenesis and preformation. *Development* 130 (24):5869-5884. DOI: <https://doi.org/10.1242/dev.00804>.

Faisal M, Mehreen A, Hays D et al. (2024). The Genetic Odyssey of Axolotl Regeneration: Insights and Innovations. *International Journal of Developmental Biology* 68(3):103-116. DOI: <https://doi.org/10.1387/ijdb.240111yl>.

López-Ortiz M (2018). *El ajolote en la historia y cultura de México*. México: UNAM.

Mansour N, Lahnsteiner F and Patzner RA (2011). Collection of gametes from live axolotl, *Ambystoma mexicanum*, and standardization of in vitro fertilization. *Theriogenology* 75:354-361. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.theriogenology.2010.09.006>.

Porras-Gómez TJ y Moreno-Mendoza N (2023). Biología del linaje germinal para el rescate del *Ambystoma mexicanum*. *Gaceta Biomédicas* 28(6):6-8.

Rosete Fernández JV, Álvarez Gallardo H, Urbán Duarte D et al. (2021). Biotecnologías reproductivas en el ganado bovino: cinco décadas de investigación en México. *Revista Mexicana de Ciencias Pecuarias* 12 (Suppl. 3). DOI: <https://doi.org/10.22319/rmcp.v12s3.5918>.

Vieira WA, Wells KM and McCusker CD (2020). Advancements to the Axolotl Model for Regeneration and Aging. *Gerontology* 66(3):212-222. DOI: <https://doi.org/10.1159/000504294>.

Zambrano L, Mosig-Reidl P, McKay J et al. (2010). *Ambystoma mexicanum*. The IUCN Red List of Threatened Species 2010. DOI: <https://doi.org/10.2305/IUCN.UK.2010-2.RLTS.T1095A3229615.en>.

Tania J. Porras-Gómez
Instituto de Investigaciones Biomédicas
Universidad Nacional Autónoma de México

Noé Zacacla-Juárez
Laboratorio de Biotecnología
Instituto Nacional de Rehabilitación
tporras@iibiomedicas.unam.mx

© Ivette Tejero. *La guerra tatuada en nuestra alma*. Óleo/tela, 120 x 80 cm.



Plasmodium aviar: un parásito que amenaza a las aves

Carlos Antonio **Abella Medrano**
César Antonio **Sandoval Ruiz**

Las aves son conocidas por su belleza, ya que presentan plumajes coloridos y gran variedad de cantos; por su diversidad, pues en el mundo se reconocen aproximadamente 11,000 especies, de las cuales en México hay alrededor de 1,124; y por su capacidad de vuelo, característica principal de este grupo que les permite una gran distribución en el mundo (Navarro-Sigüenza *et al.*, 2014).

Forman parte esencial en la estructura de los ecosistemas, ya que ocupan varios gremios tróficos. Entre sus funciones están la polinización, el control de poblaciones de invertebrados que pueden convertirse en plagas, la reducción de poblaciones de roedores (en el caso de las rapaces), la dispersión de semillas y el reciclaje de nutrientes, pues sus heces son ricas en calcio, magnesio, nitrógeno, fósforo y potasio. Sin embargo, como muchas especies, también se encuentran amenazadas por la transformación del paisaje provocada por el ser humano, la cual genera procesos de degradación, fragmentación y pérdida de hábitat, reduciendo la disponibilidad de alimento, refugio, sitios para nidificación, entre otros (Lees *et al.*, 2022).

Estos cambios en el paisaje aumentan el riesgo de transmisión de enfermedades. Una de las más preocupantes para las aves es el *Plasmodium* aviar, un parásito transmitido por mosquitos que puede tener graves consecuencias en las aves, afectando su supervivencia (Santiago-Alarcon *et al.*,



Figura 1. Mosquito hembra de la familia Culicidae. Fotografía de Mathias Krumbholz (CC BY-SA 3.0); **(b)** Chaquiste de la familia Ceratopogonidae. Fotografía de Азат Кадиров (CC BY 4.0); **(c)** Mosca de la familia Hippoboscidae. Fotografía de JonRichfield (CC BY-SA 3.0); **(d)** Jején de la familia Simuliidae. Fotografía de Jesse Rorabaugh (CC0 1.0).

2020). En este escrito exploraremos qué es el *Plasmodium* aviar, cómo afecta a las aves y qué medidas podemos tomar para mitigar este problema de salud.

EL PLASMODIUM AVIAR

El conocimiento de los apicomplexos se remonta al último tercio del siglo XIX, con los trabajos de Alphonse Laveran (1880), quien descubrió gametocitos en sangre periférica de pacientes humanos. Años después, el protozoólogo ruso Vasily Danilewsky (1884) no solo encontró formas intracelulares de apicomplexos en aves, sino que describió los efectos deletéreos que estos hemoparásitos causan en sus huéspedes vertebrados. Sin duda, el trabajo de Sir Ronald Ross (1898) completó el rompecabezas del ciclo enzoótico de los parásitos de la malaria aviar al demostrar que los mosquitos eran sus transmisores hacia las aves.

Actualmente, los parásitos de la malaria aviar (Phylum: Apicomplexa) se clasifican en tres géneros: *Plasmodium*, *Haemoproteus* y *Leucocytozoon*. Los del género *Plasmodium* son transmitidos por mosquitos o zancudos (Diptera: Culicidae), que incluyen géneros

como *Culex*, *Coquillettidia*, *Aedes*, *Mansonia*, *Culiseta*, *Anopheles* y *Psorophora* (Figura. 1a). Los del género *Haemoproteus* son transmitidos por chaquistes (género *Culicoides*, Diptera: Ceratopogonidae) (Figura 1b) y las moscas piojo (Diptera: Hippoboscidae) (Figura 1c). Finalmente, los del género *Leucocytozoon* son transmitidos principalmente por jejenes de los géneros *Simulium*, *Cnephia* y *Prosimulium* (Diptera: Simuliidae) (Figura 1d), aunque también chaquistes (Diptera: Ceratopogonidae) son vectores (Santiago-Alarcon *et al.*, 2020).

Aunque hay aproximadamente 60 especies diferentes de *Plasmodium* aviar (Figura 1), todas tienen un efecto similar en las aves: las debilitan y, en algunos casos, provocan su muerte (Valkiūnas, 2004). Estos parásitos son responsables de millones de infecciones y miles de muertes en aves silvestres y de corral. Además, factores como el cambio climático están influyendo en la expansión geográfica de vectores y parásitos a zonas donde antes estaban ausentes. A pesar de su importancia para la salud animal, el conocimiento sobre los vectores que se alimentan de aves es deficiente, por lo que no podemos determinar con certeza qué parásitos circulan ni cuáles son una amenaza potencial (Santiago-Alarcón *et al.*, 2012).

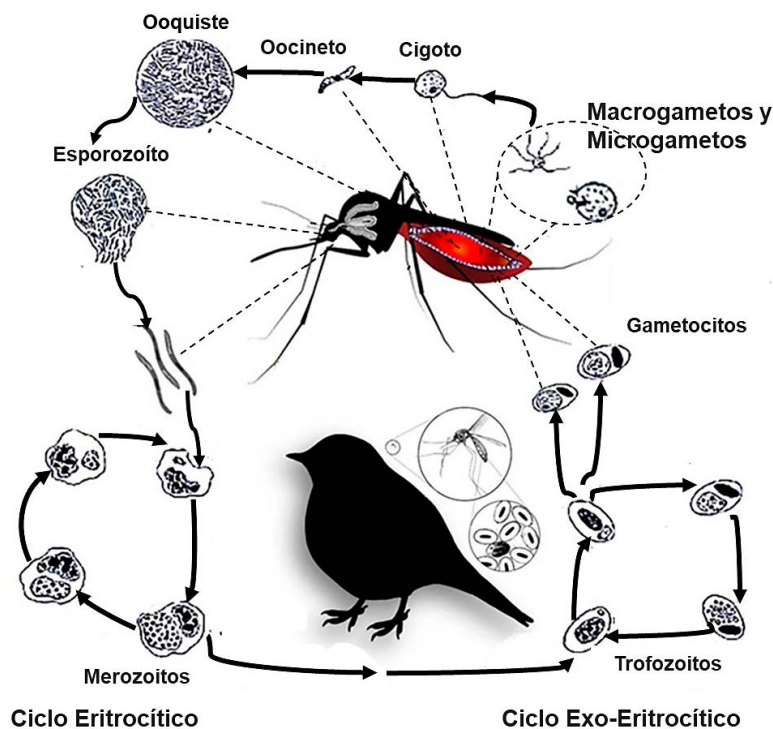


Figura 2. Ciclo de vida del *Plasmodium aviar* en hospederos vertebrados e invertebrados. Imagen modificada de Ishtiaq, 2021.

infección con linajes de *Plasmodium aviar* (BAEBIC02, ZOCAP12, TROAED21), con mayor prevalencia en ambientes urbanos y periurbanos. Estos resultados evidencian el rol de los mosquitos como vectores de malaria aviar en paisajes antropizados y destacan la necesidad de implementar programas de epizootiología (equivalente en animales para epidemia) para evaluar el impacto potencial de estos patógenos en la salud de las comunidades de aves (Abella-Medrano *et al.*, 2018).

La diversidad y distribución de la malaria aviar están influenciadas por las interacciones entre aves y vectores (mosquitos, chaquistes o jejenes). Sin embargo, la alteración del paisaje puede aumentar su prevalencia (Galen *et al.*, 2014). Se ha encontrado que los cambios antropogénicos están relacionados con la variación en la diversidad, prevalencia y distribución de parásitos Haemosporida en aves de selvas africanas. Por ejemplo, en el ave *Cyanomitra olivacea*, se observó mayor prevalencia de *Plasmodium* spp. en acahuales que en sitios más perturbados (Loiseau *et al.*, 2010). En México, se reportó mayor prevalencia de *Plasmodium aviar* en un bosque urbano, comparado con uno conservado (Hernández-Lara *et al.*, 2017). En un estudio realizado en Xalapa, Veracruz, se implementó un muestreo sistematizado empleando trampas CDC miniatura cebadas con CO₂ y un aspirador de mochila en cinco tipos de uso de suelo: bosque conservado, urbano, periurbano, cafetal de sombra y pastizal. Se capturaron 4,107 mosquitos, de los cuales 90 correspondían a hembras alimentadas con sangre. El análisis molecular mediante PCR anidado del gen citocromo b reveló que 17 ejemplares de *Culex restuans*, *Aedes quadrivittatus* y *Wyeomyia adelpha* presentaron

TRANSMISIÓN Y CICLO DE VIDA

El ciclo de vida del *Plasmodium aviar* comienza cuando un mosquito hembra se alimenta de la sangre de un ave infectada. Durante la alimentación, el parásito pasa a la sangre del mosquito y se multiplica en su sistema digestivo. Luego, cuando el mosquito se alimenta nuevamente, los parásitos maduros se transmiten a otra ave, completando así el ciclo.

El ciclo de vida de *Plasmodium aviar* se divide en dos fases: una asexual, que ocurre dentro del ave, y una de reproducción sexual, que tiene lugar en el mosquito vector (Figura 2). El desarrollo del parásito en los vectores generalmente dura de 8 a 22 días tras la alimentación, aunque varía según factores como la temperatura y la condición nutricional del mosquito (Valkiūnas, 2004).

EFFECTOS EN LAS AVES

Una vez infectada, los parásitos de *Plasmodium aviar* se multiplican en el sistema circulatorio del ave, invadiendo y destruyendo sus glóbulos rojos. Esto

provoca anemia, debilidad, disminución de la capacidad de vuelo, depresión, letargo, pérdida de apetito y, en casos severos, la muerte. Además, el parásito puede debilitar el sistema inmunológico de las aves, aumentando su susceptibilidad a otras enfermedades (Yan *et al.*, 2024).

IMPACTO EN LAS POBLACIONES DE AVES

El *Plasmodium* aviar puede causar un impacto significativo en las poblaciones de aves, especialmente en áreas con alta densidad de mosquitos y aves. Las aves migratorias son particularmente vulnerables, ya que pueden transportar el parásito a grandes distancias y diseminarlo en nuevas áreas, provocando brotes y reducciones poblacionales locales.

MEDIDAS DE PREVENCIÓN Y CONTROL

Para combatir el *Plasmodium* aviar recomiendo un enfoque integral como *One Health* (Una Salud), que promueve la coordinación entre programas de salud humana, animal y ambiental, que incluye:

1. Control de hábitats de vectores: eliminar criaderos en áreas con aves residentes y migratorias.
2. Monitoreo de poblaciones de aves: para detectar tempranamente la enfermedad y aplicar medidas de control.
3. Protección de hábitats naturales: minimizar la pérdida de hábitat por deforestación o impacto antropogénico, que genera estrés en las aves y aumenta el riesgo de transmisión.

La conservación de hábitats con alta diversidad de aves y el control de vectores con métodos ecoamigables son estrategias clave para reducir la transmisión.

CONCLUSIÓN

El *Plasmodium* aviar es una amenaza grave para las aves, con potencial de diezmar poblaciones enteras. Sin embargo, mediante medidas integrales de prevención y control, es posible mitigar su impacto.

La conservación de hábitats y el monitoreo constante de aves y vectores son cruciales para proteger la biodiversidad y el equilibrio ecológico. Trabajando juntos, podemos preservar estas especies y garantizar su supervivencia.

R E F E R E N C I A S

- Abella-Medrano CA, Ibáñez-Bernal S, Carbo-Ramírez P and Santiago-Alarcon D (2018). Blood-meal preferences and avian malaria detection in mosquitoes (Diptera: Culicidae) captured at different land use types within a neotropical montane cloud forest matrix. *Parasitology International* 67(3):313-320.
- Galen SC and Witt CC (2014). Diverse avian malaria and other haemosporidian parasites in Andean house wrens: evidence for regional co-diversification by host-switching. *Journal of Avian Biology* 45(4):374-386.
- Hernández-Lara C, González-García F and Santiago-Alarcon D (2017). Spatial and seasonal variation of avian malaria infections in five different land use types within a Neotropical montane forest matrix. *Landscape and Urban Planning* 157:151-160.
- Ishtiaq F (2021). Ecology and evolution of avian malaria: implications of land use changes and climate change on disease dynamics. *Journal of the Indian Institute of Science* 101(2):213-225.
- Lees AC, Haskell L, Allinson T *et al.* (2022). State of the world's birds. *Annual Review of Environment and Resources* 47(1):231-260.
- Loiseau C, Iezhova T, Valkiūnas G *et al.* (2010). Spatial variation of haemosporidian parasite infection in African rainforest bird species. *Journal of Parasitology* 96(1):21-29.
- Navarro-Sigüenza AG, Rebón-Gallardo MF, Gordillo-Martínez A *et al.* (2014). Biodiversidad de aves en México. *Revista Mexicana de Biodiversidad* 85:S476-S495.
- Santiago-Alarcon D and Marzal A (2020). *Avian malaria and related parasites in the tropics. Ecology, Evolution and Systematics*. Springer Cham.
- Santiago-Alarcon D, Palinauskas V and Schaefer HM (2012). Diptera vectors of avian Haemosporidian parasites: untangling parasite life cycles and their taxonomy. *Biological Reviews* 87(4):928-964.
- Valkiunas G (2004). *Avian malaria parasites and other haemosporidia*. CRC Press.
- Yan WL, Sun HT, Zhao YC *et al.* (2024). Global prevalence of Plasmodium infection in wild birds: A systematic review and meta-analysis. *Research in Veterinary Science* 168:105136.

Carlos Antonio Abella Medrano
César Antonio Sandoval Ruiz
Facultad de Ciencias Biológicas
Benemérita Universidad Autónoma de Puebla
cesar.sandoval@correo.buap.mx

Vulnerabilidad socioeconómica y urbanización, factores en la degradación ambiental de humedales

Sonia **Morán-Rodríguez**
Raymundo **Dávalos Sotelo**

En los últimos años, la vulnerabilidad se ha convertido en un tema central para entender los riesgos que enfrentan las comunidades humanas y los ecosistemas. Las ciencias sociales la asocian con las condiciones de vida y la desigualdad; las ciencias naturales, con la exposición de los ecosistemas a los impactos ambientales. Sin embargo, integrar ambas miradas sigue siendo un desafío.

Este artículo propone una manera de hacerlo: analizar cómo las condiciones sociales y económicas pueden incrementar los daños en contextos urbanos expuestos a peligros naturales. En otras palabras, ¿por qué algunas comunidades son más propensas a sufrir pérdidas humanas, materiales y ambientales cuando ocurre un evento extremo? Al conocer las respuestas, es posible implementar acciones con la finalidad de mejorar la calidad de vida, generar desarrollo urbano con un enfoque sostenible y minimizar el impacto en los ecosistemas.

Dado que la vulnerabilidad socioeconómica (VSE) forma parte del riesgo, es importante entender que este último no es un fenómeno natural, sino una construcción social (Tierney, 2019). El riesgo se define como la probabilidad de que ocurran afectaciones, pérdidas o daños en un territorio y depende de tres componentes interrelacionados:

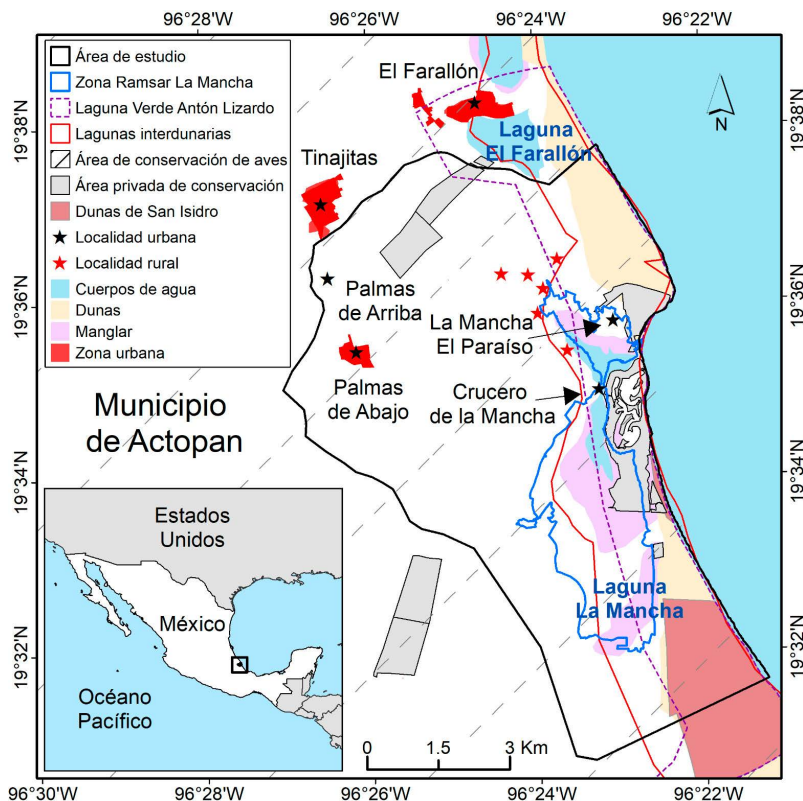
Figura 1. Mosquito hembra de la familia Culicidae. Fotografía de Mathias Krumholz (CC BY-SA 3.0); (b) Chaquiste de la familia Ceratopogonidae. Fotografía de Azar Kadirov (CC BY 4.0); (c) Mosca de la familia Hippoboscidae. Fotografía de Jon Richfield (CC BY-SA 3.0); (d) Jején de la familia Simuliidae. Fotografía de Jesse Rorabaugh (CC 0 1.0).

la vulnerabilidad, el peligro —es decir, el agente perturbador— y el grado de exposición (Crichton, 1999).

HUMEDALES Y SU IMPORTANCIA

Nuestro caso de estudio se ubica en La Mancha, Veracruz, una región costera de alta riqueza biológica, donde los humedales, manglares y dunas conviven con asentamientos humanos que crecen rápidamente. Esta zona forma parte del sistema de lagunas interdunarias del Golfo de México y es reconocida internacionalmente por su valor ecológico: México la integró a la Convención Ramsar desde 1986, junto con otros 143 humedales que gozan de protección internacional (Figura 1).

Sin embargo, la presión urbana, la contaminación y la falta de infraestructura básica amenazan sus ecosistemas. El crecimiento de las ciudades y comunidades genera nuevas dinámicas sociales y ambientales. La demanda de mayor espacio construido para satisfacer las actividades económicas asociadas a la generación de bienes y servicios indispensables para la vida humana, con la idea de que “más desarrollo significa mejor calidad de vida”, no siempre se cumple cuando el desarrollo ocurre a costa de la sostenibilidad ambiental. Asimismo, la urbanización se identifica como la causa de estrés sobre los ecosistemas, lo que produce efectos negativos en la flora, la fauna y los servicios ecosistémicos como recreación, alimentación, captura de dióxido de carbono (CO₂), entre otros.



VULNERABILIDAD SOCIOECONÓMICA EN EL CONTEXTO AMBIENTAL

En este estudio, el análisis se centra en la vulnerabilidad, entendida como el componente que puede modificarse con mayor facilidad mediante acciones sociales, políticas y de planificación. Este concepto se refiere al conjunto de condiciones y procesos derivados de factores sociales y ambientales que aumentan la susceptibilidad de una comunidad a sufrir impactos negativos frente a un peligro (Morán-Rodríguez y Novelo-Casanova, 2018).

La vulnerabilidad es un proceso multidimensional que busca evaluar la fragilidad de las personas, las comunidades, su infraestructura y los ecosistemas frente a factores que limitan su bienestar. Entre ellos destacan la pobreza, el desempleo, el acceso limitado a la salud y la educación, la discriminación y la debilidad estructural o ambiental ante posibles daños.

Actualmente, los estudios sobre vulnerabilidad socioeconómica se abordan desde enfoques inter y transdisciplinarios, apoyados en el concepto de

Nivel de vulnerabilidad	Recomendaciones para mitigar la vulnerabilidad socioeconómica
Muy alto	Es indispensable incentivar actividades económicas en la localidad, promover programas de salud y favorecer planes de estudio que garanticen el conocimiento de lecto escritura en los pobladores.
Alto	Es primordial reactivar la actividad económica de la zona, para brindar oportunidades laborales, para mitigar la migración. Implementar programas educativos para incentivar que los habitantes continúen sus estudios a nivel preparatoria.
Moderado	Incentivar actividades laborales en la zona, promoviendo la permanencia de los pobladores en las localidades mejorando la calidad de vida y facilitando información sobre el cuidado a los ecosistemas.
Bajo	Es requerido incentivar actividades para reactivar la economía secundaria, fortalecer actividades culturales y recreativas enfocadas al cuidado ambiental.
Muy bajo	Se recomienda incentivar actividades económicas terciarias para fortalecer la economía, y la puesta en marcha de actividades culturales, recreativas y deportivas para incentivar un entorno social enfocado en el cuidado y conservación de los ecosistemas circundantes.

Tabla 1. Nivel de vulnerabilidad socioeconómica y las recomendaciones para favorecer su reducción según los resultados identificados en la región de La Mancha.

socioecosistema. Este enfoque reconoce la interacción dinámica entre la sociedad y su entorno natural como una vía fundamental para comprender y reducir el riesgo.

MÉTODO PARA IDENTIFICAR

LA VULNERABILIDAD SOCIOECONÓMICA

Para comprender esta realidad, realizamos una evaluación de VSE en las comunidades de La Mancha, Palmas de Arriba y Palmas de Abajo. El estudio se

llevó a cabo con un enfoque participativo: antes de aplicar encuestas, presentamos el proyecto en asambleas comunitarias y obtuvimos el consentimiento previo, libre e informado (CPLI).

Entre marzo de 2022 y octubre de 2023 se aplicaron 221 encuestas estructuradas a una población de 519 viviendas, según el Censo de Población y Vivienda 2020 (INEGI, 2020). Las encuestas consideraron indicadores sociales y económicos, agrupados en dos grandes dimensiones: vulnerabilidad social y económica.

VALORES UTILIZADOS EN LA EVALUACIÓN

Cada indicador se ponderó con el Proceso Analítico Jerárquico (PAJ), una metodología que permite comparar la importancia relativa de distintos factores (Saaty, 1987). La información se procesó con el software R y se representó espacialmente mediante un sistema de información geográfica (SIG), clasificando los resultados en cinco niveles: muy baja, baja, moderada, alta y muy alta vulnerabilidad (Tabla 1).

CARACTERÍSTICAS SOCIALES

Khan *et al.* (2022) señalan que las principales características que influyen en la vulnerabilidad social (VS) son la desigualdad de género en el enfoque del desempleo, la falta de acceso a la educación y a la seguridad médica, el hacinamiento en los hogares, la migración y las tasas de enfermedades crónicas y problemas de salud mental, así como aspectos culturales.

Con base en los lineamientos del Consejo Nacional de Evaluación de la Política de Desarrollo Social (CONEVAL), este estudio consideró los siguientes indicadores para medir la VS en los hogares: 1) condiciones en la vivienda; 2) salud y discapacidad; 3) diversidad lingüística; 4) migración familiar; 5) afectaciones por COVID-19; 6) composición familiar; 7) nivel educativo; 8) acceso a servicios de salud; y 9) situación laboral (Figura 2).

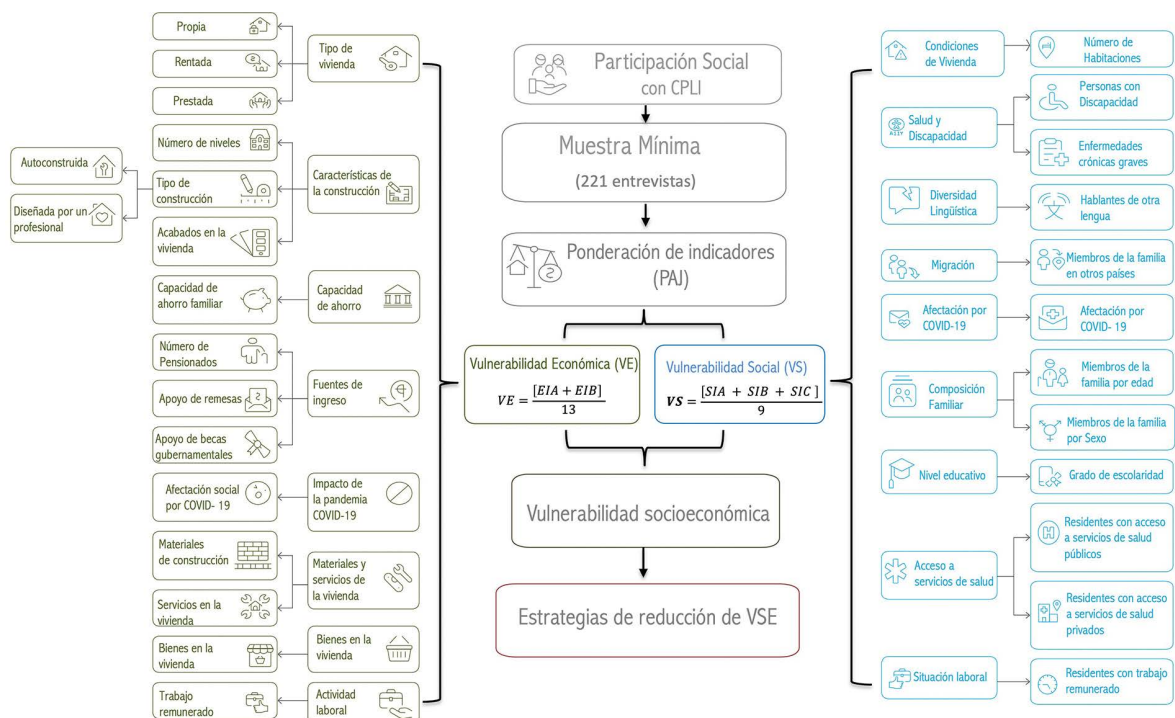


Figura 2. Diagrama del proceso metodológico que integra aspectos sociales y económicos para comprender cómo las condiciones de la población y su entorno influyen en su capacidad de enfrentar y recuperarse ante posibles riesgos, así como su incidencia en los ecosistemas. Al centro se representa el proceso general; a la izquierda, en verde, los indicadores de vulnerabilidad económica (VE) con las variables analizadas; y a la derecha, en azul, los indicadores de vulnerabilidad social (VS) con sus respectivas variables.

Para evaluar la VS se propuso la siguiente forma de análisis:

$$VS = \frac{[SIA + SIB + SIC]}{9} \quad (1)$$

Donde los indicadores SIA contienen una sola variable, mientras que SIB y SIC agrupan varias. En el caso de SIC, el resultado se expresa en porcentaje (Figura 2). El índice se calcula como el promedio de las ponderaciones de cada variable, aplicando un valor determinado (Tabla 2a).

CARACTERÍSTICAS ECONÓMICAS

La vulnerabilidad económica (VE) está vinculada a las condiciones estructurales del sistema social y productivo. Se relaciona con aspectos como la pobreza, la seguridad alimentaria, la fragilidad de los activos y el desarrollo sostenible (Alwang et al., 2001).

En este estudio se analizó el poder adquisitivo de las familias y las condiciones que pueden hacer que los gastos del hogar sean mayores. Para ello, se retomaron los enfoques de Novelo-Casanova y colaboradores (2022) y los indicadores del CO-NEVAL utilizados para medir la pobreza en México (Caballero, 2017), complementados con observaciones de campo.

Se consideraron trece indicadores agrupados en dos conjuntos (EIA y EIB), que evalúan características de la vivienda, acceso a servicios, empleo y apoyos económicos: 1) tipo de tenencia de la vivienda; 2) número de niveles; 3) tipo de construcción; 4) acabados; 5) capacidad de ahorro; 6) personas pensionadas; 7) remesas familiares; 8) becas gubernamentales; 9) afectación por COVID-19; 10) materiales de construcción; 11) servicios disponibles; 12) bienes domésticos y 13) actividad laboral (Figura 2, Tabla 2b). VE se calculó mediante la siguiente ecuación:

$$VE = \frac{[EIA + EIB]}{13} \quad (2)$$

A) Indicadores y variables relacionadas con el componente social.

SIA1) Número de habitaciones en la vivienda											
Descripción	1	2	3	4	5	6	7	8	9 o >		
Ponderación	0.10	0.10	0.30	0.40	0.50	0.70	0.90	0.90	0.99		
SIA2) Personas con discapacidad											
Descripción	Sí						No				
Ponderación	0.05						0.99				
SIA3) Personas parlantes de otra lengua											
Descripción	Sí						No				
Ponderación	0.05						0.20				
SIA4) Número de familiares en Estados Unidos											
Descripción	0	1	2	3	4	5 o >					
Ponderación	0.05	0.80	1.16	2.40	3.20	4.00					
SIA5) Afectación por COVID											
Descripción	1	2	3	4	5	6					
Ponderación	0.16	0.33	0.50	0.67	0.83	1.00					
SIB1) Clasificación del número de personas en vivienda por sexo y edad.											
1) Número de personas por vivienda.											
Descripción	De 1 a	2	3	4	5	6	7	8 o >			
Ponderación	0.10	0.30	0.40	0.50	0.60	0.90	0.99				
2) Número de mujeres > a 7 años											
Descripción	0	1	2	3	4	5	6	7	8 o >		
Ponderación	0.05	0.10	0.20	0.30	0.40	0.60	0.70	0.90	0.99		
3) Número de hombres > a 7 años											
Descripción	0	1	2	3	4	5 o >					
Ponderación	0.99	0.60	0.50	0.20	0.10	0.05					
4) Personas mayores de 70 años											
Descripción	0	1	2	3	4	5	6	7 o >			
Ponderación	0.05	0.80	1.20	2.40	3.20	4.00	4.80	5.60			
5) Menores de 6 años											
Descripción	0	1	2	3	4	5	6	7 o >			
Ponderación	0.05	0.60	0.80	1.80	2.40	3.00	3.60	4.20			
SIC1) Déficit de escolaridad de los habitantes en la vivienda											
1) Número de personas sin lecto-escritura											
Descripción	0	1	2	3	4	5 o >					
Ponderación	0.00	0.90	1.80	2.70	3.60	4.50					
2) Personas con primaria intermedia o terminada											
Descripción en %	0	<=20	<=40	<=60	<=80	>=80					
Ponderación	0.00	0.20	0.40	0.60	0.80	0.99					
3) Personas con secundaria intermedia o terminada											
Descripción	0	<=20	<=40	<=60	<=80	>=80					
Ponderación	0.00	0.20	0.40	0.60	0.80	0.99					
4) Personas con preparatoria intermedia o terminada											
Descripción	0	<=20	<=40	<=60	<=80	>=80					
Ponderación	0.00	0.20	0.40	0.60	0.80	0.99					
5) Personas con universidad intermedia o terminada											
Descripción	0	<=20	<=40	<=60	<=80	>=80					
Ponderación	0.99	0.80	0.60	0.40	0.20	0.05					
6) Personas con posgrado											
Descripción	0	<=20	<=40	<=60	<=80	<=80					
Ponderación	0.60	0.20	0.10	0.05	0						
SIC 2) Déficit de habitantes por vivienda sin seguridad social											
Descripción	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10 o >
Ponderación	0.05	0.80	1.60	2.40	3.20	4.00	4.80	5.60	6.40	7.20	8.00
SIC 3) Déficit de personas con trabajo remunerado en la vivienda											
Descripción	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9 o >	
Ponderación	0.05	0.90	1.80	2.70	3.60	4.50	5.40	6.30	7.20	8.10	

B) Ponderación otorgada a los indicadores para identificar la vulnerabilidad económica.

EIA1) Identificación del tipo de vivienda				
Descripción	Propia	Rentada	Prestada	
Ponderación	0.10	0.60	0.30	
EIA2) Número de niveles en la construcción				
Descripción	1		2	
Ponderación	0.80		0.20	
EIA3) Tipo de ejecución en la vivienda				
Descripción	Autoconstrucción		Diseño y ejecución por profesionales	
Ponderación	0.90		0.10	
EIA4) Acabados en la construcción				
Descripción	Muy poco	Medio	Acabados completos	
Ponderación	0.70	0.40	0.10	
EIA5) Capacidad de ahorro				
Descripción	Sí		No	
Ponderación	0.10		0.90	
EIA6) Personas pensionadas				
Descripción	0	1	2	3
Ponderación	0.60	0.20	0.10	0.05
EIA7) Capacidad de ahorro en el hogar				
Descripción	Sí		No	
Ponderación	0.00		0.99	
EIA8) Apoyo económico de gobierno				
Descripción	Sí		No	
Ponderación	0.00		0.99	
EIA9) Afectación económica por pandemia COVID-19				
1) pérdida de empleo; 2) carencia económica				
Descripción	0	1	2	
Ponderación	0.00	0.80	0.95	
EIB1) Material de construcción en la vivienda				
1) Materiales en paredes				
Descripción	Block	Ladrillo	Concreto	
Ponderación	0.30	0.20	0.10	
2) Materiales en techos				
Descripción	Lamina	Concreto	Madera	
Ponderación	0.70	0.20	0.10	
3) Materiales de pisos				
Descripción	Tierra	Cemento	Cerámica	
Ponderación	0.90	0.60	0.10	
EIB2) Servicios en la vivienda				
1) Tipo de drenaje				
Descripción	Red	Fosa	Caño abierto	Campo
Ponderación	0.15	0.50	0.60	0.80
2) Obtención del agua en la vivienda				
Descripción	Red	Ducto	Pipa	Pozo
Ponderación	0.05	0.30	0.50	0.60
3) Tipo de gas que se utiliza				
Descripción	Cilindro gas	Leña	Tanque elevado	Red subterránea
Ponderación	0.10	0.90	0.10	0.05
4) Si la vivienda cuenta con servicio de luz				
Descripción	Sí		No	
Ponderación	0.00		0.99	
EIB3) Bienes materiales en la vivienda				
1) Si la vivienda cuenta con bienes básicos: refrigerador, estufa, TV, lavadora y teléfono				
Descripción. Cantidad	1	2	3	4
Ponderación	0.80	0.60	0.40	0.20
2) Servicios como: 0) ninguno; 1) computadora; 2) servicio de internet				
Descripción. Cantidad	0	1	2	
Ponderación	0.20	0.10	0	
3) Bienes como: 0) ninguno; 1) motocicleta; 2) automóvil				
Descripción. Cantidad	0	1	2	
Ponderación	0.10	0.05	0	
EIB4) Actividad Laboral				
1) Actividades como: ninguna, labores del hogar y estudiantes				
Descripción. Número personas	1	2	3	4
Ponderación	0.20	0.40	0.60	0.80
2) Actividades como: ganadería, pescador, empleado y comerciante				
Descripción. Número personas	0	1	2	3
Ponderación	0.90	0.60	0.40	0.20
3) Actividades laboral: profesionistas				
Descripción. Número personas	0		= o > 1	
Ponderación	0.25		0.00	

Tabla 2. Valores propuestos en la metodología aplicada en La Mancha para el análisis de la VSE. Esta tabla permite identificar los factores que influyen en el grado de vulnerabilidad de la población en la región de estudio.

Figura 3. Representación espacial de la VSE en las localidades de estudio: A) Palmas de Abajo; B, C y D conforman La Mancha, integrada por Las Rocas, La Colonia, El Paraíso y El Crucero, respectivamente. Los resultados del análisis muestran que casi el 94 % de los hogares presenta altos niveles de vulnerabilidad, concentrados en mayor proporción en La Mancha.

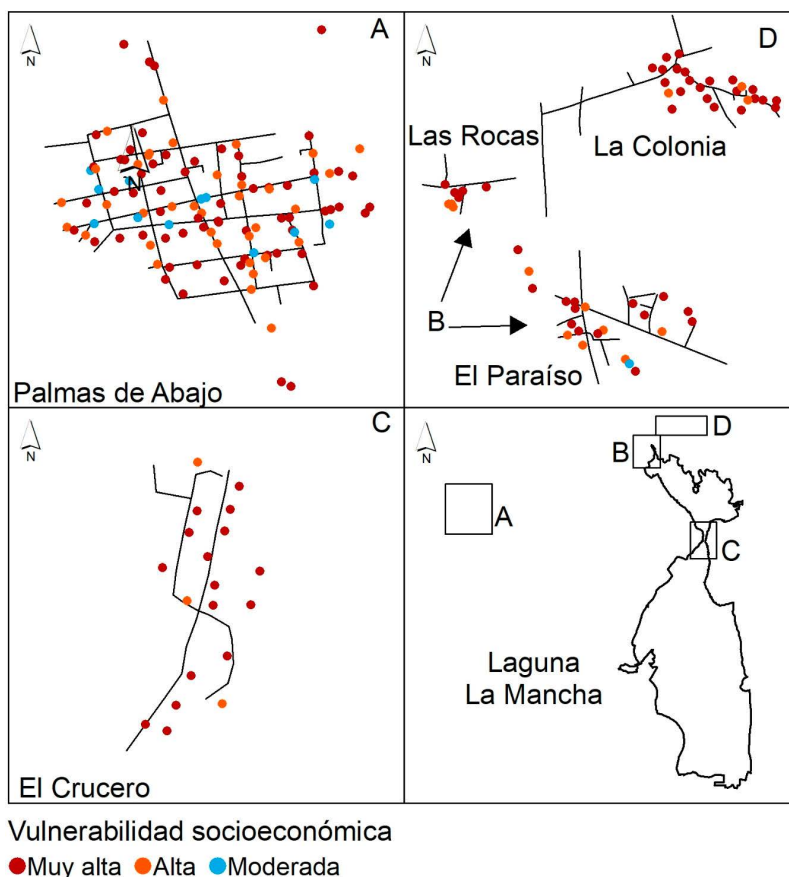
Donde los indicadores simples se agrupan en EIA, y los compuestos, en EIB. Por ejemplo, EIA1 (tipo de vivienda) se pondera asignando un valor de 0.60 a viviendas rentadas, 0.30 a prestadas y 0.10 a propias. En el caso de EIB1 (materiales de construcción), se consideran las paredes, el techo y el piso, asignando valores según la calidad del material: ladrillo cocido (0.20), concreto armado (0.20) y piso de tierra (0.90). La suma de estos valores permite obtener el índice final para cada hogar (Figura 2 y Tabla 2).

VULNERABILIDAD SOCIOECONÓMICA (VSE)

Con los datos de las características sociales y económicas se realizó un análisis estadístico utilizando el software R, con el propósito de identificar correlaciones que permitieran establecer el índice de VSE para cada hogar.

Los resultados se clasificaron en las categorías mencionadas en la Tabla 1. A partir de las coordenadas recolectadas durante el trabajo de campo, se elaboraron mapas en un sistema de información geográfica (SIG), empleando simbología y colores que facilitarían la interpretación visual de los resultados (Figura 3).

Dado que las localidades estudiadas presentan poblaciones reducidas, se optó por una representación puntual para visualizar la VSE de manera cua-



litativa, permitiendo su análisis tanto individual (por vivienda) como general (por localidad). Aunque no se incluyó el mapa de la comunidad de Palmas de Arriba—debido a su bajo número de viviendas (20)—, sus datos sí fueron integrados en el cálculo global del índice de VSE.

LA MANCHA, VERACRUZ

Y SU VULNERABILIDAD SOCIOECONÓMICA

Los resultados fueron contundentes: el 66.5 % de los hogares presenta una vulnerabilidad socioeconómica muy alta, mientras que un 27.1 % se ubica en el nivel alto. Solo el 6.3 % de la población mantiene una condición moderada. En conjunto, casi el 94 % de los hogares enfrenta altos niveles de vulnerabilidad (Figura 3).

Detrás de estas cifras hay realidades concretas:

- Falta de empleo permanente y bajos ingresos familiares.
- Acceso limitado a servicios médicos y educativos.



Figura 4. Representación conceptual de un socioecosistema saludable localizado en La Mancha, Veracruz, donde se ilustra la interacción armónica entre la sociedad –representada por la familia– y los servicios ecosistémicos que brinda la naturaleza. El esquema muestra cómo el equilibrio entre las actividades humanas y los procesos naturales favorece el bienestar comunitario y la conservación del entorno. Autores. Diseño conceptual Morán-Rodríguez S. Diseño y ejecución Rivera-Oloarte CE.

- Migración de personas jóvenes hacia otras regiones.
- Predominio de mujeres, niños y adultos mayores en la población local.
- Presencia de enfermedades crónicas o discapacidades que restringen la actividad laboral.

A estas condiciones se suma la degradación ambiental derivada del crecimiento urbano y de las actividades productivas tradicionales, como la agricultura, la ganadería y la pesca. La contaminación por fosas sépticas sin regulación y drenaje a cielo abierto afecta los cuerpos de agua, especialmente a la laguna de La Mancha, donde confluyen desechos domésticos y aguas residuales.

Esta situación no solo pone en riesgo la salud humana, sino que deteriora los ecosistemas que brindan servicios vitales como la captación de agua, protección ante amenazas hidrometeorológicas, contención y enriquecimiento de suelos (Zhang *et al.*, 2023).

Asimismo, se observó una necesidad urgente de infraestructura básica, como sistemas de saneamiento, tratamiento de aguas y abastecimiento de agua potable. En el caso de los pescadores de la laguna, se requiere impulsar planes de manejo sostenible que permitan aprovechar los recursos naturales sin comprometer su permanencia.

ESTRATEGIAS PARA REDUCIR LA VSE Y SU INCIDENCIA EN LA DEGRADACIÓN AMBIENTAL

La vulnerabilidad socioeconómica refleja la forma en que las desigualdades sociales y económicas se entrelazan con la degradación ambiental. En La Mancha, los altos niveles de VSE muestran que los procesos de urbanización, cuando no son sostenibles, amplifican tanto la pobreza como el deterioro de los ecosistemas.



© Ivette Tejero. *Ofelia*. Óleo/tela, 80 x 100 cm, 2024.

El método propuesto en este estudio permite identificar los factores que aumentan la vulnerabilidad y ofrece una herramienta práctica para orientar políticas públicas en la reducción del riesgo y el fortalecimiento del desarrollo urbano sostenible.

Reducir la VSE implica más que mejorar los ingresos o los servicios básicos: requiere fortalecer las capacidades locales, promover la equidad y garantizar el equilibrio entre sociedad y naturaleza.

El bienestar de las comunidades y la conservación de los ecosistemas son dos caras de una misma moneda. Entender esta relación es clave para construir territorios más resilientes, donde el desarrollo humano y el cuidado ambiental coexistan en armonía (Figura 4).

REFERENCIAS

- Alwang J, Siegel PB and Jorgensen SL (2001). Vulnerability: A view from different disciplines. Social protection discussion paper series. Washington DC, USA: Grupo del Banco Mundial. of International Disaster Law Online, pp. 314-318.
- Caballero ML (2017). El derecho a la educación en la medición de pobreza: un análisis complejo. *Educación y Humanismo* 33:386-397.
- Crichton D (1999). Natural Disaster Management. In J Ingleton (Ed.), *The risk triangle* (pp. 102-103). London: Tudor Rose.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía, INEGI (2020). Censo de Población y Vivienda. <https://www.inegi.org.mx/programas/ccpv/2020/>. Consultado enero 2025.
- Khan MA, Kabir KH, Hasan K *et al.* (2022). Households' socioeconomic vulnerability assessment due to COVID-19 outbreak: a web-based survey in Bangladesh. *Electronic Journal of General Medicine* 19(3):1-15.
- Morán-Rodríguez S and Novelo-Casanova DA (2018). A methodology to estimate seismic vulnerability of health facilities. Case study: Mexico City, Mexico. *Natural Hazards* 90(3):1349-1375.
- Novelo-Casanova DA, Suárez G, Cabral-Cano E *et al.* (2022). The Risk Atlas of Mexico City, Mexico: A tool for decision-making and disaster prevention. *Natural Hazards* 111(1):411-437.
- Saaty RW (1987). The analytic hierarchy process-What it is and how it is used. *Mathematical modelling* 9(3-5):161-176.
- Tierney K (2019). *Disasters: A sociological approach*. USA: John Wiley & Sons.
- Zhang X, Wang J, Yue C *et al.* (2023). Impact of wetland change on ecosystem services in different urbanization stages: A case study in the Hang-Jia-Hu region, China. *Ecological Indicators* 153:110382.

Sonia Morán-Rodríguez
Raymundo Dávalos Sotelo
Instituto de Ecología A.C., Xalapa, Veracruz
soniamoranrodriguez@gmail.com

Humedales artificiales: soluciones verdes para tratar aguas grises en zonas rurales

Daniel Alejandro **García López**

México enfrenta una de las crisis hídricas más graves de América Latina. Según datos de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA, 2020), más del 70 % de los cuerpos de agua superficiales del país presentan algún grado de contaminación. A esto se suma la sobreexplotación de acuíferos para la agricultura y actividades industriales, sin descartar la irregularidad en el acceso al agua potable en zonas rurales y, cada vez con más frecuencia, en grandes las urbes. Al mismo tiempo, la cobertura de tratamiento de aguas residuales en México apenas alcanza el 63.3 %, lo que significa que millones de metros cúbicos de aguas negras y grises sin tratamiento se vierten al ambiente cada año (CONAGUA, 2020).

Las aguas grises, que provienen de duchas, lavabos y lavadoras, representan hasta el 75 % del volumen total de aguas residuales domésticas. Este tipo de aguas, aunque no presentan materia fecal como las aguas negras, contienen materia orgánica e inorgánica en forma de jabón y restos de lavados. Desafortunadamente, las aguas grises reciben menor atención que las aguas negras, principalmente en zonas rurales con limitada infraestructura sanitaria. En muchas ocasiones este tipo de aguas no están conectadas a un sistema de tratamiento, por lo que terminan en cuerpos de agua donde se convierten en alimento para formas de vida microscópicas y ocasionan la eutrofización y muerte del ecosistema.

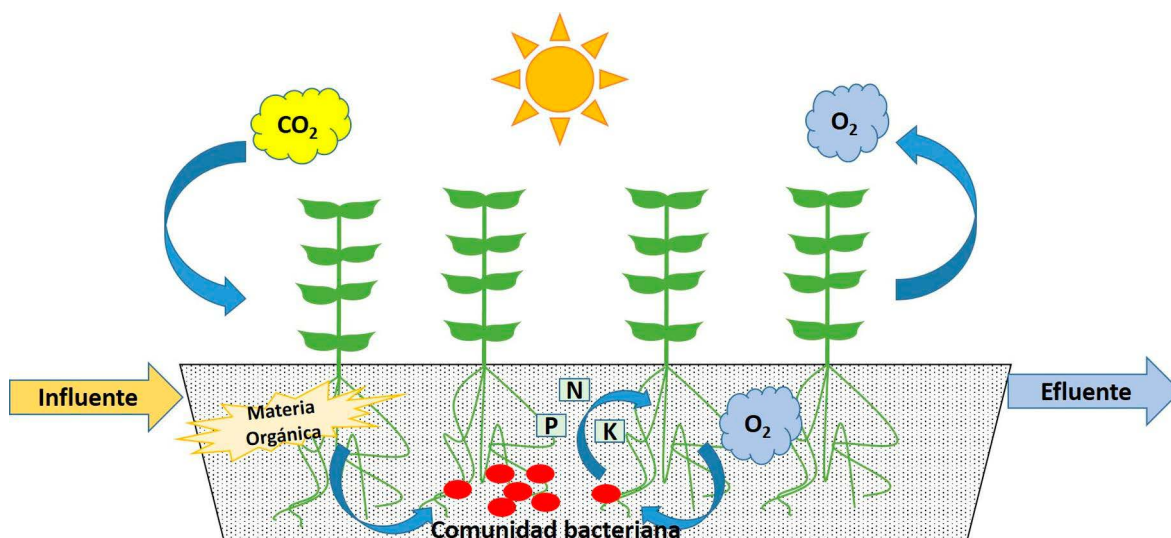


Figura 1. Funcionamiento de un humedal artificial. El influente rico en materia orgánica es aprovechado como fuente de alimento por una comunidad bacteriana, la cual convierte los compuestos orgánicos en compuestos más simples. Los microorganismos intercambian estos compuestos con las raíces, que los aprovechan como nutrientes (nitrógeno, fósforo, potasio, etc.) a cambio de oxígeno que proviene de la fotosíntesis. Como resultado, el efluente sale con una menor carga de compuestos orgánicos.

Uno de los retos impuestos por la Agenda 2030 en el objetivo de desarrollo sostenible (ODS) 6, es “Garantizar la disponibilidad de agua y su gestión sostenible y el saneamiento para todos”. Sin embargo, parece que nos encontramos lejos de alcanzar las metas impuestas en materia de agua, principalmente en zonas rurales donde la contaminación del agua requiere respuestas adaptadas a las condiciones regionales y el limitado acceso a servicios. En este contexto, los humedales artificiales emergen como una alternativa viable, ecológica y de bajo costo para tratar aguas residuales en comunidades donde los sistemas de saneamiento son insuficientes o inexistentes.

HUMEDALES ARTIFICIALES

Los humedales naturales son sistemas altamente productivos. Generalmente se localizan en zonas inundadas y con elevada humedad, donde la actividad de plantas y microorganismos es intensa, acelerando las reacciones químicas. Por esta razón se les ha llamado “los riñones de los ecosistemas” debido a los múltiples servicios que brindan para mantener la salud ambiental.

Inspirados en estos sistemas, los humedales artificiales buscan replicar sus funciones mediante la selección de especies vegetales, adaptadas dentro de un diseño ecológico que emula un humedal natural. Se utilizan principalmente para el tratamiento de aguas residuales urbanas, agrícolas e industriales a través de la acción conjunta de plantas acuáticas (macrófitas), microorganismos y un medio filtrante, como grava o arena.

Un humedal artificial se diseña a partir de un estanque poco profundo, impermeabilizado para evitar filtraciones, que se llena con grava como medio filtrante y sustrato para el crecimiento de plantas. Finalmente, se acondicionan tuberías de PVC para la entrada y salida del agua a tratar. Estos sistemas pueden sembrarse con diversas especies vegetales, entre las que destacan el tule, carrizo, papiro, alcatraz o ave del paraíso. Estas plantas son recomendables por su rápido crecimiento, eficiencia en la remoción de contaminantes, adaptabilidad al clima y porque no son especies comestibles.

FUNCIONAMIENTO DE LOS HUMEDALES ARTIFICIALES

Estos sistemas operan mediante distintos mecanismos (Arteaga-Cortez *et al.*, 2019), que pueden clasificarse como físicos (filtración, sedimentación),

Contaminante	Rango de remoción (%)	Planta utilizada	Referencia
BOD (Demanda Bioquímica de Oxígeno)	65 – 95	<i>Typha domingensis</i>	Hernández Vásquez <i>et al.</i> , 2022.
COD (Demanda Química de Oxígeno)	46.7 – 97.8	<i>Phragmites australis</i>	Hernández Vásquez <i>et al.</i> , 2022.
Nitrógeno	57 – 99	<i>Typha latifolia</i>	Tadesse <i>et al.</i> , 2015.
Fosfatos	74 – 93	<i>Pistia stratiotes</i>	Olguín <i>et al.</i> , 2017.
Fármacos (ibuprofeno)	97	<i>Eichhornia crassipes</i>	Hernández Vásquez <i>et al.</i> , 2022.
Metales pesados (Zn, Cd, Pb)	60 – 95	<i>Hydrilla verticillata</i>	Gill <i>et al.</i> , 2017, citado en Hernández Vásquez <i>et al.</i> , 2022.

Tabla 1. Eficiencia de remoción de contaminantes en humedales artificiales.

químicos (precipitación, adsorción) y biológicos (biodegradación, fitodepuración). Gracias a esta combinación, logran una alta eficiencia en la eliminación de sólidos suspendidos, materia orgánica, nutrientes como nitrógeno y fósforo, metales pesados y contaminantes emergentes como fármacos y microplásticos.

La actividad biológica dentro de un humedal artificial se basa en la asociación benéfica entre plantas y microorganismos que trabajan conjuntamente en la descontaminación del agua (Nava-Rojas *et al.*, 2023). Las raíces de estas plantas son el hábitat de una gran cantidad de microorganismos que participan activamente en la degradación de compuestos químicos que van desde formas de nitrógeno y fósforo, hasta estructuras más complejas como productos químicos sintéticos. El éxito de un humedal artificial depende fuertemente de que se establezca una comunidad bacteriana activa y eficiente, capaz de degradar contaminantes. En este sistema, el agua fluye a través de un filtro biológico donde las raíces retienen compuestos que son degradados por microorganismos. La acción de los microorganismos descompone compuestos complejos en formas más sencillas, que pueden ser absorbidas por las plantas a cambio del oxígeno producido durante la fotosíntesis. Así, se establece una simbiosis orientada a la eliminación de materia orgánica. Los contaminantes presentes en el agua son transformados en gases y minerales aprovechables por los organismos del sistema (Figura 1).

Numerosos estudios han demostrado la eficacia de los humedales artificiales para el tratamiento de aguas grises, confirmando su capacidad para remover diversos tipos de contaminantes (Tabla 1). Aunque la eficiencia de los humedales ha sido comprobada en numerosos estudios, en la práctica es necesario validar la calidad del agua que sale de un humedal artificial para garantizar su eficacia en la depuración de los contaminantes presentes en el agua residual.

OPORTUNIDADES Y DESAFÍOS EN LA CONSTRUCCIÓN DE HUMEDALES ARTIFICIALES

La tecnología de humedales artificiales representa una opción sustentable y de bajo costo para el tratamiento de aguas residuales, especialmente en infraestructuras de pequeña y mediana escala. Por ello, son adaptables a comunidades rurales, zonas agrícolas e incluso a espacios como hoteles o escuelas. Su atractivo radica en que no requieren fuentes adicionales de energía más allá de la solar, son fáciles de operar, se integran armónicamente al paisaje, pueden generar hábitats para aves e insectos, ofrecen buenos índices de remoción de contaminantes como nutrientes, materia orgánica y contaminantes emergentes; además, pueden alcanzar una vida útil de hasta 25 años (Arteaga-Cortez *et al.*, 2019).



Figura 2. Ejemplos de humedales artificiales en operación, A) humedal a base de plantas de papiro (*Cyperus papyrus*) y pontederia (*Pontederia L.*) para tratar agua del “paseo los lagos” en la ciudad de Xalapa, B) humedal a base de planta lechuguilla acuática (*Pistia stratiotes*) para tratar agua del río sordo en el Instituto de Ecología, AC, ciudad de Xalapa, C) humedal a base de plantas de alcatraz (*Zantedeschia aethiopica*) para tratar agua doméstica en el Instituto Tecnológico Superior de Libres, en ciudad de Libres, Puebla.

Sin embargo, también enfrentan desafíos importantes. Requieren mayor espacio para tratar grandes volúmenes de agua, y su eficiencia puede verse limitada en climas fríos donde el crecimiento vegetal es lento. Aunado a ello, existe una regulación limitada sobre este tipo de sistemas, lo que dificulta su aceptación como alternativas o complementos a las plantas de tratamiento convencionales.

En la actualidad, la tecnología de humedales artificiales se ha desarrollado ampliamente para el tratamiento de aguas residuales en Estados Unidos, Canadá, China y Europa, países que han logrado validar la tecnología y adaptarla a entornos urbanos y rurales. Desafortunadamente, en nuestro país, a pesar de que gozamos de condiciones climáticas favorables para el desarrollo de esta tecnología, su uso se encuentra limitado y se tiene un gran desconocimiento del tema por parte de actores gubernamentales y tomadores de decisiones.

La adopción de esta tecnología se ha visto opacada por el desconocimiento del tema a nivel nacional, regional y municipal, donde se opta por opciones convencionales, como las plantas de tratamiento de aguas residuales, a pesar de que no existe la capacidad económica ni técnica para garantizar su desarrollo y mantenimiento en pequeñas comunidades rurales (Palma-Cabrera *et al.*, 2022). De igual forma, las comunidades rurales cuentan con recursos limitados, por lo que servicios como el tratamiento de aguas residuales pasan a segundo plano; a esto hay que sumar la carencia en gobiernos municipales

rurales de instituciones ambientales capacitadas (Palma-Cabrera *et al.*, 2022).

En México, gran parte del esfuerzo para la adopción de humedales artificiales proviene de la academia. Instituciones como el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA), el Instituto de Ecología; A.C. (INECOL) o grandes universidades del país, han desarrollado humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales (Figura 2). También existen casos de éxito en comunidades rurales como San José Pastorías, en Actopan, Veracruz, donde se han instalado humedales artificiales que permiten el tratamiento de aguas con la integración y el apoyo de la comunidad (Marín-Muñoz *et al.*, 2024).

Desafortunadamente, a pesar de ser una tecnología efectiva y comprobada por varios grupos de investigación, la aplicación de humedales artificiales aún se encuentra limitada para resolver el problema de contaminación del agua en comunidades rurales. Es necesario el conocimiento y la adopción de esta tecnología por parte de las autoridades y la población en general para incorporar herramientas tecnológicas que coadyuven a la solución de esta problemática.

CONCLUSIÓN

Los humedales artificiales son una alternativa al tratamiento de aguas grises que pueden ayudar a lograr los objetivos de la agenda 2030 en materia de agua, especialmente en zonas rurales y con limitado acceso a recursos e infraestructura sanitaria. Existe abundante información disponible sobre el tema, pero desafortunadamente dicha información parece



© Ivette Tejero. Lunes de Dolores en Taxco, Guerrero.

estar concentrada en ámbitos académicos. Es necesario popularizar y divulgar las ventajas de esta tecnología porque, como se ha visto, la mayor limitante que enfrenta es su limitada visibilidad por actores con capacidad de decisión en ámbitos de gobierno.

Su funcionamiento, basado en procesos físicos, químicos y biológicos mediados por plantas y microorganismos, permite la remoción eficaz de diversos contaminantes. Al ser sistemas vivos, se integran al paisaje natural y requieren una inversión limitada y poca energía para operar. Frente a los retos que impone el cuidado del agua, los humedales artificiales destacan como soluciones verdes para el tratamiento de aguas grises en zonas rurales.

REFERENCIAS

- Arteaga-Cortez VM, Quevedo-Nolasco A, del Valle Paniagua DH *et al.* (2019). Estado del arte: una revisión actual a los mecanismos que realizan los humedales artificiales para la remoción de nitrógeno y fósforo. *Tecnología y ciencias del agua* 10(5): 319-343. DOI: <https://doi.org/10.24850/j-tyca-2019-05-12>.
- CONAGUA (2020). Estadísticas del Agua en México. Comisión Nacional del Agua. Recuperado de: <https://www.gob.mx/conagua>.
- Gill LW, Ring P, Casey B *et al.*, (2017). Long term heavy metal removal by a constructed wetland treating rainfall runoff from a motorway. *Science of The Total Environment* 601-602: 32-44. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.05.182>.
- Hernández Vásquez LA, Prieto García F, Prieto Méndez J *et al.*, (2022). Artificial wetlands and floating islands: Use of macrophytes. *South Florida Journal of Development* 3(1): 1-36. DOI: <https://doi.org/10.46932/sfjdv3n1-036>.
- Marín-Muñiz JL, Zitácuaro-Contreras I, Ortega-Pineda G *et al.*, (2024). Phytoremediation Performance with Ornamental Plants in Monocultures and Polycultures Conditions Using Constructed Wetlands Technology. *Plants* 13(7): 1051. DOI: <https://doi.org/10.3390/plants13071051>.
- Nava-Rojas J, Lango-Reynoso F y Castañeda-Chávez MR (2023). Remoción de Contaminantes en los Humedales Artificiales de Flujo Subsuperficial: Una Revisión. *Terra Latinoamericana* 41:e1715. DOI <https://doi.org/10.28940/terra.v41i0.1715>.
- Olguín EJ, García-López DA, González-Portela RA and Sánchez-Galván G (2017). Year round phytofiltration lagoon assessment using *Pistia stratiotes* within a pilot plant scale biorefinery. *Science of the Total Environment* 592:326-333. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.03.067>.
- Palma-Cabrera EM, Marín-Muñiz JL y Ruelas-Monjardín LC (2022). Limitantes para la adopción de humedales artificiales. *Emerging Trends in Education* 8(23):170-178. DOI: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=9493691>.
- Tadesse AT and Seyoum LA (2015). Evaluation of selected wetland plants for removal of chromium from tannery wastewater in constructed wetlands, Ethiopia. *African Journal of Environmental Science and Technology* 9(5):420-427. DOI: <https://doi.org/10.5897/AJEST2014.1793>.

Daniel Alejandro García López
Tecnológico Nacional de México / ITS de Libres
daniel.gl@libres.tecnm.mx

© Ivette Tejero. *Niñopa de Xochimilco.*



Microplásticos: una pequeña gran amenaza para nuestro mundo

Yaily **Fernández Arteaga**

En las últimas décadas, la humanidad ha sido testigo de una revolución basada en el uso de materiales plásticos, cuya versatilidad, durabilidad y bajo costo los han incorporado a prácticamente todos los aspectos de nuestra vida diaria. Sin embargo, esta dependencia ha generado un problema ambiental poco conocido: la proliferación de microplásticos. Estas partículas se han infiltrado en nuestros océanos, suelos, ríos e incluso en el aire, convirtiéndose en una amenaza silenciosa para el medio ambiente y la salud humana.

¿QUÉ SON Y DE DÓNDE PROVIENEN LOS MICROPLÁSTICOS?

Los microplásticos se definen como fragmentos de plástico menores a 5 mm. Su tamaño puede ser inferior al de hormigas obreras hembras (visibles a simple vista) o similar al de un bacilo de *Escherichia coli* (observable solo con microscopio). Su origen permite clasificarlos en primarios o secundarios. Los primarios se fabrican en tamaños diminutos para productos de consumo, como las microesferas en cosméticos exfoliantes, productos de limpieza facial y algunos dentífricos (Fernández, 2019). Los secundarios provienen de la degradación de objetos plásticos más grandes, como envases, bolsas, textiles y botellas, debido a la exposición a la luz solar, el viento o la acción mecánica del agua (Ashokkumar *et al.*, 2025). Una vez en el ecosistema,

sus dimensiones les permiten desplazarse fácilmente por corrientes de agua, suelos o ser transportados por el viento a grandes distancias (Thompson *et al.*, 2024). Así, pueden llegar a los rincones más remotos del planeta, desde las profundidades marinas hasta las cumbres montañosas.

IMPACTO DE LOS MICROPLÁSTICOS EN EL AGUA

Los microplásticos fluyen por océanos y ríos. Su impacto es más evidente en los primeros, donde representan un alto porcentaje de la contaminación marina; se estima que hay millones de toneladas de macro y microplásticos flotando en los océanos (Thompson *et al.*, 2024). Debido a su pequeño tamaño y baja biodegradabilidad, estas partículas permanecen en el agua durante períodos prolongados, siendo ingeridas por una amplia variedad de organismos marinos. El plancton, peces, aves marinas y mamíferos acuáticos a menudo confunden los microplásticos con alimentos. Su ingestión y acumulación pueden causar obstrucciones en el tracto digestivo, desnutrición y, en muchos casos, la muerte. Además, los microplásticos albergan metales pesados y pesticidas, entre otros contaminantes químicos que se adhieren a su superficie, transfiriéndolos a la cadena alimenticia. Estos se acumulan inicialmente en los cuerpos de animales o plantas y pasan eventualmente a los seres humanos (Nature Medicine, 2024), al igual que los microplásticos presentes en el agua potable, tanto de grifo como embotellada.

¿LOS MICROPLÁSTICOS EN LA TIERRA NOS PUEDEN AFECTAR?

Como resultado del uso de fertilizantes, la acumulación de residuos plásticos mal gestionados y su degradación, grandes cantidades de microplásticos terminan en campos agrícolas. Estas partículas pueden modificar la estructura del suelo y afectar su capacidad para retener agua y nutrientes, lo que repercute negativamente en la agricultura y la producción de alimentos. Además, los microplásticos

en el suelo son ingeridos por organismos como las lombrices, que podrían ver alteradas sus funciones vitales y su comportamiento, afectando su desempeño en los procesos de aireación y fertilización natural del suelo (Fernández, 2019). Estudios preliminares infieren que la ingesta de microplásticos por estos organismos podría provocar efectos en cascada en el ecosistema terrestre.

PRESENCIA DE MICROPLÁSTICOS EN EL AIRE

El descubrimiento de microplásticos suspendidos en el aire ha dado una nueva dimensión al estudio de su contaminación (Nature Medicine, 2024). Gracias a sus dimensiones y bajo peso, pueden ser transportados por el viento desde zonas urbanas o industriales, dispersándose en el aire y siendo inhalados por seres humanos y animales. Aunque las investigaciones sobre los efectos de la inhalación están en etapas iniciales, hay indicios de que podrían causar problemas respiratorios (Nature Medicine, 2024), similares a los causados por partículas en suspensión como el polvo y el polen. Además, como se mencionó, podrían transportar sustancias tóxicas adheridas a su superficie hasta los pulmones, lo que podría tener implicaciones más graves para la salud.

CAUSAS Y CONSECUENCIAS DE LA CONTAMINACIÓN POR MICROPLÁSTICOS

Las principales causas de esta contaminación son la producción y uso desmesurado de productos plásticos, así como la incorrecta gestión de sus desechos. La producción mundial de plásticos ha aumentado exponencialmente desde la década de 1950, y con ella, la cantidad de residuos mal gestionados que, al descomponerse, liberan microplásticos al medio ambiente durante largos períodos. Si a esto se suma la falta de regulaciones gubernamentales efectivas, se obtiene un incremento de la contaminación. Las consecuencias potenciales son preocupantes: alteran los ecosistemas, afectan la vida silvestre y contaminan las cadenas alimentarias. Los microplásticos transitan desde el agua, el



© Ivette Tejero. *Ícaro*. Óleo/tela. 100 x 100 cm.

aire y la tierra hasta nuestro cuerpo, utilizando como puente todo aquello con lo que interactuamos. Aunque aún se investigan sus impactos específicos en la salud, estudios como el de Benítez y Paz (2023) sugieren que podrían causar daños a nivel celular y generar respuestas inflamatorias. El cuerpo humano, al igual que el planeta, no puede desecharlos naturalmente, por lo que circulan en el organismo durante mucho tiempo y potencialmente interfieren en funciones celulares esenciales.

PANORAMA DE LA CONTAMINACIÓN POR PLÁSTICOS Y MICROPLÁSTICOS EN MÉXICO

Para comprender el estado actual de México en esta materia, es útil revisar el Inventario Nacional de Fuentes de Contaminación Plástica (INFCP) presentado por la SEMARNAT en 2023. En este documento se estimó un consumo de plásticos de 66 kg/persona/año en el país, de los cuales aproximadamente se desechan 59 kg/persona/año. El INFCP fue creado para orientar las políticas públicas del Plan de Acción Nacional sobre Residuos Marinos

y Contaminación por Plásticos (PLAN REMAR). En el estudio se identificaron las principales fuentes de contaminación plástica, clasificadas como terrestres y marinas. Las terrestres incluyen: 1) el mal manejo de residuos (la capacidad de recolección en México es del 83 %, mientras que el resto se vierte en ecosistemas naturales o se quema al aire libre); 2) las aguas residuales (con restos de microfibras y microperlas de productos de cuidado personal); 3) los agroplásticos (con un uso de alrededor de 280,000 toneladas/año en riegos, acolchados e invernaderos); 4) la industria del plástico (localizada principalmente en Tamaulipas y Veracruz, cuyos desechos alcanzan zonas distantes como las playas de Baja California Sur, Quintana Roo y Guerrero); 5) el turismo (con una estimación diaria de 7.87 kg/habitación), y 6) los neumáticos (considerados una fuente importante de microplásticos, aunque sin datos exactos en el país).

Las principales fuentes de contaminación de origen marino son: 1) la pesca y acuicultura (por la pérdida de redes e implementos, con un importante crecimiento en el Pacífico Norte y el Golfo de California), y 2) las embarcaciones (que producen residuos manejados a bordo o en puertos); de estas últimas hay poca información en México, pero preocupan especialmente los cruceros (con actividad creciente en el Caribe mexicano), que globalmente representan el 1 % de las embarcaciones pero producen el 25 % de los residuos plásticos de este origen. La contaminación plástica en México está presente en ecosistemas marinos, terrestres y de agua dulce, y alcanza zonas costeras y áreas naturales protegidas. Los plásticos representan entre el 60 y 90 % de los residuos en estas zonas. Los microplásticos están presentes en todas las playas analizadas en el INFCP, con las concentraciones más elevadas en Nayarit, el Caribe y Veracruz. Se detectaron en especies marinas como tortugas, tiburones, moluscos, crustáceos y peces. Ríos como el Tecate, el Atoyac, el Jampa y el Antigua también están contaminados. Además, se encontraron en suelos, invertebrados, aves y alimentos como té

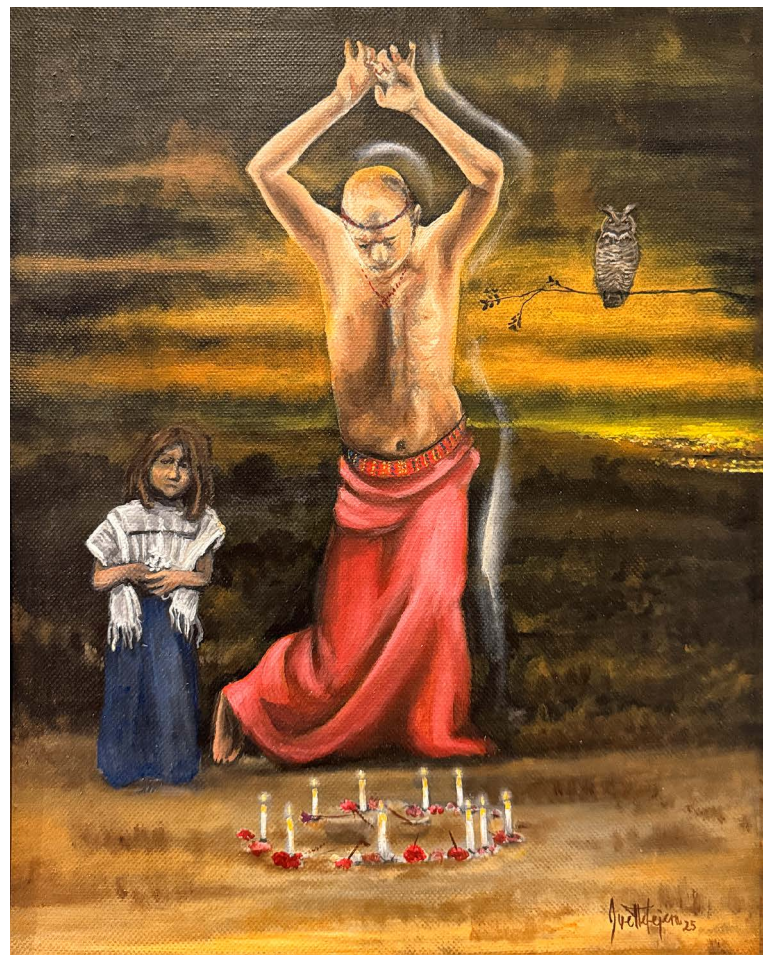
embotellados, cervezas y lácteos. Entre las regiones con contaminación crítica se encuentran los ríos Ruiz, Verde y Pánuco, conectados a Guadalajara, Ciudad de México y Puebla, considerados vías relevantes de transporte hacia el océano. En términos de gestión deficiente de residuos destacan Chiapas, Oaxaca, Guerrero y Veracruz, resaltando este último por su abundancia de ríos y regiones como Coatzacoalcos, donde confluyen densidad poblacional, industria petroquímica y un gran sitio de disposición irregular. Dado que muchas de estas zonas están cerca de áreas naturales protegidas, se determinó la necesidad de fortalecer los marcos regulatorios y las estrategias de conservación. Los resultados del INFCP mostraron un elevado interés en esta problemática, con la participación activa de más de 60 universidades, organismos públicos, empresas y organizaciones civiles. Sin embargo, aún se requiere estandarizar herramientas, redes y plataformas que favorezcan la interacción entre sectores y optimicen los recursos.

COMBATIR LA CONTAMINACIÓN POR MICROPLÁSTICOS

Para minimizar los efectos de esta contaminación, diferentes sectores de la sociedad están tomando medidas. Organizaciones ambientales encabezan campañas de limpieza y sensibilización, mientras los científicos investigan tecnologías para detectar y eliminar microplásticos. Además, algunos gobiernos han implementado políticas más estrictas sobre el uso de plásticos, como la reducción de los de un solo uso. En México se ha trabajado para modificar legislaciones estatales de gestión de residuos, buscando acciones de corresponsabilidad. Así, en 29 de los 32 estados se incluye la participación de diferentes sectores de la sociedad en sus leyes, aunque no existen estudios que demuestren cómo se distribuye esta responsabilidad. Estudios como el de Reyes y colaboradores (2024) se enfocan en proporcionar herramientas para unificar a los sectores de distribución y comercialización (en los que se apoyan el 90 % de las entidades federativas) con

los productivos y académicos de manera más sólida. Se necesita la aplicación efectiva de medidas como la responsabilidad extendida del productor, que busca que la gestión y sus costos sean asumidos por los generadores de residuos (Reyes et al., 2024). Actualmente se desarrollan nuevos materiales biodegradables que podrían reemplazar a los plásticos convencionales en muchas aplicaciones. La Unión Europea ha prohibido la venta de productos como cosméticos que contengan microesferas de plástico (Nature Medicine, 2024; Pop y Sánchez, 2024), ejemplo seguido por otras regiones. En México, una iniciativa similar fue uno de los objetivos principales del Acuerdo Nacional para la Nueva Economía del Plástico, con la participación de 80 empresas en 2023. En él se fijó la meta de eliminar el uso de microplásticos intencionalmente añadidos a productos para exfoliar, pulir

© Ivette Tejero. *Chamán Nocturno*.
De la Serie México Mágico. Óleo/tela. 55 x 43 cm.



o limpiar. También se establecieron metas progresivas para el acopio y el uso de material reciclado en productos plásticos hasta 2030 (ANIPAC, 2023), buscando crear una economía circular de los envases y empaques, compromiso adquirido por la industria en 2019. Este esfuerzo busca romper la cadena lineal de fabricar-usar-desechar e incluir la reutilización para alargar la vida útil de los materiales; está formalizado en la Ciudad de México mediante la Ley de Economía Circular (Reyes *et al.*, 2024). Adicionalmente, el país, a través de la Secretaría de Relaciones Exteriores, ha formado parte de iniciativas internacionales como el Comité Intergubernamental de Negociación para elaborar un instrumento internacional jurídicamente vinculante sobre la contaminación por plásticos (SRE, 2023).

¿CÓMO PUEDO SER PARTE DE LA SOLUCIÓN?

Aunque gran parte de la responsabilidad recae en gobiernos, organizaciones y científicos, cada uno de nosotros puede contribuir con pequeñas acciones: adoptar hábitos de consumo sostenibles, evitar productos plásticos de un solo uso, optar por textiles naturales y elegir cosméticos libres de microplásticos. Además, es esencial participar en iniciativas comunitarias (como campañas de limpieza de playas y parques), educarnos sobre el tema y compartir información. Estas acciones pueden ayudar a crear una conciencia colectiva que impulse un cambio importante.

¿ES POSIBLE UN FUTURO SIN MICROPLÁSTICOS?

La eliminación de la mayor cantidad posible de microplásticos es una tarea ardua que requiere la colaboración de gobiernos, industrias, científicos y ciudadanos. Si cada uno de nosotros, desde nuestro papel en la sociedad, realiza acciones enfocadas a este propósito, podremos reducir la cantidad de microplásticos que liberamos al medio ambiente y minimizar los posibles daños futuros. La contaminación por microplásticos es un hecho al que debemos prestar atención, y aunque actualmente no podamos controlarla del todo, juntos podemos emprender acciones que marquen la diferencia.

Recuerda que cada paso cuenta en la protección de nuestro planeta y nuestra salud.

REFERENCIAS

- Ashokkumar V, Chandramughi VP, Mohanty K and Gummadi SN (2025). Microplastic pollution: Critical analysis of global hotspots and their impact on health and ecosystems. *Journal of Environmental Management* 381:124995.
- Asociación Nacional de Industrias del Plástico A.C. (ANIPAC) (2023). Acuerdo Nacional para la Nueva Economía del Plástico en México. Recuperado el 04-10-2025 de: <https://anipac.org.mx/wp-content/uploads/2023/12/4to-Informe-AN-VERSION-FINAL.pdf>.
- Benítez GR y Paz R (2023). Microplásticos, un riesgo creciente para la salud. *Gaceta UNAM*. Recuperado el 07-05-2025 de: <https://www.gaceta.unam.mx/microplasticos-un-riesgo-creciente-para-la-salud/>.
- Fernández I (2019). Los microplásticos y sus consecuencias en el Medio Ambiente. *Greenteach*. Recuperado el 07-05-2025 de: <https://www.greenteach.es/microplasticos-consecuencias/>.
- Nature Medicine (2024). Microplastics are everywhere –we need to understand how they affect human health. *Nature Medicine* 30:913. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41591-024-02968-x>.
- Pop L M, Sánchez Fernández F (2024). Impacto de los microplásticos en la salud humana: riesgos emergentes y estrategias para mitigar su efecto. *Ocronos* 7: 2727. Recuperado el 07-05-2025 de: <https://revistamedica.com/impacto-microplasticos-salud-humana-medidas/>.
- Thompson RC, Courtene-Jones W, Boucher J *et al.* (2024). Twenty years of microplastic pollution research-what have we learned? *Science* 386:6720.
- Reyes Jaime A, Aguilar Ibarra A, Anglés Hernández M y Güereca Hernández LP (2024). Legislaciones estatales para los plásticos de un sólo uso en México: ¿Qué sectores están incluidos? *Revista Internacional de Contaminación Ambiental* 40. DOI: <https://doi.org/10.20937/RICA.54930>.
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) (2023). Inventario Nacional de Fuentes de Contaminación Plástica (INFCP). Recuperado el 04-10-2025 de: https://dsiappsdev.semarnat.gob.mx/datos/portal/publicaciones/2023/NFCP_2023.pdf.
- Secretaría de Relaciones Exteriores (SRE) (2023). El Comité Intergubernamental de Negociación para elaborar un Instrumento Internacional Jurídicamente Vinculante sobre la Contaminación por plásticos, incluyendo el medio marino. Recuperado el 04-10-2025 de: https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/846963/Informe_final.pdf.

Yailly Fernández Arteaga
Escuela Nacional de Estudios Superiores Unidad León
Universidad Nacional Autónoma de México
yfernandez@enes.unam.mx



© Ivette Tejero. *Carnaval de Zoque Coateco en Acozocautla, Michoacán*. De la Serie México Mágico. Óleo/madera, 32 x 28 cm.

La diversidad de hongos en México y el mundo: dificultades de estimación y relevancia biológica

Marko Gómez-Hernández
Etelvina Gándara

Desde tiempos prehistóricos los hongos nos han maravillado por su sorprendente variedad de formas, colores, consistencias y texturas (Figuras 1, 2, 3), además de que se les ha encontrado creciendo en casi todos los tipos de sustratos naturales y artificiales. Por sus características tan particulares, a los hongos microscópicos (Figura 4) y macroscópicos (producen cuerpos fructíferos apreciables a simple vista) (Figura 5) se les clasifica como un reino aparte del resto de los seres vivos, llamado reino Fungi, que constituye uno de los grupos de organismos más diversos en el planeta.

Por más de dos siglos se ha discutido ampliamente acerca de las especies que deben ser registradas dentro del reino Fungi, pero, gracias a los análisis moleculares, en los últimos 20 años se han logrado grandes avances en su clasificación (Wu *et al.*, 2019). La enorme labor de identificar y describir nuevas especies de hongos es parte del proceso que permite clasificarlas dentro de diferentes categorías jerárquicas, lo cual es la base para realizar otros tipos de investigaciones con hongos, como estudios ecológicos, étnicos, de conservación, etc. Sin embargo, el número de



Figura 1. *Hemitrichia serpula* de Cundinamarca, Colombia. Fotografía: © Alan Rockefeller.



Figura 3. *Hohenbuehelia mastrucata* de Michigan, EUA. Fotografía: © Alan Rockefeller.



Figura 2. *Lentaria* sp. de Arizona, EUA. Fotografía: © Alan Rockefeller.



Figura 4. *Metarhizium* sp. de Veracruz, México, parasitando un insecto. Fotografía: © Alan Rockefeller.

especies conocidas de hongos es considerablemente bajo, debido en parte a que la micología (rama de la biología que estudia los hongos) ha recibido menor apoyo y atención en comparación con otras áreas de la ciencia.

Realizar estudios adecuados de diversidad de hongos generalmente implica un enorme esfuerzo y gasto de recursos económicos (Figura 6), por lo que a la fecha no se cuenta con un inventario completo de las especies de hongos existentes en ningún área del planeta. Hibbett y colaboradores (2011) realizaron una extrapolación lineal y obtuvieron

un dato sorprendente: le restaron el número de especies de hongos descritas hasta el momento al número de especies estimadas en el mundo y el resultado lo dividieron entre la tasa anual de nuevas especies registradas en la última década, teniendo como resultado que se necesitan aproximadamente 1,175 años para completar un inventario de las especies de hongos a nivel global.

ESTIMANDO LA CANTIDAD DE HONGOS EN MÉXICO Y EL MUNDO

Es posible obtener una aproximación de la cantidad de especies de hongos que existen a escala



Figura 5. *Hemimycena tortuosa* de California, EUA. Fotografía: © Alan Rockefeller.

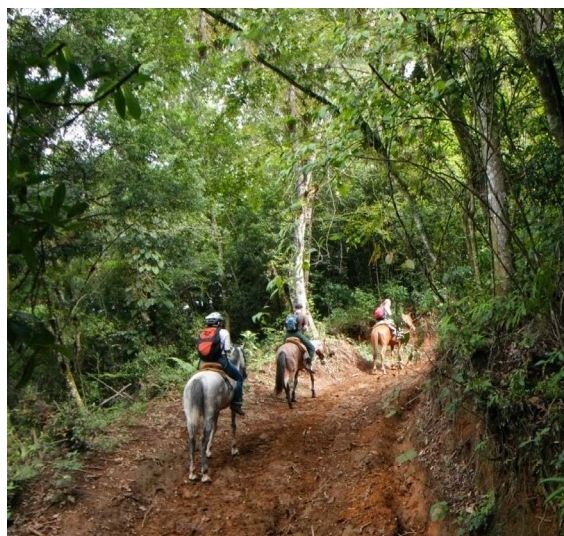


Figura 6. Recolecta de macrohongos en bosques del centro de Veracruz. Fotografía: Marko Gómez-Hernández.

regional o global; para esto se hacen estimaciones utilizando bases de datos que incluyen información de diferentes países. Una de las estimaciones más reconocidas y aceptadas por los científicos sugiere que existen aproximadamente 1.5 millones de especies de hongos en el mundo (Hawksworth, 1991), mientras que otra estimación también bastante aceptada sugiere que el número de especies de hongos es de aproximadamente 5.1 millones (Blackwell, 2011).

Ambas estimaciones han ganado gran aceptación ya que detallan de forma clara sus supuestos, fuentes y extrapolaciones, desde las proporciones hongo:planta y listados florísticos, hasta sus sesgos de muestreo. La posibilidad de replicar y criticar estos métodos generó confianza y, por ende, una enorme aprobación. Utilizando técnicas moleculares con información de hongos cultivables y no cultivables, un estudio indicó que en el planeta existen aproximadamente 12 millones de especies; sin embargo, dicha cifra fue muy criticada por la comunidad científica (Wu *et al.*, 2019). Esta estimación se ha considerado poco plausible ya que los resultados obtenidos con el método empleado pueden incluir una enorme diversidad “oscura” no observada ni cultivable, lo que incrementa considerablemente las cifras de diversidad, alejándolas de la realidad.

México se encuentra entre los cinco países con mayor biodiversidad en el planeta y posee aproximadamente el 10 % de la diversidad terrestre. Es reconocido mundialmente por el uso tradicional de hongos silvestres, con aproximadamente 450 especies registradas, haciéndolo el segundo país, después de China (con aproximadamente 600 especies), que más consume estos organismos (Ruán-Soto *et al.*, 2006). A pesar de la importancia de los hongos en los ecosistemas y las actividades humanas de nuestro país, son pocos los estudios de diversidad de hongos en comparación con otros grupos de organismos. Guzmán (1998) calculó que en México podría haber más de 200 mil especies de hongos, pero la revisión bibliográfica realizada por Aguirre y colaboradores (2014) indicó que se tienen registradas solamente 10,250, lo que equivale al 5.12 % de las especies estimadas.

El bajo porcentaje de especies de hongos registradas en México puede deberse a que la mayoría de los estudios sobre diversidad de hongos se enfoca en hongos macroscópicos, mientras que los microscópicos son poco incluidos en este tipo de investigaciones. En nuestro país, los micólogos (gente que estudia los hongos) reciben una enseñanza casi nula acerca de los hongos microscópicos, a menos

que se trate de especies de importancia médica, agrícola o industrial; este hecho limita conocer y entender aspectos relacionados con su diversidad y distribución. Existe consenso en que la escasez de taxónomos y recursos condiciona la descripción y evaluación de la diversidad fúngica, con impacto mayor en grupos de microhongos difíciles de identificar y cultivar (Hawksworth y Lücking, 2017). En el caso de estudios con hongos macroscópicos, un factor que dificulta registrar el número de especies en un área determinada es que algunas especies permanecen latentes bajo tierra u otro sustrato sin fructificar por uno o varios años, ocasionando una diferencia significativa entre el número de especies registradas y el número de especies que realmente hay en el sitio. Aunado a esto, las especies pequeñas o “poco carismáticas” reciben escasa atención, a pesar de ser las más representativas de los ambientes tropicales que dominan en México. Esto evidencia la urgencia de formar un mayor número de micólogos especialistas en grupos de especies que han sido poco o nada estudiadas.

¿POR QUÉ QUEREMOS CONOCER LA DIVERSIDAD DE HONGOS?

En años recientes ha aumentado el interés científico por investigar la diversidad de los hongos, y eso nos ha permitido entender su influencia en la supervivencia de otros organismos, su relación con la diversidad de especies vegetales y animales, así como su distribución en diferentes ambientes. La falta de información básica sobre la diversidad de los hongos tiene implicaciones en aspectos de la biología evolutiva, las hipótesis filogenéticas, el papel de los hongos en proveer resiliencia a la perturbación, los procesos y relaciones coevolutivas, y la interpretación de patrones biogeográficos (Mueller y Schmit, 2007).

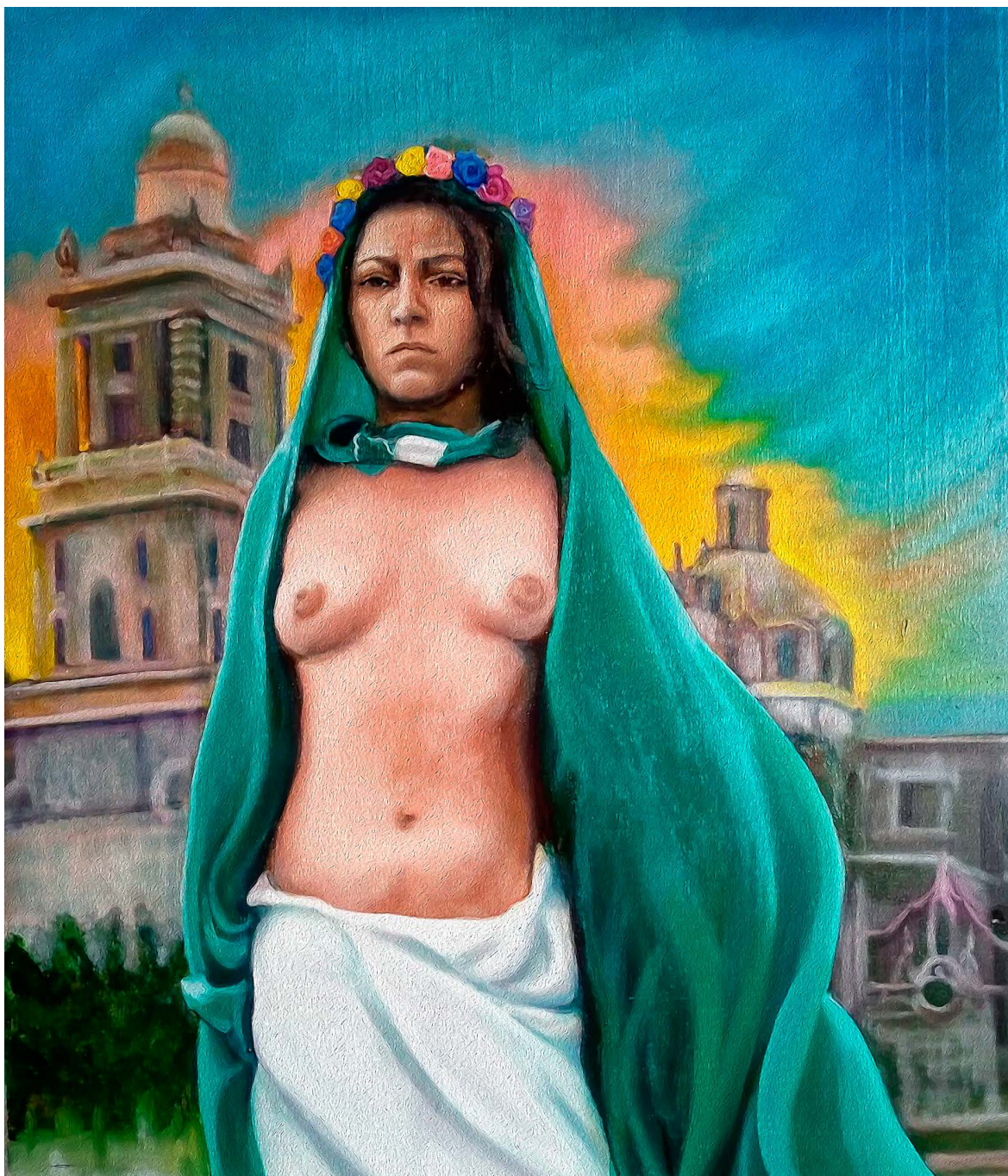
Los hongos microscópicos y macroscópicos son vitales para el funcionamiento de los ecosistemas y representan un recurso valioso que es utilizado en todo el mundo. Conocer su diversidad nos ayuda a

adquirir una mayor comprensión acerca de los servicios ecosistémicos que el recurso fúngico puede brindar y hacer un aprovechamiento adecuado de él. Además, los datos de diversidad pueden ayudar a que los hongos sean incluidos en planes de conservación, ya que generalmente se incluyen solo las especies de plantas y animales encontradas en las áreas de interés (Brown *et al.*, 2006).

Lamentablemente, la diversidad de los hongos puede ser afectada de forma grave por la alteración de su hábitat, ya que dependen principalmente de la vegetación y las condiciones ambientales, tales como humedad y temperatura. Es sumamente importante que aprendamos a valorar las áreas naturales y tomemos conciencia de lo necesario que es conservarlas. En conjunto, todos los grupos de organismos del planeta ayudan a mantener la estabilidad y el funcionamiento de los ecosistemas, de los cuales depende la vida de casi todos los seres vivos, incluyendo nuestra especie.

REFERENCIAS

- Aguirre-Acosta E, Ulloa M, Aguilar S *et al.* (2014). Biodiversidad de hongos en México. *Revista Mexicana de Biodiversidad* 85:S76-S81. DOI: <https://doi.org/10.7550/rmb.33649>.
- Blackwell M (2011). The Fungi: 1, 2, 3... 5.1 million species? *American Journal of Botany* 98(3):426-438. DOI: <https://doi.org/10.3732/ajb.1000298>.
- Brown N, Bhagwat S and Watkinson S (2006). Macrofungal diversity in fragmented and disturbed forests of the Western Ghats of India. *Journal of Applied Ecology* 43:11-17. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1365-2664.2005.01107.x>.
- Guzmán G (1998). Inventory of the fungi of Mexico. *Biodiversity and Conservation* 7:369-384. DOI: <https://doi.org/10.1023/A:1008833829473>.
- Hawksworth DL (1991). The fungal dimension of biodiversity: Magnitude, significance, and conservation. *Mycological Research* 95:641-655. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0953-7562\(09\)80810-1](https://doi.org/10.1016/S0953-7562(09)80810-1).
- Hawksworth DL and Lücking R (2017). Fungal diversity revisited: 2.2 to 3.8 million species. *Microbiology Spectrum* 5(4):funk-0052-2016. DOI: <https://doi.org/10.1128/microbiolspec.FUNK-0052-2016>.
- Hibbett DS, Ohman A and Glotzer D (2011). Progress in molecular and morphological taxon discovery in fungi and options for formal classification of environmental sequences. *Fungal Biology Reviews* 25:38-47. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fbr.2011.01.001>.
- Mueller GM and Schmit JP (2007). Fungal biodiversity: what do we know? What can we predict? *Biodiversity and Conservation* 16:1-5.



© Ivette Tejero. *Heroína Contemporánea*. De la Serie México Mágico. Óleo/madera, 67 x 60 cm, 2023.

DOI: <https://doi.org/10.1007/s10531-006-9117-7>.

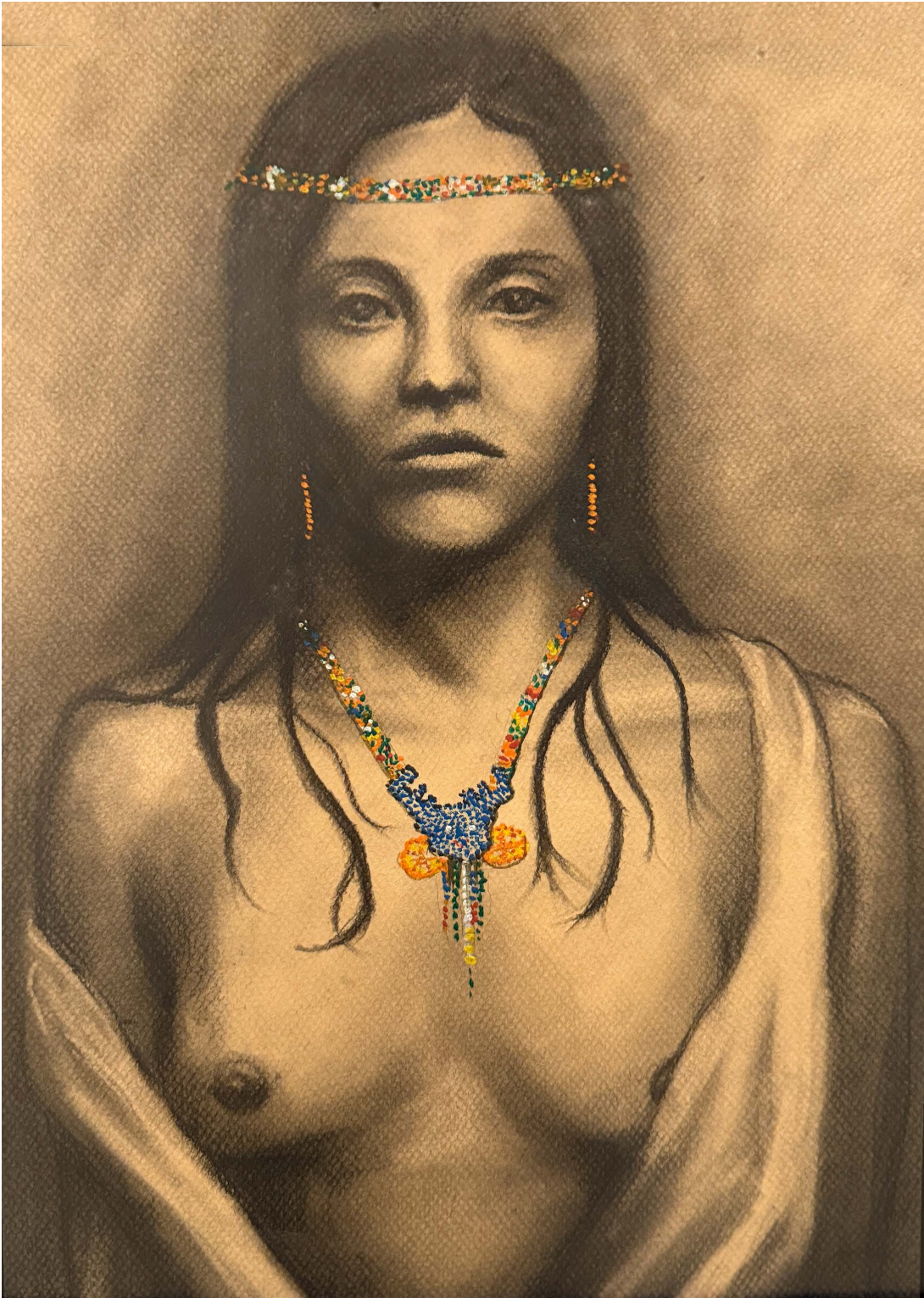
Ruán-Soto F, Garibay-Orijel R and Cifuentes J (2006). Process and dynamics of traditional selling wild edible mushrooms in tropical Mexico. *Journal of Ethnobiology and Ethnomedicine* 2:3. DOI: <https://doi.org/10.1186/1746-4269-2-3>.

Wu B, Hussain M, Zhang W et al. (2019). Current insights into fungal species diversity and perspective on naming the environmental DNA sequences of fungi. *Mycology* 10:12740-12740. DOI: <https://doi.org/10.1080/21501203.2019.1614106>.

Marko Gómez-Hernández
SECIHTI-Facultad de Ciencias Biológicas
Benemérita Universidad Autónoma de Puebla
mrk.gmz@gmail.com

Etelvina Gándara
Facultad de Ciencias Biológicas
Benemérita Universidad Autónoma de Puebla

© **Ivette Tejero**. *Joven Wixarika*. De la Serie México Mágico. Conté/papel, 60 x 45 cm.



Rumbo a la acuaponía inteligente con tecnología 4.0

Jesús Josafat **de León-Ramírez**
Juan Fernando **García Trejo**

La producción de alimentos es uno de los desafíos constantes ante el aumento de la población a escala mundial; además, la reducción de los recursos naturales y los efectos del cambio climático incrementan la problemática. Ante esta situación, surge la necesidad de encontrar estrategias que deriven en la producción sostenible de alimentos.

La acuaponía es una práctica productiva que combina el cultivo de peces (acuicultura) con el de plantas sin suelo (hidroponía) y actualmente está siendo implementada en algunos países debido a su capacidad de aprovechamiento de los recursos naturales, sumada a su bajo impacto ambiental. No obstante, los sistemas acuapónicos aún enfrentan algunos desafíos por resolver; entre ellos se encuentran su escalabilidad y mejora en el manejo, lo que limita su adopción como una opción real hacia la seguridad alimentaria. En este sentido, las tecnologías digitales asociadas a la industria 4.0 han brindado la oportunidad de transformar el sector agropecuario a través del llamado *smart farming* o agricultura inteligente, que involucra el uso de herramientas avanzadas como el Internet de las Cosas (IoT), la inteligencia artificial (IA), la robótica y el análisis de grandes volúmenes de datos (*big data*). Estas tecnologías permiten tomar decisiones basadas en datos recopilados en tiempo real, lo que mejora significativamente el control sobre los procesos de cultivo.

En el caso de la acuaponía, la aplicación de estas herramientas podría contribuir a solventar varias de las problemáticas actuales, como el control de variables críticas del agua, la optimización en el aprovechamiento de los nutrientes y la mejora en la operatividad del sistema (Channa *et al.*, 2024).

INTERNET DE LAS COSAS

El Internet de las Cosas (IoT, por sus siglas en inglés) se ha consolidado como una herramienta fundamental en la agricultura, al permitir el monitoreo continuo de variables críticas para el éxito de los cultivos. Esto se ha logrado mediante la implementación de sensores que recopilan y transmiten datos a sistemas digitales sobre variables como la humedad del suelo, la temperatura y los niveles de nutrientes en los cultivos. Estos sensores posibilitan a los productores acceder en tiempo real a la información generada y tomar decisiones sobre el manejo del cultivo. Como ejemplo, los sensores IoT en cultivos agrícolas han facilitado la optimización del riego en función de las condiciones climáticas y de la humedad del suelo, permitiendo reducir un 20 % el consumo de agua y un 15 % el uso de fertilizantes (Mohammed *et al.*, 2021).

En la actualidad, la acuicultura emplea el IoT para medir algunas variables del agua, como el oxígeno disuelto, la temperatura y el pH, lo que ha favorecido el cuidado de los peces. En el caso de la acuaponía, el monitoreo en tiempo real podría ser aplicado en distintos puntos clave. En primer lugar, el seguimiento a posibles cambios en los niveles de pH y oxígeno disuelto que pueden afectar negativamente tanto a los peces como a las plantas. Con esta información, los productores pueden tomar medidas correctivas antes de que produzcan daños. Además, el monitoreo continuo facilitaría el ajuste de las condiciones del sistema, por ejemplo, la concentración de compuestos como los nitratos, que en altas concentraciones son perjudiciales para los peces, pero son nutrientes esenciales para las plantas. Otra ventaja del IoT aplicado a la acuaponía es

su capacidad para resguardar información a través del ciclo de cultivo, la cual, al ser analizada, permite identificar tendencias en el mismo. Esto facilitaría a los productores el manejo del sistema en función de las condiciones óptimas observadas en ciclos pasados (Yanes *et al.*, 2020).

Las aplicaciones y beneficios potenciales del uso de IoT en acuaponía incluyen:

- Monitoreo de la calidad del agua: sensores que monitorean variables como el pH, la temperatura, los niveles de compuestos nitrogenados y la presencia de nutrientes.
- Alertas: notificaciones en tiempo real que permiten la corrección de condiciones desfavorables.
- Gestión remota: los sistemas conectados a IoT permiten a los productores supervisar sus instalaciones desde cualquier lugar, lo que resulta de utilidad cuando las instalaciones se encuentran en zonas retiradas.
- Optimización de recursos: el control de las condiciones del sistema reduce el desperdicio de agua y de nutrientes.

INTELIGENCIA ARTIFICIAL

La inteligencia artificial (IA) representa un gran avance en la automatización de sistemas agropecuarios, ya que permite analizar grandes cantidades de datos y tomar decisiones basadas en patrones que, de forma manual, serían difíciles de detectar (Elbasi *et al.*, 2022). La IA utiliza algoritmos de aprendizaje automático, entre ellos métodos de clasificación y predicción como *random forest*, redes neuronales profundas (DNN) o máquinas de soporte vectorial (SVM). Estos algoritmos, al analizar datos provenientes de sensores IoT, pueden estimar rendimientos, predecir enfermedades o ajustar automáticamente el suministro de nutrientes y alimento (Elbasi *et al.*, 2022). Los algoritmos de IA también pueden analizar los datos climáticos y de suelo para ajustar los planes de siembra y riego, optimizando el rendimiento de los cultivos. Gracias al uso de IA se ha reducido el uso de fertilizantes y pesticidas en los cultivos, lo que mejora la sostenibilidad y reduce los costos.

La inteligencia artificial ayuda en la gestión de sistemas agropecuarios mediante el análisis de datos en tiempo real y la creación de modelos predictivos. Aplicada a la acuaponía, la IA podrían ajustar automáticamente los niveles de nutrientes con base en las necesidades de las plantas en las diferentes fases de su crecimiento, así como ajustar la alimentación de los peces en función de su tamaño. En evaluaciones piloto, la utilización de algoritmos de IA ha permitido incrementar hasta un 18 % la eficiencia en el uso de nutrientes y reducir un 10 % el desperdicio de alimento (Yanes *et al.*, 2020). Además, la IA contribuiría al ajuste de variables como el pH y el oxígeno, lo que no solo mejoraría la eficiencia y productividad del sistema, sino que también reduciría el desperdicio de recursos (Yanes *et al.*, 2020). La IA podría prever problemas tales como la aparición de enfermedades en los peces o deficiencias nutricionales en las plantas, permitiendo la intervención antes de que los problemas se agraven (Channa *et al.*, 2024). En estudios recientes, el uso de *random forest* ha mostrado una precisión superior al 80 % en la predicción de rendimientos de cultivos hidropónicos y acuapónicos, mientras que las redes neuronales han sido eficaces en la detección temprana de anomalías en la calidad del agua (Ghandar *et al.*, 2021; Channa *et al.*, 2024).

Entre las aplicaciones y beneficios potenciales del uso de IA en acuaponía, podemos mencionar los siguientes:

- Optimización de nutrientes: el balance automático de los nutrientes en los momentos requeridos evitaría su desperdicio.
- Automatización de la alimentación de los peces: poder ajustar la cantidad y frecuencia de alimentación no solo reduce los costos de alimento, sino que también contribuye a mantener la calidad del agua de manera adecuada.
- Predicción de problemas: a partir de los historiales de cultivo, se podrían anticipar problemas inherentes al desarrollo de los organismos o al desempeño del sistema.
- Reducción de costos operativos: la minimización del desperdicio de nutrientes, alimento y agua reduciría los costos operativos en cada ciclo productivo.

BIG DATA

El análisis de *big data* ha permitido a los agricultores recopilar y analizar información de múltiples fuentes, incluyendo sensores, imágenes satelitales y datos históricos, todo ello para optimizar el uso de agua, fertilizantes y energía (Kamilaris *et al.*, 2017). En sistemas agrícolas a gran escala, el *big data* ha sido fundamental para mejorar la toma de decisiones estratégicas y aumentar la eficiencia en la producción. También ha permitido a los productores desarrollar modelos predictivos que mejoran el uso de recursos y anticipan posibles problemas. Por ejemplo, se puede identificar la correlación entre las condiciones del sistema y su rendimiento, lo que permite ajustar variables para maximizar la producción. Además, el análisis de datos históricos puede ayudar a prever cambios estacionales o fluctuaciones en el rendimiento, lo que mejora la planificación a largo plazo (Osinga *et al.*, 2022).

En primera instancia, aplicar el *big data* en los sistemas acuapónicos permitiría gestionar no solo datos de las condiciones del agua y el crecimiento de las plantas, sino también del rendimiento de los peces, el consumo de nutrientes y otros factores que influyen en el funcionamiento del sistema. Así, el análisis de *big data* permitiría anticipar los rendimientos bajo diferentes condiciones de manejo y climáticas que también inciden en la producción (Ghandar *et al.*, 2021). Sin embargo, es importante señalar que la identificación de correlaciones no implica necesariamente causalidad directa (Osinga *et al.*, 2022).

- Algunas aplicaciones y beneficios potenciales del uso de *big data* en acuaponía son:
- Elaboración de modelos predictivos: prever los rendimientos de plantas y peces en función de los datos históricos.
- Optimización de recursos: uso eficiente de agua, nutrientes e incluso energía a través del análisis de datos.
- Análisis de tendencias: identificación de patrones y comportamientos del sistema.

Mejora en la toma de decisiones: contar con información detallada sobre el rendimiento permite una correcta planificación y mejora la sostenibilidad del sistema.

AUTOMATIZACIÓN

La automatización es otra acción clave en la tecnología 4.0, ya que facilita la realización de muchas actividades que son repetitivas y exhaustivas, lo que reduce la carga de trabajo manual y permite que los productores se centren en otras acciones inherentes al manejo del sistema (Abbasi *et al.*, 2022).

En la agricultura, la automatización ha llevado al desarrollo de equipos que son utilizados para tareas como la siembra, la cosecha y el control de plagas. En la ganadería, también se emplean equipos automatizados que, entre otras cosas, se utilizan para la alimentación del ganado y la ordeña de vacas.

Los sistemas acuapónicos requieren una gran cantidad de trabajo manual, desde la alimentación de los peces hasta la cosecha de las plantas, y la automatización podría facilitar la realización de estas actividades. Por ejemplo, con la automatización se podría alimentar a los peces en intervalos precisos y ajustar la cantidad de alimento según el tamaño, crecimiento de los peces y condiciones como la temperatura del agua. En el caso de las plantas, mediante inspecciones visuales periódicas se podrían detectar problemas de crecimiento (deficiencias de nutrientes y presencia de plagas o enfermedades), así como determinar el momento adecuado de cosecha a partir del grado de madurez. Esto no solo reduciría costos, sino que también mejoraría la eficiencia operativa (Channa *et al.*, 2024).

Entre las aplicaciones y beneficios potenciales de la automatización aplicada en acuaponía podemos mencionar los siguientes:

- Alimentación de los peces: el suministro de alimento para los peces se realizaría de manera precisa y programada.
- Cosecha de plantas o frutos: recolección en el momento preciso de acuerdo con las necesidades comerciales.

- Monitoreo: equipos con cámaras y sensores permitirían dar seguimiento a la salud de las plantas y peces.
- Reducción de costos operativos: la automatización de tareas repetitivas reduce la necesidad de mano de obra e incluso la presencia de errores humanos.

DESAFÍOS EN LA IMPLEMENTACIÓN DE LA TECNOLOGÍA 4.0 EN ACUAPONÍA

Aunque las oportunidades que ofrece la tecnología 4.0 en sistemas acuapónicos son prometedoras, su adopción enfrenta una serie de desafíos importantes que pueden retrasar su implementación. Entre ellos podemos mencionar los siguientes:

1. *Costo inicial.* El costo de instalar sensores IoT, sistemas IA y *big data*, además de la automatización en sistemas acuapónicos, puede variar significativamente según la escala del sistema y el nivel de automatización deseado. No obstante, la inversión inicial puede requerir más de \$1,000,000 MN, sumado a los demás costos operativos; esta situación limita el acceso a esta tecnología a pequeños y medianos productores (Channa *et al.*, 2024).
2. *Capacitación técnica.* Además del costo inicial, la capacitación técnica requerida para operar y mantener sistemas acuapónicos inteligentes puede ser un desafío significativo. Los sistemas que dependen de la tecnología 4.0 requieren personal capacitado para manejar, interpretar datos, realizar ajustes y mantenimiento preventivo en el equipo. En regiones rurales o países en desarrollo, donde el acceso a la educación tecnológica es limitado, la falta de personal capacitado puede constituir una barrera importante para la adopción de estas tecnologías (Da Silveira *et al.*, 2021). La formación de operadores y técnicos calificados es un proceso que requiere tiempo y recursos, y puede generar costos adicionales para los productores.
3. *Infraestructura de redes.* Otro desafío crucial es la infraestructura necesaria para soportar la implementación de tecnologías 4.0, especialmente en términos de conectividad de redes (Da Silveira *et al.*, 2021). En áreas rurales, donde los sistemas



© Ivette Tejero. *Wak Chamil Ahau*. Óleo/tela, 70 x 50 cm, 2024.

acuapónicos podrían tener un gran impacto, a menudo carecen de redes de comunicación estables que permitan la transmisión de datos en tiempo real (Yanes *et al.*, 2020). La falta de infraestructura de telecomunicaciones puede hacer que sea casi imposible utilizar algunas de las funciones de la tecnología 4.0, como la monitorización remota y la automatización basada en datos en tiempo real.

CONSIDERACIONES ÉTICAS

Si bien la adopción de tecnologías 4.0 en sistemas acuapónicos ofrece beneficios en términos de eficiencia, sostenibilidad y productividad, también plantea cuestionamientos éticos que deben ser considerados. Uno de ellos es la desigualdad en el acceso,

ya que los altos costos de implementación, la dependencia de proveedores tecnológicos y la necesidad de contar con personal capacitado pueden ampliar la brecha entre grandes y pequeños productores.

En términos sociales, la automatización de procesos podría disminuir la demanda de mano de obra en actividades rutinarias, lo que representa un desafío en regiones donde la producción agropecuaria es una fuente importante de empleo. Finalmente, la incorporación de equipos electrónicos y sistemas digitales demanda una reflexión sobre su sostenibilidad integral, reflexión que debe considerar la huella energética de los dispositivos, la durabilidad de los equipos y la disposición final de componentes electrónicos.

En este sentido, la integración de tecnologías 4.0 en acuaponía debe acompañarse de un análisis ético que asegure que los beneficios productivos y ambientales se equilibren con principios de equidad social, justicia ambiental y autonomía de los productores.

PERSPECTIVAS

A pesar de estos desafíos, se espera que en un futuro la adopción de tecnologías 4.0 sea posible en cuanto los costos disminuyan y las tecnologías se vuelvan más accesibles. También se espera que los avances en la conectividad 5G ayuden a superar los problemas de infraestructura, lo que facilitará la implementación de sistemas acuapónicos inteligentes incluso en áreas rurales (Liu *et al.*, 2020). Además, las iniciativas gubernamentales y los programas de subsidios en muchos países están comenzando a apoyar la adopción de tecnologías sostenibles en la agricultura.

Es fundamental impulsar políticas públicas específicas que fomenten la adopción de tecnologías inteligentes en acuaponía. Ejemplos de ello son los subsidios dirigidos a la adquisición de sensores IoT en zonas rurales o marginadas, así como programas de capacitación técnica orientados a pequeños y medianos productores. De manera complementaria, el desarrollo y la promoción de tecnologías de bajo costo, como sensores de código abierto y plataformas

digitales de libre acceso, representan una alternativa viable para reducir costos y democratizar el acceso a estas herramientas (Da Silveira *et al.*, 2021).

A medida que las tecnologías 4.0 se vuelvan más accesibles y la educación en estas herramientas se expanda, la acuaponía podría desempeñar un papel clave en el futuro de la producción sostenible de alimentos.

R E F E R E N C I A S

- Abbasi R, Martinez P and Ahmad R (2022). The digitization of agricultural industry-a systematic literature review on agriculture 4.0. *Smart Agricultural Technology* 2:100042.
- Channa AA, Munir K, Hansen M and Tariq MF (2024). Optimisation of Small-Scale Aquaponics Systems Using Artificial Intelligence and the IoT: Current Status, Challenges, and Opportunities. *Encyclopedia* 4(1):313-336.
- Da Silveira F, Lermen FH and Amaral FG (2021). An overview of agriculture 4.0 development: Systematic review of descriptions, technologies, barriers, advantages, and disadvantages. *Computers and Electronics in Agriculture* 189:106405.
- Elbasi E, Mostafa N, AlArnaout Z *et al.* (2022). Artificial intelligence technology in the agricultural sector: A systematic literature review. *IEEE Access* 11:171-202.
- Ghandar A, Ahmed A, Zulfikar S *et al.* (2021). A decision support system for urban agriculture using digital twin: A case study with aquaponics. *IEEE Access* 9:35691-35708.
- Kamilaris A, Kartakoullis A and Prenafeta-Boldú FX (2017). A review on the practice of big data analysis in agriculture. *Computers and Electronics in Agriculture* 143:23-37.
- Liu Y, Ma X, Shu L *et al.* (2020). From industry 4.0 to agriculture 4.0: Current status, enabling technologies, and research challenges. *IEEE Transactions on Industrial Informatics* 17:4322-4334.
- Mohammed M, Riad K and Alqahtani N (2021). Efficient IoT-based control for a smart subsurface irrigation system to enhance irrigation management of date palm. *Sensors* 21(12):3942.
- Osinga SA, Paudel D, Mouzakitis SA and Athanasiadis IN (2022). Big data in agriculture: Between opportunity and solution. *Agricultural Systems* 195:103298.
- Yanes AR, Martinez P and Ahmad R (2020). Towards automated aquaponics: A review on monitoring, IoT, and smart systems. *Journal of Cleaner Production* 263:121571.

Jesús Josafat de León-Ramírez
Juan Fernando García Trejo
Facultad de Ingeniería
Universidad Autónoma de Querétaro
Campus Amazcala
leonjjrmz@gmail.com

Plantaciones de árboles de navidad en el Estado de México: especies, distribución y retos

Tania María **Vega Valero**
Zuleyma **Zarco González**

La costumbre de adornar los hogares con un árbol de navidad durante la temporada decembrina se remonta a alrededor del año 1500 en Alemania, y se fue adoptando y adaptando por Europa y el resto del mundo (Cortés, 2014). A partir de 1970, en México comenzó la importación de árboles procedentes de Estados Unidos y Canadá, por lo que se incrementó el interés público y la producción de árboles de navidad en viveros con la finalidad de satisfacer la demanda, fomentar el comercio nacional y reducir la importación de especies (Cortés, 2014). En la década de 1990 se establecieron las regulaciones fitosanitarias y los manuales de procedimientos para la comercialización de árboles de navidad en México bajo la Norma Oficial Mexicana NOM-013 (SEMARNAT, 2010), con la finalidad de regular la importación de especies de los géneros *Pinus*, *Abies* y *Pseudotsuga*.

MÁS QUE UN ADORNO: BENEFICIOS PARA LA NATURALEZA Y LAS PERSONAS

El Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP) analizó algunos impactos socioeconómicos y ambientales de las plantaciones de árboles

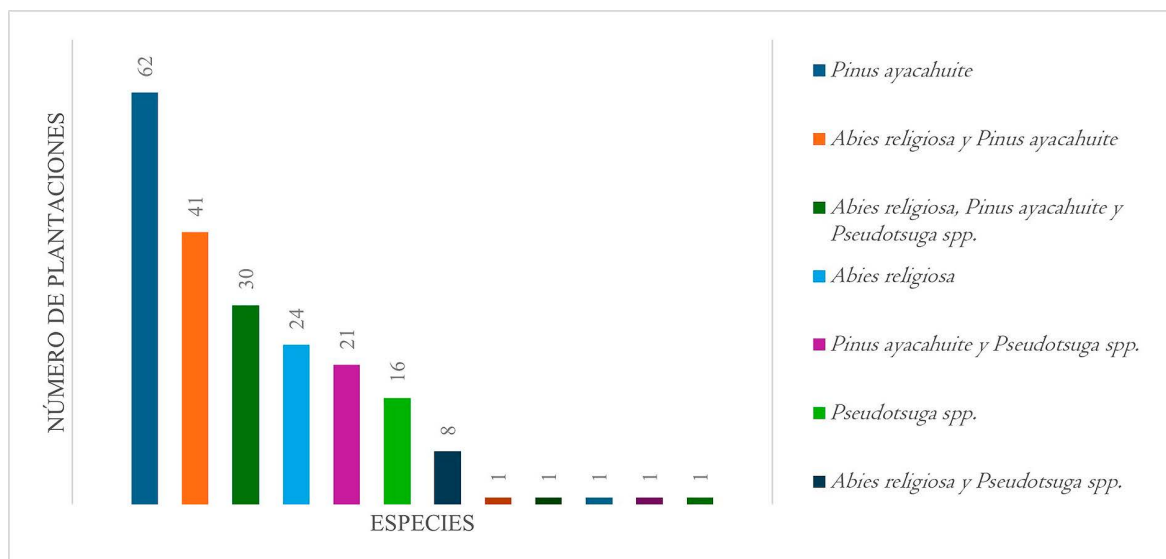


Figura 1. Número de plantaciones y especies arbóreas utilizadas. Elaborado con datos del *Inventario de puntos de venta de árboles de navidad* (2023).

de Navidad; resalta la importancia de estas en los ambientes urbanos y rurales. El análisis destaca el hecho de que las plantaciones de árboles de navidad han impactado a nivel socioeconómico el desarrollo rural sostenible, puesto que esta actividad promueve la diversificación de actividades económicas productivas y genera empleos en sitios rurales a ejidatarios y comuneros (Zamora, 2015).

En el aspecto ambiental, las plantaciones proporcionan una gran cantidad de servicios ecosistémicos que abarcan cuatro grandes categorías: 1) aprovisionamiento 2) regulación 3) sostenimiento y 4) servicios culturales. Estos servicios, en conjunto, protegen la biodiversidad, mantienen la cobertura arbórea y proporcionan un escenario recreativo con servicios de ecoturismo en la temporada navideña (Sánchez *et al.*, 2023).

En resumen: un árbol de navidad natural no solo adorna tu casa, también es parte de un ciclo productivo y ecológico que beneficia a las personas y al ambiente.

En México, las plantaciones de árboles de navidad están distribuidas en 13 entidades, de las cuales destacan el Estado de México, Puebla, Michoacán, Veracruz, Ciudad de México y Tlaxcala (CONAFOR, 2023). Todas comparten características similares,

como montañas a más de 2,000 metros de altitud con climas templados.

En el centro-sur del país se encuentra el Estado de México, con casi 17 millones de habitantes, donde las principales actividades económicas corresponden a los sectores de la industria automotriz, textil y agrícola (Gobierno del Estado de México, 2024). El estado cuenta con una gran diversidad cultural y natural, y gracias a su topografía también tiene diversos climas que favorecen la producción de árboles de navidad. Por ejemplo, el 73 % del territorio presenta clima subhúmedo en los valles altos del norte, centro y este; el 21 % corresponde a clima cálido subhúmedo hacia el sureste, y el 6 % a clima seco y semiseco en el noreste (INEGI, 2025). La temperatura media anual es de 14.7 °C; los meses más fríos son enero y febrero, que registran temperaturas mínimas de 3 °C, y en los meses más cálidos, abril y mayo, el promedio es de 25 °C (INEGI, 2001). En las partes altas de las montañas se pueden encontrar bosques de pino, encino, oyamel y táscate.

Saber en dónde están ubicadas las plantaciones y qué especies se producen en ellas es clave para entender la manera en que esta actividad impacta a las comunidades rurales y al ambiente. La distribución permite identificar qué municipios se benefician económicamente, cuáles requieren apoyo y capacitación para aprovechar mejor sus recursos, y qué

Municipio	Superficie (km ²)	Rango altitudinal (msnm)	Temperatura (° C)	Uso forestal (%)
Xonacatlán	32.87	113 a 3,699	1 a 24	42
Amecameca	172.90	210 a 3,099	4 a 24	25
Isidro Fabela	75.97	26 a 3,757	0 a 4	74

Tabla 1. Características geográficas de los municipios con mayor número de plantaciones.

riesgos existen frente a plagas, heladas, sequías y cambio climático.

Para conocer la distribución de las plantaciones de árboles de navidad en el Estado de México se consultó el *Inventario de puntos de venta de árboles de navidad 2023* (<https://directoriarboles.cnf.gob.mx/>) de la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) y la Comisión Nacional de Recursos Forestales (CONAFOR). Empleando los filtros que proporciona el sitio web, se seleccionó el Estado de México para obtener la cantidad de plantaciones por municipio, nombre de la plantación, coordenadas y especies utilizadas.

Con la información obtenida del inventario se construyó una base de datos para conocer qué especies y con qué frecuencia son utilizadas, e identificar los municipios con mayor número de plantaciones. Se caracterizaron los municipios con más plantaciones en referencia a su altitud, clima y porcentaje de cobertura forestal. Para obtener los valores de altitud se descargó el ráster del *Continuo de elevaciones mexicano* del INEGI (2013). Para el componente climático se consultó el portal Weather Spark, que proporciona información en tiempo real sobre el clima promedio (<https://weatherspark.com/>). Finalmente, para la cobertura forestal, se consultó Global Forest Watch (<https://www.globalforestwatch.org/>), que proporciona información reciente sobre cambios en las superficies forestales y cuantifica pérdidas o ganancias de cobertura forestal.

¿QUÉ ESPECIES SON LAS FAVORITAS?

De acuerdo con el *Inventario de puntos de venta*, se encontró que *Pinus ayacahuite* es la especie que

predomina en el Estado de México, con presencia en 62 plantaciones, seguido de *Abies religiosa* (oyamel) en combinación con *Pinus ayacahuite* en 41 plantaciones, *Pseudotsuga* spp., o pinabete, también está presente, pero en menor proporción (Figura 1).

Cada especie tiene sus particularidades; por ejemplo, *Pinus ayacahuite* se distribuye en zonas montañosas con altitudes que van desde los 2,000 hasta los 3,200 metros sobre el nivel del mar (msnm) en suelos volcánicos, con una gran cantidad de minerales y que son fértiles debido a la retención de nutrientes y agua. Requiere de temperaturas entre 12 y 19 °C, es decir, crece en sitios donde más de la mitad del año está nublado y ocurren heladas intensas (CONAFOR, 2012).

Abies religiosa es la especie más utilizada con fines ornamentales y como árboles de navidad. Se distribuye en altitudes que van de los 2,800 a los 3,500 metros sobre el nivel del mar, especialmente en el Estado de México y Jalisco. Esta especie crece en suelos de origen volcánico con pendientes en climas que van de templado a muy frío (-12 a 17 °C), además de ser una especie resiliente ante varias amenazas (CONAFOR, 2012).

El pinabete o *Pseudotsuga* spp., a diferencia de los otros, se adapta a una mayor cantidad de suelos y altitudes, crece en bosques ubicados en zonas montañosas con altitudes de los 1,500 a los 3,600 msnm. Las plantaciones se ubican en laderas con pendientes de 20 % a 70 %. El clima ideal para esta especie es de 4 a 22 °C (CONAFOR, 2012).

Las tres especies mencionadas enfrentan plagas y hongos que atacan las semillas y los conos;

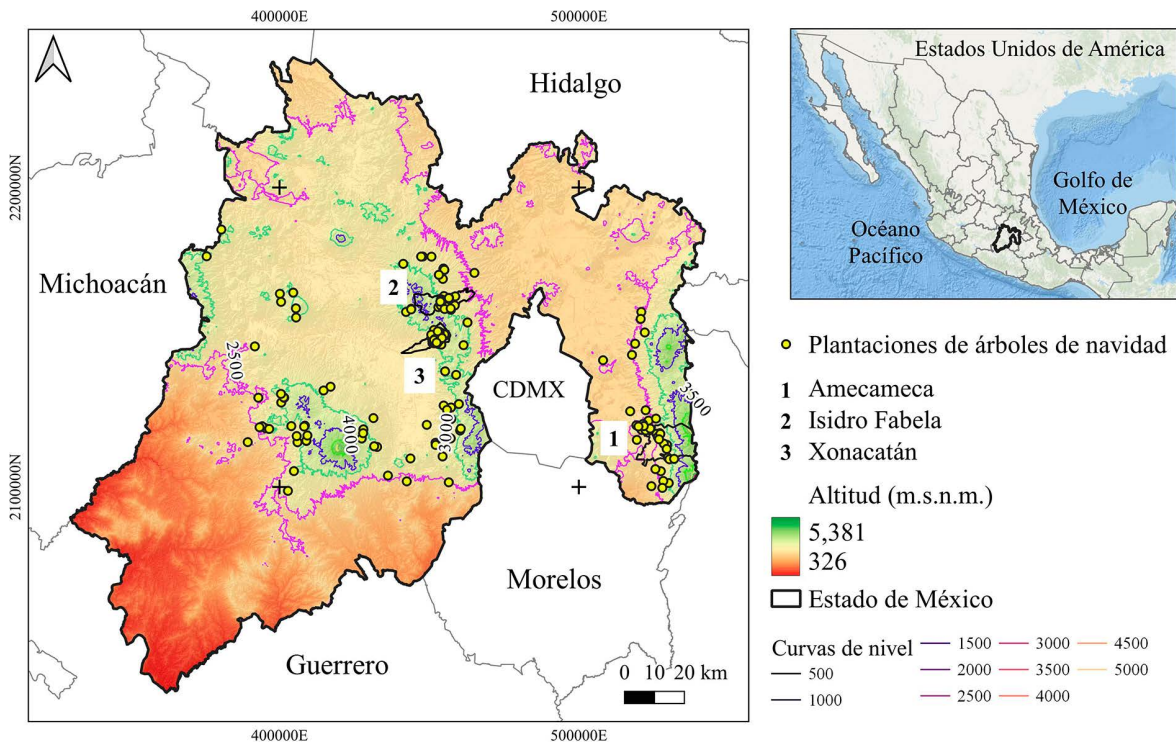


Figura 2. Distribución geográfica de las plantaciones de árboles de navidad en el Estado de México.

por ejemplo, escarabajos de corteza, ambrosia y hongos multicelulares y saprofitos.

En el Estado de México, tres municipios destacan por la cantidad de plantaciones: Xonacatlán es el que tiene el mayor número de plantaciones con 62, seguido de Isidro Fabela con 23 y Amecameca con 15. Estos municipios comparten características de altitud, temperatura y actividad comercial relacionada con los árboles de navidad (Cedar Lake Ventures, 2020) (Figura 2 y Tabla 1).

AMENAZAS: DESDE LAS MÁS PEQUEÑAS HASTA EL ENORME CAMBIO CLIMÁTICO

Sin embargo, las plantaciones no están exentas de amenazas. Las plantaciones forestales pueden estar formadas por especies propias de la región o por especies introducidas por el ser humano. Su importancia es enorme, ya que aportan recursos que usamos todos los días, como madera para la construcción, pulpa para fabricar papel o leña como fuente de energía principalmente en comunidades rurales. Además, no

solo se trata de los bosques; en ocasiones también incluyen cultivos con fines agrícolas, como huertos de aguacate o manzana (Harris *et al.*, 2024).

Muchas plantaciones comparten considerables tasas de deforestación y cambio de uso de suelo que pueden afectar su rendimiento a mediano y largo plazo. De acuerdo con Global Forest Watch (2024), entre 2002 y 2023 la cobertura arbórea disminuyó en varios municipios del Estado de México donde se concentra la producción de árboles de navidad. Xonacatlán perdió 39 hectáreas de cobertura arbórea (1.1 %), Amecameca 38 hectáreas (0.59 %) e Isidro Fabela perdió 43 hectáreas (0.71 %).

A esta situación se suma otra amenaza: el incremento de la temperatura global. Las especies más utilizadas como árboles de navidad crecen mejor en climas templados o fríos (Figura 3), por lo que el cambio climático podría comprometer su desarrollo en el futuro (Scott *et al.*, 2017). El clima será uno de los factores determinantes en el crecimiento y distribución de las especies, ya que cada una requiere de diferentes características como humedad, luz y temperatura para completar su ciclo de crecimiento (Gutiérrez y Trejo, 2014).

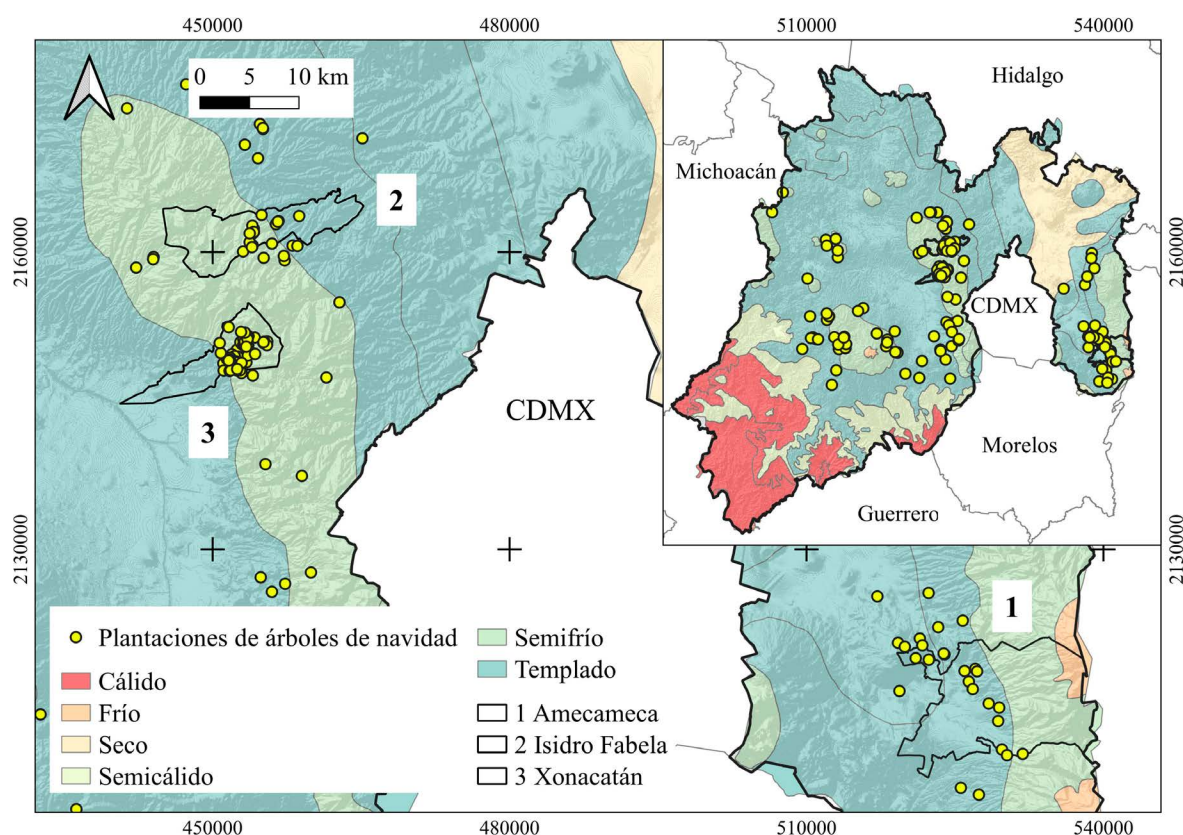


Figura 3. Distribución climática de las plantaciones de árboles de navidad en los tres principales municipios del Estado de México.

BENEFICIOS ECOLÓGICOS, SOCIOECONÓMICOS Y TRADICIONES FORESTALES

Un árbol de navidad no es solo un símbolo festivo, es la unión entre las tradiciones, la cultura, la economía y la salud de los ecosistemas. El cultivo de árboles de navidad en México ha evolucionado al punto de ser el sostén de cientos de familias en zonas rurales donde las oportunidades económicas son escasas. Las plantaciones de *Pinus ayacahuite*, *Abies religiosa* y *Pseudotsuga* spp. no solo sirven para decorar nuestros hogares, también son refugio para la biodiversidad, actúan como sumideros de carbono y son una barrera ante el avance de la forestación.

Los beneficios de las plantaciones llegan incluso a las zonas urbanas aledañas donde ayudan a la captación de carbono, a la filtración de agua para la recarga de mantos acuíferos y previenen la erosión del suelo (Zamora, 2015). Sin embargo, el incremento de la urbanización hace que esta actividad se enfrente a cambios en las condiciones climáticas, ya que las especies más populares están adaptadas

a climas templados y fríos, por lo que se espera que las nuevas plantaciones se ubiquen cada vez a mayores altitudes y lejos de zonas urbanas.

Desde un enfoque socioeconómico, en las comunidades rurales, las plantaciones contribuyen con empleos temporales, generan alternativas económicas rentables para los productores mediante un agronegocio que aprovecha este recurso natural a partir de las primeras cosechas (Zamora, 2015). No obstante, existen desafíos en las comunidades; por ejemplo, empleos no regulados, dependencia de intermediarios y desigualdad en el acceso a recursos públicos que benefician al mantenimiento y gestión forestal para el beneficio social (García 2011).

Para que las plantaciones de árboles de navidad sigan siendo una actividad rentable en las comunidades, es necesario revalorizar los beneficios que nos brindan, ya que la entidad tiene altas tasas de cambio de uso de suelo, por lo que las plantaciones frenan el avance de la mancha urbana.



© Ivette Tejero. *Paraíso Perdido*. De la Serie Mitos. Óleo/tela, 120 x 80 cm.

Conocer la distribución espacial de las plantaciones permite identificar áreas para el manejo forestal, el desarrollo y la implementación de políticas públicas; además, proporciona conocimiento acerca de dónde adquirir un árbol que haya sido plantado en las condiciones óptimas para su comercialización. Finalmente, es importante mencionar, como parte de las ventajas de adquirir árboles naturales, que no generan ningún impacto ambiental. De esta forma, el objetivo del aprovechamiento sustentable de los recursos forestales se cumple, ya que cuando se corta un árbol, en la siguiente temporada de lluvia se plantará otro, o se utilizarán los rebrotes para formar un nuevo árbol y mantener el cultivo durante los próximos años.

Las plantaciones de árboles de Navidad en el Estado de México son una oportunidad de desarrollo rural y conservación ambiental que a futuro requiere atención y gestión.

El equilibrio entre producción, conservación y adaptación al cambio climático es fundamental para mantener viva la tradición y asegurar que siga siendo una alternativa económica para las comunidades locales.

REFERENCIAS

- García Cuevas X, Rodríguez Santiago B e Islas Gutiérrez J (2011). Evaluación financiera de plantaciones forestales de caoba en Quintana Roo. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales* 2(7):7-26.
- Secretaría de Desarrollo Económico del Gobierno del Estado de México (2024). Invierte en el Estado de México. Recuperado de: <https://desarrollo.economex.gob.mx/sites/desarrolloeconomico.edomex.gob.mx/files/files/SEDECO-2024/INVERTIR.pdf>.
- Gutiérrez E y Trejo I (2014). Efecto del cambio climático en la distribución potencial de cinco especies arbóreas de bosque templado en México. *Revista Mexicana de Biodiversidad* 85(1).
- Harris N, Goldman E y Gibbes S (2024). Base de datos espacial de árboles plantados (SDPT) versión 1.0. Consultado a través de Global Forest Watch (www.globalforestwatch.org) el 15/09/2024.
- Sánchez JFA, Figueroa CJP y Vargas LA (2023). Valoración económica de los servicios ecosistémicos: una revisión sistemática. *Revista Venezolana de Gerencia: RVG* 28(103):948-964.
- Cory ST, Wood LK and Neufeld HS (2017). Phenology and growth responses of Fraser fir (*Abies fraseri*) Christmas trees along an elevational gradient, southern Appalachian Mountains, USA, *Agricultural and Forest Meteorology* 243:25-32.
- Zamora Martínez MC (2015). Producción de árboles de Navidad. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales* 6(32):4-6.

Tania María Vega Valero
Zuleyma Zarco González
Tecnológico Nacional de México
Instituto Tecnológico de Toluca
Fundación Ambiente ConCiencia A.C.
zuleyma.zarco.g@gmail.com

Cuando las abejas dejan de oler: plaguicidas que silencian señales químicas

Jovani **Ruiz Toledo**
David **Alavez-Rosas**

Las abejas son fundamentales para los ecosistemas, ya que, a través de la polinización, contribuyen al equilibrio ecológico, la producción agrícola y la seguridad alimentaria. Si bien *Apis mellifera*, la abeja europea, es la más conocida por su domesticación y uso en todo el mundo, en regiones como Chiapas y Centroamérica, las abejas sin aguijón o meliponinos, son igual de importantes. Especies nativas como *Melipona beecheii*, *M. solani* y *Scaptotrigona mexicana* (Figura 1) son polinizadoras sumamente eficaces y han estado profundamente vinculadas a las tradiciones culturales, medicinales y espirituales de los pueblos originarios desde tiempos ancestrales.

Las abejas han desarrollado un sistema de comunicación química notablemente sofisticado. Utilizan feromonas para coordinar diversas actividades dentro de la colonia, desde la organización social hasta la defensa del enjambre, para seguir rutas hacia fuentes de alimento y transmitir esa información a otras compañeras, lo que les permite trabajar de forma colectiva con una precisión asombrosa. Esta forma de comunicación sensorial también es esencial para el funcionamiento dentro de la colonia, cuidar a las crías y mantener la defensa del nido frente a amenazas externas (Cruz-López y Alavez-Rosas,



Figura 1. Abejas sin aguijón (*Scaptotrigona mexicana*) en actividades diarias. A) Guardianas del nido B) Abejas forrajeras, recolectando resina. Fotos de los autores.

2023). Sin embargo, este “lenguaje invisible” está siendo amenazado por plaguicidas neurotóxicos, como los neonicotinoides, que interfieren con los sistemas sensoriales de las abejas, incluso a dosis subletales. Estas sustancias afectan la forma en que las abejas detectan y procesan señales químicas, provocando desorientación, pérdida de memoria olfativa, reducción en la respuesta a feromonas e incluso cambios en su estructura cerebral (Palmer *et al.*, 2013). Cuando las abejas ya no pueden percibir el entorno químico, su comportamiento individual y social se ve profundamente alterado. Esto no solo compromete su supervivencia, sino que también pone en riesgo algunos ecosistemas.

EL LENGUAJE INVISIBLE DE LAS ABEJAS:

ANTENAS QUE HUELEN EL MUNDO

Las abejas no perciben su entorno únicamente con los ojos, también lo “huelen” con las antenas.

Estos insectos dependen de un complejo sistema olfativo para detectar, interpretar y responder a señales químicas del ambiente. Este sistema está altamente especializado: las antenas están cubiertas por estructuras llamadas *sensilla* (*sensillum*, en singular; castellanizado como sensila). Cada sensila contiene una o varias neuronas sensoriales capaces de detectar moléculas específicas presentes en el aire, como feromonas y olores florales. En el interior de una abeja, estas señales químicas son procesadas en el cerebro, donde se forman memorias olfativas.

La comunicación olfativa es tan sofisticada que una abeja *Apis*, puede recordar la fragancia de un recurso valioso para la colmena, como resina o néctar, y compartir esta información con sus compañeras mediante la “danza del meneo”. Los meliponinos, aunque no realizan esta danza como *Apis*, presentan comportamientos igualmente elaborados guiados por señales químicas. Estas abejas dejan rastros de feromonas para marcar rutas hacia fuentes de alimento, reclutar compañeras o alertar sobre amenazas, y dependen de la detección precisa de olores florales para seleccionar fuentes de recursos para la colonia (Leonhardt, 2017). Este lenguaje invisible, compuesto por moléculas flotando en el aire, permite a las abejas comunicarse, orientarse, cooperar y sobrevivir. Cualquier alteración en este sistema, incluso si no causa la muerte inmediata del insecto, puede provocar una desorganización total en la vida de la colonia.

PLAGUICIDAS QUE APAGAN O INTERFIEREN EL OLFATO DE LAS ABEJAS

Los plaguicidas modernos no solo matan insectos por contacto o ingestión (Figura 2), muchos de ellos afectan funciones esenciales a nivel subletal, es decir, sin causar la muerte inmediata. Una de las consecuencias más preocupantes es la alteración del sistema olfativo de las abejas: su capacidad de oler se reduce o se distorsiona. Los plaguicidas dañan las sensilas olfativas, reduciendo la cantidad de neuronas sensoriales funcionales o interfiriendo con la transmisión de las señales hacia el cerebro.



Figura 2. Abejas *Apis mellifera*, expuestas a plaguicidas en el laboratorio. Foto de Oscar Barreto (Ecosur).

Esto implica que las abejas dejen de detectar feromonas de alarma, señales de localización de alimento o incluso el olor de su propia colmena. Es decir, pierden su capacidad de comunicarse y orientarse (Paoli y Giurfa, 2024).

En *Apis*, la exposición a dosis subletales de neonicotinoides se ha relacionado con una menor respuesta a feromonas de cría, disminución en la capacidad de aprendizaje asociativo-olfativo y pérdida de memoria a corto plazo. En meliponinos, los estudios aún son limitados; sin embargo, se ha observado que pesticidas comunes afectan su respuesta a estímulos florales y reducen el reclutamiento de forrajeras (Ruiz-Toledo y Sánchez-Guillén, 2014). Estas alteraciones ponen en riesgo no solo a los individuos, sino a la eficiencia colectiva de la colonia. Aun así, se requieren investigaciones adicionales para comprender plenamente la magnitud y los mecanismos de estos efectos.

Además, los plaguicidas también alteran la morfología del cerebro, en particular de regiones clave para procesar olores y generar memoria olfativa. Así, aunque una abeja pueda seguir volando después de haber estado en contacto con un plaguicida, su comportamiento se vuelve errático, su comunicación falla y su eficacia como polinizadora disminuye. Se trata de un efecto que no se ve a simple vista, pero que tiene consecuencias ecológicas profundas (Ruiz-Toledo *et al.*, 2018).

CUANDO LAS ABEJAS NO HUELEN, EL ECOSISTEMA SE DESCOMPONE

El olfato deteriorado de las abejas no es solo un problema para ellas, es una amenaza para los ecosistemas y para la seguridad alimentaria. El rol como polinizadores que desempeñan las abejas en la naturaleza depende de su capacidad para reconocer olores florales, comunicarse con otras abejas y regresar con precisión al nido. Cuando los plaguicidas interfieren en este proceso, las consecuencias son fatales. Las abejas pueden volverse incapaces de encontrar flores, no identificar su tipo, olvidar rutas de vuelo o dejar de reclutar a otras polinizadoras. Como resultado, disminuye la cantidad y calidad de polinización, afectando cultivos como aguacate, mango, café, cacao y muchas especies silvestres (Cabriol y Haase, 2019).

Esto tiene impactos directos sobre la economía rural y la biodiversidad. En regiones como Chiapas y Centroamérica, donde conviven especies domesticadas como *A. mellifera*, *M. beecheii*, *M. solani* y *S. mexicana*, la pérdida de capacidad olfativa pone en peligro tanto los sistemas agrícolas tradicionales como la conservación de especies endémicas. Además, la reducción de la actividad polinizadora puede generar un efecto dominó: menos polinización implica menos frutos y semillas, lo que disminuye la regeneración de plantas, afecta a herbívoros y dispersores, y altera cadenas tróficas completas (Ruiz-Toledo y Sánchez-Guillén, 2014).

¿QUÉ PODEMOS HACER? ALTERNATIVAS PARA PROTEGER EL OLFATO DE LAS ABEJAS

Ante el silencioso colapso sensorial de las abejas, es urgente replantear el uso de plaguicidas en la agricultura. Existen alternativas agroecológicas que pueden reducir el impacto sobre los polinizadores sin sacrificar la productividad. Una de las principales estrategias es la reducción del uso de plaguicidas, especialmente durante las épocas de floración, cuando las abejas están más activas. El manejo holístico de plagas



Figura 3. Meliponario de Ecosur Tapachula, donde se realizan investigaciones de meliponicultura sostenible.

(MHP) es un enfoque sustentable para el control de plagas, que considera el sistema agrícola como un todo y busca mantener las poblaciones de plagas a niveles manejables sin comprometer la salud humana o el medio ambiente, lo cual permite disminuir la dependencia de plaguicidas sintéticos (Barrera, 2020).

También se han promovido zonas refugio con plantas nativas que sirvan como alimento y hábitat para polinizadores, favoreciendo además a las especies locales de abejas sin aguijón. En este mismo sentido, la incorporación de prácticas agroecológicas en los cultivos no solo fortalece el manejo holístico de plagas, también protege a las abejas. Al evitar el uso excesivo de agroquímicos y fomentar paisajes agrícolas diversos con abundante cobertura floral, se crean condiciones más seguras y favorables para las abejas, contribuyendo a la estabilidad ecológica y a una producción de alimentos más sustentable.

De manera complementaria, el impulso a la apicultura y la meliponicultura sostenibles no solo conserva especies nativas, sino que fomenta prácticas agrícolas respetuosas con el entorno y con el conocimiento tradicional (Figura 3). Finalmente, es urgente fortalecer la regulación de agroquímicos, exigiendo pruebas de efectos subletales en abejas, como la

alteración del comportamiento olfativo, antes de autorizar su uso. Algunas regiones ya han comenzado a restringir plaguicidas neurotóxicos precisamente por estos efectos “invisibles” pero devastadores. Proteger el olfato de las abejas no es un lujo ecológico, es una inversión en resiliencia, diversidad y futuro.

CONCLUSIONES Y PERSPECTIVAS

El olfato de las abejas es mucho más que un sentido: es el eje de su comportamiento social, su comunicación y su capacidad de encontrar alimento y sobrevivir. Cuando los plaguicidas interfieren con este sistema sensorial comprometen la vida de abejas individuales, el equilibrio de ecosistemas enteros y la seguridad alimentaria humana. Por ello, es urgente incluir evaluaciones de impacto sensorial en los protocolos de aprobación de plaguicidas y fomentar prácticas agrícolas compatibles con la vida de los polinizadores.

A futuro, se requiere más investigación en especies nativas, una regulación más estricta de agroquímicos y una educación ambiental que acerque estos temas a productores, estudiantes y tomadores de decisiones. Cada antena que aún detecta el aroma de una flor representa una conexión viva entre la biodiversidad, la ciencia y la cultura.



© Ivette Tejero. *Perdidos en tu paisaje*. Óleo/tela, 95 x 70 cm, 2023.

REFERENCIAS

- Barrera JF (2020). The need for a holistic approach to pest management. In Barrera JF (Ed.), *Beyond IPM: introduction to the theory of holistic pest management* (pp. 31-46). Springer Nature, Switzerland. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-43370-3_3.
- Cabirol A and Haase A (2019). The neurophysiological bases of the impact of neonicotinoid pesticides on the behaviour of honeybees. *Insects* 10(10):1-12. DOI: <https://doi.org/10.3390/insects10100344>.
- Cruz-López L y Alavez-Rosas D (2023). Meliponinos: las abejas que polinizando se comunican. *Elementos* 129:95-98. <https://elementos.buap.mx/directus/storage/uploads/00000008167.pdf>.
- Leonhardt S (2017). Chemical ecology of stingless bees. *Journal of Chemical Ecology* 43(4):385-402. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10886-017-0837-9>.
- Palmer M, Moffat C, Saranzewa N et al. (2013). Cholinergic pesticides cause mushroom body neuronal inactivation in honeybees. *Nature Communications* 4(1634):1-10. DOI: <https://doi.org/10.1038/ncomms2648>.
- Paoli M and Giurfa M (2024). Pesticides and pollinator brain: How do neonicotinoids affect the central nervous system of bees? *European Journal of Neuroscience* 60(8):5927-5948. DOI: <https://doi.org/10.1111/ejn.16536>.
- RuizToledo J, Vandame R, CastroChan R et al. (2018). Organochlorine pesticides in honey and pollen samples from managed colonies of the honey bee *Apis mellifera* and the stingless bee *Scaptotrigona mexicana* from Southern Mexico. *Insects* 9(2):1-18. DOI: <https://doi.org/10.3390/insects9020054>.
- RuizToledo J y SánchezGuillén D (2014). Efecto de la concentración de glifosato presente en cuerpos de agua cercanos a campos de soya transgénica sobre la abeja *Apis mellifera* y la abeja sin aguijón *Tetragonisca angustula*. *Acta Zoológica Mexicana* 30(2):408-413.

Jovani Ruiz Toledo
David Alavez-Rosas
Grupo Colegiado de Investigación en Educación
en Ciencias Químico Fármaco Biológicas
y Salud Ambiental
Facultad de Ciencias Químicas
Benemérita Universidad Autónoma de Chiapas
El Colegio de la Frontera Sur
daalavez@ecosur.edu.mx



© Ivette Tejero. *Fides*. Óleo/tela, 100 x 130 cm, 2016.

El metaboloma del maíz: claves para su mejora y producción sostenible

Juan José **Romero Tovar**
Jorge **Vargas Almaraz**

El maíz (*Zea mays*) es uno de los cultivos alimentarios más importantes a nivel mundial, fundamental para la alimentación humana al aportar energía y nutrientes vitales, así como para la elaboración de diversos productos industriales como los biocombustibles. Durante siglos, su mejora se ha logrado mediante la selección genética tradicional: los agricultores elegían, generación tras generación, las plantas con los mejores granos, lo que dio origen a las diversas variedades que conocemos actualmente. Sin embargo, investigaciones recientes exploran una nueva frontera en este campo: el estudio del metaboloma del maíz, es decir, del conjunto completo de metabolitos (moléculas pequeñas) regulados a nivel genético, cuyo perfil es dinámico y depende tanto de las condiciones ambientales como de la etapa de desarrollo de la planta. Esto es clave para optimizar su sabor, valor nutricional y resistencia a múltiples factores que amenazan su cultivo. Además del metaboloma, otras disciplinas como la transcriptómica (el análisis de ARN) y la proteómica (el estudio de las proteínas), integradas mediante enfoques multi-ómicos, están revolucionando nuestra comprensión del maíz y abren nuevas posibilidades para mejorar este cultivo.

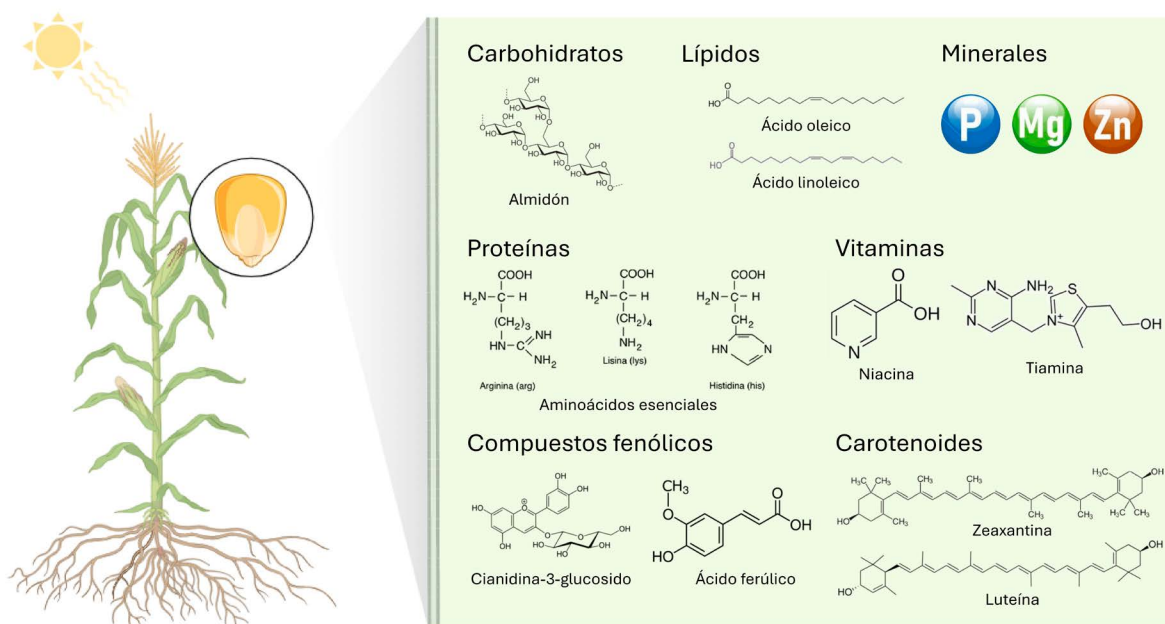


Figura 1. Esquema del maíz y su composición química. Principales clases de metabolitos y nutrientes: carbohidratos (almidón), lípidos (ácidos oleico y linoleico), proteínas, aminoácidos esenciales (arginina, lisina, histidina), vitaminas (niacina y tiamina); minerales: fósforo (P), magnesio (Mg) y zinc (Zn); compuestos fenólicos (cianidina-3-glucósido y ácido ferúlico) y carotenoides (zeaxantina y luteína). Elaborada en BioRender.

LA DOMESTICACIÓN DEL MAÍZ

Nuestra historia con el maíz comenzó hace aproximadamente 9,000 años en el corazón del valle de Tehuacán, en el centro de México. Los primeros agricultores comenzaron transformando lentamente el “teocintle”, una gramínea silvestre de aspecto simple y pequeños granos, hasta desarrollar el maíz moderno que hoy conocemos, resultado de una selección genética milenaria impulsada por la curiosidad, la necesidad humana y su adaptación a distintos entornos.

Los cambios morfológicos fueron realmente asombrosos: de espigas pequeñas con pocas semillas, pasamos a grandes mazorcas con cientos de granos expuestos y fáciles de cosechar. A nivel genético, la domesticación implicó la selección de mutaciones en genes clave responsables de características como el tamaño de la mazorca, la textura del grano y la arquitectura general de la planta. Gracias a esta transformación, el maíz se expandió gradualmente por todo el continente americano, desde los Andes hasta Norteamérica, adaptándose a una amplia variedad

de climas y regiones, antes de extenderse al resto del mundo (Kennett *et al.*, 2017).

EL VALOR NUTRICIONAL DEL MAÍZ

El maíz es conocido por ser una excelente fuente de macronutrientes esenciales como carbohidratos complejos (principalmente almidón), fibra dietética y proteínas, además de micronutrientes vitales como vitaminas del grupo B (especialmente niacina y tiamina), vitamina A (en sus variedades amarillas) y minerales como fósforo, magnesio y zinc. Por otra parte, el maíz produce metabolitos especializados que no solo contribuyen al valor nutricional, sino que pueden considerarse biomarcadores de la calidad del grano. Por ejemplo, los compuestos fenólicos, y de manera muy importante los flavonoides, actúan como potentes antioxidantes y son responsables de los colores en las variedades de maíz azul y rojo (Sánchez-Nuño *et al.*, 2024). Los carotenoides (como la zeaxantina y la luteína) presentes en el maíz amarillo se correlacionan con la resistencia a ciertos patógenos, y los lípidos de tipo ácidos grasos insaturados contribuyen a una alimentación equilibrada. En conjunto, estos compuestos no solo definen el sabor, color y apariencia del maíz, sino

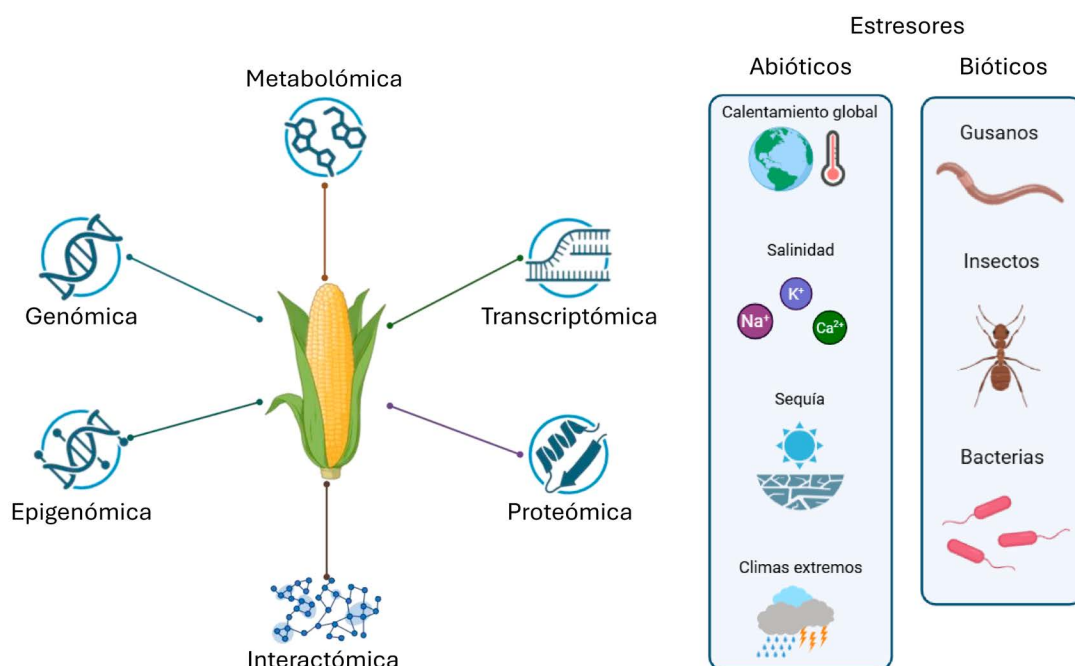


Figura 2. Integración de ciencias ómicas y estresores en maíz. La figura ilustra cómo las diversas disciplinas ómicas pueden ser utilizadas para comprender la respuesta del maíz a estresores abióticos y bióticos. Elaborada en BioRender.

que poseen propiedades nutraceuticas que pueden ayudar a prevenir diversas enfermedades (Figura 1).

CIENCIAS ÓMICAS: LA LUPA MOLECULAR EN EL ESTUDIO DEL MAÍZ

Para entender a fondo cómo funciona el maíz, desde su crecimiento hasta su respuesta frente a condiciones de estrés ambiental, los científicos recurren a un enfoque integrador llamado “multi-ómicas”. Esta estrategia combina distintas disciplinas de la biología molecular, como la transcriptómica, la proteómica y la metabolómica, lo que permite obtener una visión mucho más completa, precisa y profunda de los procesos biológicos que ocurren dentro de la planta (Figura 2).

La transcriptómica es la ciencia que aborda el estudio de todas las moléculas de ARN que se generan a partir de la expresión genética, tales moléculas actúan como “instrucciones” que le indican a la célula qué proteínas producir con base en los estímulos de su entorno. En el caso del gen *ZmbHLH137*, asociado al vigor híbrido o heterosis, se ha demostrado que mejora la tolerancia a la sequía en plántulas de maíz y, por tanto, constituye un blanco molecular

que los investigadores pueden sobreexpresar experimentalmente para mejorar el rendimiento de los cultivos (Cao *et al.*, 2025).

Por su parte, la proteómica estudia el conjunto de las proteínas, principales responsables de ejecutar las funciones celulares y sintetizar los metabolitos especializados. Investigaciones recientes han evaluado cómo cambian las proteínas del maíz cuando se cultiva en ambientes con altas concentraciones de dióxido de carbono, simulando escenarios relacionados con el cambio climático. Este análisis crítico permite argumentar que la integración de la metabolómica y la proteómica no es solo descriptiva, sino predictiva: identifica rutas metabólicas críticas que podrían manipularse para desarrollar variedades de maíz más productivas y resistentes frente a los desafíos de un futuro más adverso (Maurya *et al.*, 2020).

APLICACIÓN DE LA METABOLÓMICA EN EL MAÍZ

Actualmente se han identificado más de 3,000 metabolitos en distintas variedades de maíz comestible

(Li *et al.*, 2025). Este avance ha permitido reconocer rutas metabólicas esenciales que definen los perfiles metabolómicos en distintas variedades y condiciones ambientales. Un ejemplo de ello se observa en el maíz dulce y ceroso, cuyo proceso de domesticación redujo el contenido de flavonoides. Este fenómeno es consecuencia de una menor expresión de genes que codifican enzimas clave en las rutas biosintéticas de compuestos fenólicos. Este caso evidencia la relación directa entre los distintos niveles ómicos que determinan el fenotipo de una variedad.

La integración de la metabolómica con disciplinas como la transcriptómica permite identificar los mecanismos moleculares que confieren al maíz su tolerancia a la salinidad del suelo. Este enfoque multidisciplinario revela de forma precisa cómo la planta ajusta su metabolismo y su expresión genética para adaptarse al estrés abiótico. (Ren *et al.*, 2025). Incluso la interacción del maíz con sus “enemigos” naturales ha sido estudiada desde este enfoque. Por ejemplo, la aplicación de carbón vegetal puede alterar el metabolismo de la planta y fortalecer sus defensas químicas contra plagas como el gusano cogollero (*Spodoptera frugiperda*). Estas estrategias aplicadas por los agricultores promueven un manejo más sostenible que ayuda a proteger los cultivos sin depender exclusivamente de pesticidas (He *et al.*, 2024).

INGENIERÍA GENÉTICA DEL MAÍZ: HERRAMIENTAS CLAVE

Para desarrollar maíz genéticamente modificado (GM), se utilizan diversas herramientas biotecnológicas que permiten introducir o modificar genes de manera precisa. Entre ellas destacan la transformación mediada por *Agrobacterium*, que utiliza bacterias para transferir ADN a las células vegetales, y la biolística, que introduce genes directamente usando micropartículas recubiertas de ADN. Además, se emplean técnicas avanzadas de edición genómica como CRISPR/Cas9, que permiten modificar o silenciar genes específicos sin necesidad de

insertar ADN externo de forma permanente (Basso *et al.*, 2020).

Por otra parte, herramientas avanzadas como los estudios de asociación genómica permiten identificar regiones del ADN asociadas con la acumulación de metabolitos especializados que determinan sus propiedades. Por ejemplo, se han localizado genes que controlan el contenido de almidón, azúcares asociados con el sabor dulce y pigmentos responsables del color.

IMPLICACIONES ECONÓMICAS Y SOCIALES

Cuando hablamos de la modificación genética del maíz, es inevitable tocar un tema de gran debate mundial: los organismos genéticamente modificados (OGM). En marzo de 2025, México emitió un decreto presidencial de aplicación administrativa, que no modifica la constitución, pero establece lineamientos para la sustitución gradual del maíz genéticamente modificado en su territorio. Esta decisión busca en principio salvaguardar la gran diversidad de maíces nativos, garantizar la soberanía alimentaria y proteger la salud de la población (Gobierno de México, 2025). Esta medida impacta directamente la siembra de maíz GM en México, pero la situación sobre su importación y consumo sigue siendo un punto de discusión en el comercio internacional.

El maíz GM ofrece ventajas notables, como mayor rendimiento por hectárea y resistencia específica a plagas, gracias a que expresa la toxina Cry1Ab de *Bacillus thuringiensis* (Bt), lo que disminuye el uso de insecticidas y reduce los costos para el agricultor (García *et al.*, 2023). Existen también variedades tolerantes a herbicidas, que facilitan el control de malezas. Sin embargo, estos beneficios no están exentos de limitaciones. Desde el punto de vista ecológico, el cultivo intensivo de maíz GM puede reducir la biodiversidad y favorecer la aparición de “supermalezas” y “superplagas” resistentes, desencadenando un ciclo interminable de acción y reacción.

Más allá de lo agronómico, el análisis crítico revela riesgos socioeconómicos importantes: las semillas patentadas en manos de pocas corporaciones centralizan el poder sobre la producción de alimentos,



© Ivette Tejero. *Ninfas y Sátiros Contemporáneos en el Edén*. Óleo/madera y tela, 120 x 185 cm, 2018.

elevan los costos de los insumos y amenazan la soberanía de pequeños agricultores. Además, persiste un debate sobre los posibles efectos a largo plazo en la salud y el medio ambiente, aunque la evidencia científica disponible respalda mayoritariamente su seguridad alimentaria. En resumen, el maíz GM es una herramienta tecnológica cuya implementación requiere considerar aspectos tanto biotecnológicos como socioeconómicos.

SISTEMAS DE CULTIVO SOSTENIBLES: DEL LABORATORIO AL CAMPO

Nuevos enfoques como la agricultura regenerativa y la agroecología están ganando terreno al proponer prácticas que no solo mantienen, sino que mejoran la salud del suelo, fomentan la biodiversidad y reducen la dependencia de fertilizantes y pesticidas químicos. Entre estas prácticas destacan la rotación de cultivos, la siembra directa y el uso de abonos orgánicos, con el objetivo de trabajar en armonía con la naturaleza. Por otro lado, la revolución tecnológica también está transformando el campo. El concepto de “maíz 4.0” refleja la integración de la agricultura con tecnologías de última generación

como sensores instalados en los cultivos, redes conectadas a través del Internet de las Cosas (IoT) y el análisis de grandes volúmenes de datos (“big data”) permiten aplicar una agricultura de precisión. Esto con la intención de generar sistemas más eficientes para el riego, la fertilización y el control de plagas a través de decisiones informadas que reduzcan el desperdicio y el impacto ambiental.

El conocimiento del metaboloma del maíz significa una comprensión profunda de los procesos bioquímicos, lo que permite generar programas de selección asistida por biomarcadores en la implementación de estrategias de edición genética dirigida. No obstante, los avances en biotecnología vegetal también implican dilemas éticos, sociales y ambientales que deben someterse a una reflexión crítica. La manipulación genética plantea debates sobre propiedad intelectual, biodiversidad y equidad en el acceso a la tecnología. Los nuevos enfoques, que unen tecnología, ecología y ciencia, están impulsando un cambio en el cultivo del maíz para alimentar al mundo de forma más inteligente, eficiente y sostenible.



© Ivette Tejero. *Lujuria Contemporánea*. De la Serie Pecados Capitales. Óleo/madera, 25 x 70 cm, 2023.

AGRADECIMIENTO

Agradecemos a la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI) por las becas otorgadas a los autores (CVUs 1347682 y 1236146).

NOTA

Para la preparación de este trabajo, los autores emplearon DeepSeek V3.1 con el fin de mejorar la legibilidad y el lenguaje del manuscrito. Posteriormente, los autores revisaron y editaron el texto según fue necesario, asumiendo toda la responsabilidad por el contenido del artículo publicado.

REFERENCIAS

- Basso MF, Arraes FBM, Grossi-de-Sa MF *et al.* (2020). Insights into genetic and molecular elements for transgenic crop development. *Frontiers in Plant Science* 11. DOI: <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.00509>.
- Cao L, Zhang D, Fahim AM *et al.* (2025). Comprehensive transcriptome analysis provides molecular insights into the heterosis-associated drought tolerance and reveals ZmbHLH137 that promotes drought tolerance in maize seedlings. *Frontiers in Plant Science* 16. DOI: <https://doi.org/10.3389/fpls.2025.1565650>.
- García M, García-Benítez C, Ortego F *et al.* (2023). Monitoring insect resistance to Bt maize in the European Union: update, challenges, and future prospects. *Journal of Economic Entomology* 116(2):275-288. DOI: <https://doi.org/10.1093/jee/toac154>.

Gobierno de México (2025). Decreto por el que se establecen diversas acciones para la sustitución gradual del uso del herbicida glifosato y para la sustitución gradual del maíz genéticamente modificado en la alimentación humana. *Diario Oficial de la Federación*, 17 de febrero.

He T, Chen L, Wu Y *et al.* (2024). Combined metabolome and transcriptome analyses of maize leaves reveal global effect of biochar on mechanisms involved in anti-herbivory to *Spodoptera frugiperda*. *Metabolites* 14(9):498. DOI: <https://doi.org/10.3390/metabo14090498>.

Kennett DJ, Thakar HB, VanDerwarker AM *et al.* (2017). High-precision chronology for Central American maize diversification from El Gigante rockshelter, Honduras. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 114(34):9026-9031. DOI: <https://doi.org/10.1073/pnas.1705052114>.

Li C, Li Z, Lu B *et al.* (2025). Large-scale metabolomic landscape of edible maize reveals convergent changes in metabolite differentiation and facilitates its breeding improvement. *Molecular Plant* 18(4):619-638. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.molp.2025.02.007>.

Maurya VK, Gupta SK, Sharma M *et al.* (2020). Proteomic changes may lead to yield alteration in maize under carbon dioxide enriched condition. *3 Biotech* 10(5). DOI: <https://doi.org/10.1007/s13205-020-02189-2>.

Ren S, Bai T, Ma Y *et al.* (2025). Molecular mechanisms underlying salt tolerance in maize: a combined transcriptome and metabolome analysis. *Plants* 14(13):2031. DOI: <https://doi.org/10.3390/plants14132031>.

Sánchez-Nuño YA, Zermeno-Ruiz M, Vázquez-Paulino OD *et al.* (2024). Bioactive compounds from pigmented corn (*Zea mays* L.) and their effect on health. *Biomolecules* 14(3):338. DOI: <https://doi.org/10.3390/biom14030338>.

Juan José Romero Tovar
Jorge Vargas Almaraz
Facultad de Química
Universidad Autónoma de Querétaro
jromero40@alumnos.uaq.mx

Frass de mosca soldado negra: un biofertilizante emergente para la agricultura

Hugo **González-Lara**
Juan Fernando **García-Trejo**

El manejo de los residuos orgánicos y la producción de alimentos son dos de los grandes desafíos ambientales del siglo XXI. Frente a este panorama, la naturaleza nos ofrece soluciones sorprendentes. Una de ellas viene de un insecto poco conocido, pero increíblemente eficiente: la mosca soldado negra (*Hermetia illucens*) (Figura 1), cuyas larvas transforman grandes volúmenes de desechos en recursos valiosos para la agricultura (Figura 2).

Tras alimentarse de restos de comida, estiércol o subproductos agrícolas (Li *et al.*, 2022), estas larvas dejan atrás un residuo rico en nutrientes, conocido como “frass”. Este material, similar a un compost fino, contiene compuestos minerales, materia orgánica y microorganismos benéficos que mejoran la salud del suelo y estimulan el crecimiento vegetal.

No obstante, es importante señalar que el potencial del frass no está exento de limitaciones. Sus propiedades químicas y biológicas pueden variar significativamente según el tipo de residuo con el que se alimenten las larvas, así como por las condiciones ambientales del proceso. Además, aunque se han reportado beneficios en distintos cultivos, aún faltan estudios que comparen su eficacia frente a fertilizantes tradicionales en escenarios reales de producción agrícola. Esta variabilidad hace necesario considerar



Figura 1. Moscas soldado negras posadas en tablillas de ovoposición.



Figura 2. Larvas de mosca soldado negra alimentadas con residuos de mango.

tratamientos previos y definir dosis seguras antes de recomendar su uso generalizado en la agricultura.

DE RESIDUO A RECURSO: EL FRASS

El frass se origina a partir de los restos no digeridos por las larvas, combinados con sus mudas de piel y excretas (Figura 3). Su composición varía según la dieta larval: residuos de cereales tienden a generar frass con más nitrógeno, mientras que los estiércoles y rastrojos de maíz producen frass más rico en fósforo y potasio.

Durante la digestión, las larvas suelen alcalinizar el material y concentrar minerales, lo que incrementa su conductividad eléctrica (CE) (Bohm *et al.*, 2023). Este fenómeno indica que la descomposición avanza, pero también supone un riesgo: un exceso de sales puede afectar negativamente la germinación y el desarrollo de las plantas.

Además de sus propiedades químicas, el frass ofrece beneficios físicos. Al incorporarse al suelo, mejora la retención de humedad y la aireación, creando un entorno más favorable para raíces y microorganismos del suelo.

Si bien el frass se perfila como un biofertilizante prometedor, no puede considerarse una solución universal ni exenta de retos. Su composición altamente variable implica que los resultados observados en un cultivo o región no necesariamente se replicarán en otros contextos. Por ejemplo, la elevada conductividad eléctrica puede convertirse en un factor limitante si no se controla la dosis o si el suelo ya

presenta salinidad previa. Asimismo, la mayoría de los beneficios reportados provienen de ensayos en condiciones experimentales, lo que deja pendiente evaluar su desempeño en sistemas agrícolas a gran escala y con diferentes tipos de suelos. Para garantizar un uso seguro y eficaz, resulta fundamental estandarizar protocolos de aplicación, definir rangos óptimos de mezcla y considerar tratamientos previos que estabilicen el material antes de llevarlo al campo.

USOS DEL FRASS EN LA AGRICULTURA

El frass se estudia como biofertilizante natural, mejorador de suelos y componente de sustratos de germinación. Ensayos en cultivos como maíz, lechuga, jitomate, albahaca o col han reportado incrementos en biomasa y productividad, además de una mayor actividad microbiana y cierta protección frente a patógenos.

No obstante, es fundamental controlar la dosis. Aplicaciones directas superiores al 10 % suelen ser perjudiciales, ya que causan clorosis (hojas amarillas), menor crecimiento o inhibición de la germinación (Setti *et al.*, 2019). El frass crudo rara vez funciona como sustrato de germinación; se recomienda aplicarlo tras un tratamiento previo.

TRATAMIENTOS DEL FRASS Y SU EFECTO SOBRE EL CRECIMIENTO DE LAS PLANTAS

Para evitar posibles daños a las plantas y mejorar las propiedades físicas y químicas del frass, se ha sugerido tratarlo de forma similar a los estiércoles

animales, mediante un proceso de compostaje. Este tratamiento permite mejorar sus propiedades y reducir los efectos negativos que podría tener si se aplica directamente al suelo o a la planta.

COMPOSTAJE

El compostaje consiste en apilar el frass y dejar que los microorganismos generen calor (hasta 60 °C) y luego dejen enfriar el material. Este proceso, que puede durar dos meses, estabiliza nutrientes y mejora sus propiedades. Estudios recientes muestran que mezclas al 20 % de frass compostado favorecen el crecimiento de maíz, jitomate, ejote y col (Wu *et al.*, 2023). También ha mostrado buenos resultados como sustrato para la germinación de semillas (Figura 4).

Aunque el compostaje del frass representa un avance importante para estabilizar nutrientes y reducir riesgos en su aplicación, todavía existen aspectos que requieren mayor análisis. El tiempo de dos



Figura 3. Residuo de larva de mosca soldado negra conocido como “frass”.



Figura 4. Germinación de plántulas de jitomate en sustrato con frass compostado.

meses puede considerarse una limitante en escenarios de producción intensiva, donde los agricultores buscan soluciones rápidas y de bajo costo. Además, la recomendación de usar mezclas al 20 % surge de ensayos controlados y no necesariamente refleja las condiciones heterogéneas de los sistemas agrícolas reales, en los que influyen factores como el tipo de suelo, la humedad, la salinidad previa y las necesidades nutricionales específicas de cada cultivo. Esto plantea la necesidad de establecer protocolos más detallados que definan no solo la dosis, sino también el momento y la forma de aplicación, así como su comparación directa con fertilizantes orgánicos e inorgánicos convencionales. Solo así será posible determinar si el compostaje de frass es realmente competitivo y viable para su uso masivo en la agricultura sostenible.

DIGESTIÓN ANAEROBIA

Otra opción es colocar el frass en contenedores cerrados sin oxígeno para promover la acción de microorganismos anaerobios. Este proceso dura alrededor de un mes y, además de estabilizar el frass, produce biogás (principalmente metano) que puede aprovecharse como energía limpia (Dong *et al.*, 2024). La digestión anaerobia también ayuda a eliminar patógenos, lo que incrementa la seguridad del biofertilizante.

Si bien la digestión anaerobia del frass ofrece ventajas atractivas, como la producción simultánea de biofertilizante y biogás, no está exenta de desafíos. La instalación de sistemas cerrados para este proceso implica costos iniciales elevados y requiere un manejo técnico especializado que puede limitar su adopción en comunidades rurales o pequeños productores. Además, la calidad y la cantidad de biogás generado dependen en gran medida de la composición del frass y de la estabilidad del proceso, lo que introduce una variabilidad difícil de predecir. Aunque la eliminación de patógenos representa un beneficio claro para la seguridad agrícola y sanitaria, aún hacen falta estudios de campo que comparen el desempeño del frass digerido anaeróbicamente

frente a otros tratamientos más accesibles como el compostaje o el lombricompostaje. En este sentido, la digestión anaerobia aparece como una opción prometedora, pero que todavía necesita mayor validación técnica, económica y ambiental antes de considerarse una alternativa ampliamente adoptable.

LOMBRICOMPOSTAJE

Aunque hasta la fecha no se han reportado estudios específicos sobre el lombricompostaje del frass, sus características físicas y químicas sugieren que podría ser un sustrato adecuado para este proceso. Al presentar buena materia orgánica, humedad y nutrientes disponibles, es plausible que las lombrices puedan transformar el frass de manera similar a otros residuos orgánicos como el estiércol, mejorando aún más su calidad como biofertilizante (Ferraz-Ramos *et al.*, 2022).

CONCLUSIÓN Y PERSPECTIVAS

El uso de larvas de mosca soldado negra como herramienta para el tratamiento de residuos orgánicos representa una alternativa innovadora, eficiente y sostenible en el manejo de desechos orgánicos y la producción de biofertilizantes. A través de la transformación de residuos en frass, un material rico en nutrientes y beneficioso para los suelos agrícolas, este enfoque permite cerrar el ciclo de los residuos al convertir lo que antes era basura en un recurso valioso.

El uso directo del frass requiere precaución, ya que en dosis elevadas puede generar efectos negativos en el desarrollo de las plantas. Por ello, distintos tratamientos como el compostaje, el lombricompostaje y la digestión anaerobia se han propuesto para mejorar sus propiedades y ampliar su potencial como biofertilizante. Cada uno de estos tratamientos ofrece ventajas específicas: desde la estabilización de nutrientes y la mejora de la estructura del suelo, hasta la producción de biogás como fuente de energía limpia.

A futuro, el desarrollo de tecnologías que optimicen estos tratamientos y hagan más eficiente la

producción a escala del frass tratado, abre nuevas oportunidades para la agricultura sostenible. La integración de estos sistemas en comunidades rurales, agroindustrias o zonas urbanas con alto volumen de residuos orgánicos puede representar un modelo viable de economía circular.

Además, el estudio más profundo de los efectos del frass en distintos tipos de cultivos, su impacto a largo plazo en la salud del suelo y su interacción con los microorganismos benéficos, permitirá mejorar aún más su aplicación en la agricultura ecológica.

A medida que aumente el interés por prácticas más respetuosas con el medio ambiente, es probable que la mosca soldado negra y su frass sigan ganando protagonismo como aliados clave en la transición hacia una agricultura más sostenible y resiliente.

R E F E R E N C I A S

- Bohm K, Hatley GA, Robinson BH *et al.* (2023). Analysis of Chemical and Phytotoxic Properties of Frass Derived from Black Soldier Fly-Based Bioconversion of Biosolids. *Sustainability* (Switzerland) 15(15):11526. DOI: <https://doi.org/10.3390/su151511526>.
- Dong X, Dong A, Liu J *et al.* (2024). Impact of Iron Oxide on Anaerobic Digestion of Frass in Biogas and Methanogenic Archaeal Communities Analysis. *Biology* 13(7):536. DOI: <https://doi.org/10.3390/biology13070536>.
- Ferraz Ramos R, Almeida Santana N, de Andrade N *et al.* (2022). Vermicomposting of cow manure: Effect of time on earthworm biomass and chemical, physical, and biological properties of vermicompost. *Bioresource Technology* 345: 126572. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.126572>.
- Li X, Zhou Z, Zhang J *et al.* (2022). Conversion of mixtures of soybean curd residue and kitchen waste by black soldier fly larvae (*Hermetia illucens* L.). *Insects* 13(1):23. DOI: <https://doi.org/10.3390/insects13010023>.
- Setti L, Francia E, Pulvirenti A *et al.* (2019). Use of black soldier fly (*Hermetia illucens* (L.), Diptera: Stratiomyidae) larvae processing residue in peat-based growing media. *Waste Management* 95(15):278-288. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2019.06.017>.
- Wu N, Yu X, Liang J *et al.* (2023). A full recycling chain of food waste with straw addition mediated by black soldier fly larvae: Focus on fresh frass quality, secondary composting, and its fertilizing effect on maize. *Science of the Total Environment* 885(10):163386. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.163386>.

Hugo González-Lara
Juan Fernando García-Trejo
Facultad de Ingeniería
Universidad Autónoma de Querétaro
laragonhugo@gmail.com

© Ivette Tejero. Venado Azul Wixarica.



© Ivette Tejero. *Chinelos de Tlayacapan, Morelos*. De la Serie México Mágico. Óleo/cartón, 46 x 32 cm.







Juette Tejeda, 23