

elementos

BENEMÉRITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE PUEBLA • No. 138 • Volumen 32 • abril - junio 2025 • \$40.00

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



EXHIBIR HASTA EL 30-JUNIO-2025

Un premio nobel para el ajedrez | Los contaminantes ambientales pueden alterar el comportamiento social | Lupus eritematoso sistémico... | ¿Es el cáncer una enfermedad prevenible?
| Vesículas extracelulares: ¿caballos de Troya para los virus? | Hongos contra la resistencia bacteriana... | Neuroimagen funcional con fNIRS... | Metales y metaloides: tóxicos ambientales
que afectan la memoria | Movimientos migratorios en aves: métodos para su rastreo | Depredadores de su propia especie... | Los mapas y la conservación de la biodiversidad |
El impacto de la contaminación en los diálogos de la naturaleza | Tripsatios: refugios para la biodiversidad | Biorremediación en agroecosistemas | El papel de la luz en la producción
de aceites esenciales... | Quitosano, la alternativa más sustentable para la agricultura | Acerca de las compuertas lógicas cuánticas... | Avances de la electrónica orgánica en sensores |
Diagnóstico del trastorno del espectro autista con perspectiva de género | *El azar y la necesidad* cincuenta años después | Honorio Cruz y los karilunos: una entrevista con el artista



S U M A R I O



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 138, volumen 32, abril-junio de 2025

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 (INAOE),

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 Cortés (ICUAP, BUAP),

José Emilio Salceda (Instituto de Fisiología, BUAP),

Gerardo Torres del Castillo (Facultad de Ciencias Físico

Matemáticas, BUAP), Catalina Valdés Baizabal (Laboratorio de

Neurobiología Celular, Universidad de La Laguna),

Enrique Vergara (ICUAP, BUAP)

obra gráfica, © Honorio Cruz

Portada, © *Sin título*. Cerámica de alta temperatura

2° de forros, © *Mi caballo y yo*.

Cerámica de alta temperatura, 129 x 90 x 35 cm

3° de forros, © *Sin título*. Cerámica de alta temperatura

Contraportada, © *Sin título*. Cerámica de alta temperatura

CINTILLO LEGAL

ELEMENTOS, Año 40, No. 138, abril a junio de 2025, 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 2025. 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



Un premio nobel para el ajedrez 3
Hugo Vargas

Los contaminantes ambientales pueden alterar el comportamiento social 11
Carolina Miller Pérez, Martha León-Olea

Lupus eritematoso sistémico: un desafío diagnóstico y terapéutico 15
Iara Yazmín Hernández-Fernández, Alejandra Tavera-Tapia

¿Es el cáncer una enfermedad prevenible? 23
Paola Maycotte González

Vesículas extracelulares: ¿caballos de Troya para los virus? 29
Itzel Alejandra Rivera Ruz, Moisés León Juárez

Honorio Cruz y los karilunios: una entrevista con el artista 33
Enrique Soto

Hongos contra la resistencia bacteriana: ¿una nueva alternativa? 39
Mariana Irán Rodríguez Cayón, José Antonio Cervantes Chávez

Neuroimagen funcional con fNIRS en la investigación del sistema motor 45
Pedro Mabil Espinosa, Jaime Martínez Castillo

Metales y metaloides: tóxicos ambientales que afectan la memoria 51
Lucio Antonio Ramos-Chávez, Martha León-Olea

Movimientos migratorios en aves: métodos para su rastreo 57
Luz E. Zamudio-Beltrán, Blanca E. Hernández-Baños

Depredadores de su propia especie: el canibalismo en los insectos 65
Ricardo Ramírez Romero

Los mapas y la conservación de la biodiversidad 71
Diana Abilene Ahuatzin Flores, Susana Maza-Villalobos

El impacto de la contaminación en los diálogos de la naturaleza 77
Mónica González-Domínguez, David Alavez-Rosas

Traspatios: refugios para la biodiversidad 83
Susana Maza-Villalobos, José Armando Alayón Gamboa

Biorremediación en agroecosistemas 89
Gobinath Chandrakasan

El papel de la luz en la producción de aceites esenciales de plantas aromáticas 93
Humberto Raúl Pacheco-Sánchez, Carlos Eligio Hernández-Navarrete

Quitosano, la alternativa más sustentable para la agricultura 97
Adrián Arroyo Galván

Acerca de las compuertas lógicas cuánticas más rápidas y precisas 101
Giselle N. Morales Rosales, Manuel Ávila Aoki

Avances de la electrónica orgánica en sensores 105
José Antonio Ávila Niño

Diagnóstico del trastorno del espectro autista con perspectiva de género 111
Giovanna Ferman García y Magali Huerta Reyes

El azar y la necesidad cincuenta años después 117
Francisco Pellicer Graham



© **Honorio Cruz.** *Guardián del Cosmo 3.*
Cerámica de alta temperatura, 162 x 57 x 28 cm, base: 15 x 60 x 35 cm.

Un premio nobel para el ajedrez

Hugo **Vargas**

En 2024, el Premio Nobel de Química fue otorgado a Demis Hassabis, David Baker y John M. Jumper “por el diseño computacional de proteínas” y “por la predicción de la estructura de las proteínas”. Y el de física le correspondió a Geoffrey Hinton y John Hopfield por sus “descubrimientos e invenciones fundamentales que permiten el aprendizaje automático con redes neuronales artificiales”, esto es, por ayudar a que las computadoras aprendan. Los premios y premiados, así como sus investigaciones, tienen un origen común.

Todo comenzó en DeepMind, una compañía inglesa dedicada al desarrollo de inteligencia artificial. Creada como Deep Mind Technologies por Demis Hassabis, Shane Legg y Mustafa Suleyman en 2010, en 2014 fue adquirida por Alphabet Inc., la matriz de Google, por una cantidad cercana a los 500 millones de dólares. Fue renombrada como Google DeepMind, y uno de los compromisos de la empresa californiana fue establecer un comité de ética de la inteligencia artificial.

La idea de DeepMind era utilizar la IA para resolver diversos problemas:

[...] y en el camino hacia ese objetivo, sorprendentemente tal vez utilicemos juegos, pues están diseñados como un desafío para que los humanos los dominen y, por lo general, representan algún aspecto interesante del mundo real. Pensamos que son la plataforma perfecta para desarrollar y probar ideas para los algoritmos de la IA.

En octubre de 2015, el programa creado por Goggle DeepMind, AlphaGo, derrotó al campeón europeo de go por 5-0. En enero del año siguiente se dio a conocer la noticia en la revista *Nature*, además de los algoritmos utilizados (en el siguiente enlace se puede ver el documental *Alpha Go. The movie*: <https://www.youtube.com/watch?v=WXuK6gekU1Y&t=451s>).

DeepMind contaba con una red neuronal que aprende cómo jugar videojuegos de una manera similar a la de los seres humanos. Una red neuronal

[...] es un método de la inteligencia artificial que enseña a las computadoras a procesar datos de una manera inspirada en la forma en que lo hace el cerebro humano. Se trata de un tipo de proceso de *machine learning* llamado aprendizaje profundo.¹

Hay varios tipos de redes y en todos ellos se puede llevar a cabo un proceso de entrenamiento y aprendizaje, el *machine learning* que es “una técnica de inteligencia artificial que otorga a las computadoras acceso a conjuntos de datos muy grandes y les enseña a aprender de estos datos”.² Se encuentran, así, patrones que se aplican a nuevas series para tomar decisiones. En este proceso es necesaria la intervención humana que le indica al *software* las características que debe analizar.

Por otro lado, en el aprendizaje profundo el programador introduce datos sin procesar y el *software* obtiene las características por sí mismo y aprende de forma independiente.

Y aquí es donde intervienen las investigaciones de Geoffrey Hinton y John Hopfield que les valieron el Premio Nobel de Física.

Hinton es conocido como “el padrino de la inteligencia artificial” por sus trabajos sobre redes neuronales. Sus investigaciones allanaron el camino para plataformas como ChatGPT.

Sin embargo, el profesor británico-canadiense ha advertido sobre los riesgos que supone para la humanidad la tecnología que él mismo ayudó a

desarrollar: “No tenemos experiencia sobre lo que es tener cosas más inteligentes que nosotros”, declaró.

Va a ser maravilloso en muchos aspectos, en áreas como la atención médica, pero también tenemos que preocuparnos por una serie de posibles consecuencias negativas. En particular, la amenaza de que estas cosas se salgan de control.

Hinton renunció a Google y abogó por ponerle freno al desarrollo de la inteligencia artificial. “No creo que deban ampliar esto hasta que hayan entendido si pueden controlarlo”, dijo el catedrático, quien en 2018 ganó junto con dos de sus estudiantes el Premio Turing, conocido como el nobel de computación.

¿Por qué impulsó una tecnología que ahora le preocupa?, le preguntó *The New York Times*: “Me consuelo con la excusa normal: si no lo hubiera hecho yo, lo habría hecho alguien más”.

Hopfield, por su parte, es profesor en la Universidad de Princeton (Estados Unidos). En la década de 1980, su trabajo se centró en los procesos que pueden informar sobre cómo las máquinas guardan y reproducen patrones. En 1982, Hopfield desarrolló un modelo de redes neuronales³ para describir cómo el cerebro evoca recuerdos, conocido hoy como la red de Hopfield. Esto permitió a las máquinas “almacenar” recuerdos mediante redes neuronales artificiales.

Antes de la llegada de AlphaZero, el programa de ajedrez dominante era Stockfish, creado por Tord Romstad, Joona Kiiski, Gary Linscott y Marco Costalba con la ayuda de desarrolladores de código abierto. De 2013 a 2019 disputó doce campeonatos de computadoras: ganó seis y quedó segundo en cinco. En total ha obtenido once títulos. Por supuesto, tiene un nivel muy superior al del campeón del mundo, se puede llevar en el teléfono móvil, y está disponible para Android, IOS, Mac, Linus y Windows.

AlphaZero es una variante de AlphaGo y puede jugar shogi, ajedrez y go. Es un programa especializado en juegos de dos jugadores y movimientos alternos, que se basa en técnicas de aprendizaje reforzado y profundo con redes neuronales.

También la red de AlphaZero se actualiza continuamente; el ajedrez, a diferencia del go, puede terminar en empate, así que el programa es capaz de considerar las tablas como un resultado posible.

AlphaZero realiza sus búsquedas con el modelo Montecarlo, mucho más limitado, pues solamente calcula 80 mil posiciones por segundo en ajedrez y 40 mil en shogi, a diferencia de los millones de evaluaciones de Stockfish. La diferencia estriba en que, a cambio de calcular menos posibilidades, gracias a su red neuronal profunda puede concentrarse selectivamente en la variante más prometedora.

La red neuronal de AlphaZero tiene 80 capas y cientos de miles de neuronas. Los programadores no la alimentaron con absolutamente nada: ni teoría de aperturas, ni conocimientos estratégicos o tácticos. Tampoco cuenta con un libro de aperturas. Vaya, ni siquiera conoce el valor relativo de las piezas. Ignora los trucos tácticos y las celadas, así como las tormentosas ventajas o desventajas de determinadas estructuras muy conocidas (peones doblados, peones pasados, la importancia de la pareja de alfiles, etc.), ni tampoco ciertos patrones de finales que permiten hallar sin esfuerzo el mejor camino para ganar o empatar una posición cuando quedan pocas piezas en el tablero. Su función de evaluación solo mide la probabilidad de victoria o derrota, entre -1 y 1. Es decir, le enseñaron a mover las piezas, que el objetivo del juego es dar jaque mate al rey contrario... y eso fue todo.

Con esos escasos conocimientos, AlphaZero fue presentado el 5 de diciembre de 2017. Ya había jugado miles de partidas contra sí mismo. De haberle incorporado el bagaje del ajedrez humano

[...] esto habría dado como resultado que AlphaZero aprendería a jugar ajedrez como lo hacen los humanos, con sus mismos errores. Así que el equipo de DeepMind optó por usar un enfoque más ambicioso denominado “aprendizaje de refuerzo”. Al principio AlphaZero jugaba contra sí mismo moviendo aleatoriamente las piezas, pero si eventualmente uno de los dos bandos ganaba, sería debido a que las jugadas que había realizado debían ser mejores que las

del bando que perdió, así que se reajustaban los pesos en la red neuronal. Tras un lote de ejecuciones (4,096 partidas) se consolidaba la mejor red neuronal obtenida hasta el momento, que se catalogaba como “mejor jugador”, y en el siguiente lote se jugaba siempre contra este “mejor jugador”. Si tras otro lote de ejecuciones el nuevo jugador había demostrado ser mejor que aquel, entonces ocupaba su puesto y vuelta a empezar. Esto es, AlphaZero aprende de sus propios errores y toma sus propias decisiones sin intervención humana.⁴

Después de cuatro horas de entrenamiento, los programadores de AlphaZero corroboraron que había superado a Stockfish. El autoentrenamiento prosiguió cinco horas más y entonces se registró el primer encuentro entre ambos programas. Se jugaron 100 partidas. AlphaZero ganó 28, no perdió ninguna y hubo 72 tablas.

Se dieron a conocer diez partidas y los grandes maestros (GM) –el grado más alto entre los jugadores de ajedrez–, comentaristas y aficionados se sorprendieron por la calidad y las nuevas ideas desarrolladas por AlphaZero.

Un año después, en diciembre de 2018, se dio a conocer en la revista *Science* un artículo donde se explicaban las dudas y se mostraban los resultados de los enfrentamientos entre ambos programas, no solo en el ajedrez.⁵

Ahora se ha jugado un número muy superior de partidas, decenas de miles, con diferentes puntos de partida: se han jugado conjuntos de 1,000 partidas (500 con cada color) “libres”, en el sentido de que se comienza desde la posición inicial y cada programa elige la apertura como le da la real gana, sin cortapisas. Y además se han jugado otros conjuntos de 1,000 partidas modificando algunos parámetros, sobre todo el tiempo disponible para AlphaZero, y conjuntos de 400 partidas comenzando con posiciones provenientes de las doce aperturas “humanas”



Hassabis, junto con algunos compañeros en 1986. Foto: Chessbase.

más jugadas (española, siciliana, francesa, Caro-Kann, inglesa, gambito de dama, nimzoindia, etc.), y otros enfrentamientos adicionales. Ya voy adelantando que el resultado de las 1,000 partidas “normales” (desde la posición inicial, con el mismo tiempo para cada jugador) es abrumador: Alphazero ganó 155 partidas, perdió 6 y empató el resto, 839. Una paliza en toda regla, nuevamente. Vale, menos abrumador que el 28 a 0 del *paper* original, pero paliza, de todos modos.⁶

Con estos resultados quedó demostrado que era más importante la calidad en la elección de los movimientos y no la cantidad. Luego de estos encuentros, Demis Hassabis, fundador y CEO de Deep Mind, y ahora premio nobel de química, aseguraba que el programa a menudo hacía movimientos que parecían imposibles para un ajedrecista humano. “No juega como un ser humano ni como un programa. Juega de una tercera manera, casi alienígena”.⁷

También resulta notable, según explicó, que AlphaZero algunas veces hace sacrificios aparentemente locos, como ofrecer un alfil y una dama para hacerse con una ventaja posicional que le dé la victoria.

Tales sacrificios de piezas de alto valor no son habituales. “Parece ajedrez de otra dimensión”, dijo Hassabis.

Por supuesto, el acontecimiento provocó los comentarios de los grandes maestros, que se sorprendieron ante la capacidad de AlphaZero.

Normalmente trabajamos con Stockfish –dijo Sergei Karjakin– y parece que es un buen programa, pero si tenemos otro que vence a Stockfish tan fácilmente, podría ser una nueva generación de computadoras y tal vez sea un día histórico para el ajedrez.

Garri Kaspárov escribió un texto para aquel número de *Science*:

Sé mejor que la mayoría de la gente lo que es competir contra una máquina. Poco después de perder mi revancha contra Deep Blue de IBM, en 1997, la breve ventana de la competencia de ajedrez entre humanos y máquinas se cerró de golpe para siempre.⁸

Pero con la aparición de AlphaZero se demostró que el papel histórico del ajedrez como laboratorio de cognición no ha terminado.

Así como la mosca de la fruta *Drosophila melanogaster* se convirtió en un organismo modelo para los genetistas, el ajedrez se convirtió en una *Drosophila* del razonamiento, escribió Kasparov.

En 2019 apareció una obra muy importante para comprender el fenómeno de AlphaZero, *Game changer*, de Matthew Sadler y Natasha Regan (New in Chess, Nueva York). En el prólogo, Garri Kaspárov sostiene que

[...] la tecnología es un medio para un fin, no un fin. Los humanos también son propensos al punto ciego dogmático y a la falta de objetividad, por lo que debemos tener cuidado de no transmitir nuestros prejuicios a nuestras creaciones digitales. No tiene mucho sentido crear una inteligencia artificial que solo cometa nuestros mismos errores más rápido.

Con AlphaZero el ajedrez “fue zarandeado hasta sus raíces”, y se ve un futuro prometedor en otras áreas: la medicina y la educación también sufrirán una sacudida, “aunque más lentamente”. Pareciera que es el fin del camino para el ajedrez, dijo, pero “estoy muy emocionado de ver a dónde se llega”.

En la introducción de *Game changer* Demis Hassabis relata los inicios de DeepMind.

En 2009 trataba de lograr un encuentro con un muy conocido inversionista de Silicon Valley para lanzar la iniciativa de DeepMind. Luego de varios intentos conseguimos una invitación para hablar en una conferencia de IA donde tendríamos la oportunidad de conocerlo brevemente. Sin embargo, había un centenar de personas que también lo buscaban para proponerle ideas de inversión. Sabía que tendríamos que hacer algo único para sobresalir entre la multitud, pero no estaba seguro de qué. Durante mi investigación de antecedentes, había leído que era un gran jugador de ajedrez, así que cuando finalmente llegó nuestro turno para hablar brevemente con él, decidí olvidarme de los detalles de la empresa que queríamos crear y, en cambio, hablar de ajedrez.

Le dije que, en mi opinión, era el exquisito equilibrio del alfil y el caballo en todas las posiciones, a pesar de su movilidad muy diferente, lo que creaba la tensión dinámica en el juego. Era una estrategia arriesgada, pero, convenientemente estimulado y habiendo despertado su interés, tuvimos nuestra reunión de presentación completa al día siguiente y, gracias a eso, iinvertió en la empresa!

Como buen ajedrecista, Hassabis sabe que la relación entre el ajedrez y la inteligencia artificial es tan vieja como la computación.

Los gigantes de los inicios del cómputo y algunos de mis héroes de todos los tiempos –Turing, Shannon, Von Neumann– probaron suerte y formularon programas de ajedrez.

Hassabis comprendió muy pronto que AlphaZero jugaba de manera muy diferente a los motores de ajedrez tradicionales, con un ataque fluido y similar al humano.

Para mí, como alguien que ama el ajedrez, fue algo profundamente satisfactorio presenciar este estilo de juego dinámico y estéticamente agradable. El juego aún tiene una gran cantidad de secretos por descubrir. AlphaZero es solo el principio para nosotros.

Matthew Sadler y Natasha Regan afirman que la rapidez con la que AlphaZero adquirió una tremenda fuerza en el ajedrez sin colaboración humana “abre la posibilidad de utilizar estas técnicas para aplicaciones en las que el conocimiento humano es limitado”. Como lo sabemos hoy, no se equivocaban Matthew Sadler y Natasha Regan respecto a la ayuda de la inteligencia artificial en temas científicos.

Poco después se dio a conocer que el programa AlphaFold, propiedad de DeepMind y Google, había logrado grandes avances en la resolución del desafío del plegamiento de las proteínas.⁹

Las proteínas se encuentran en todos los organismos vivos. Se forman con largas cadenas de aminoácidos y son indispensables para la estructura celular y para regular la química corporal.

Antes del aprendizaje profundo, “el problema del plegamiento de proteínas parecía increíblemente difícil y destinado a frustrar a los químicos computacionales durante muchas décadas”. (Aquí hay una pequeña introducción al funcionamiento de AlphaFold: <https://www.youtube.com/watch?v=gg7WjuFs8F4&t=4s>).

Y es que, al tiempo que AlphaZero derrotaba a todos sus contrincantes en juegos de jugador contra jugador e información completa, la compañía contrató a un puñado de científicos y creó un pequeño equipo multidisciplinario para abordar el tema de las proteínas.

En 2020, la nueva versión, AlphaFold2, despertó enormes expectativas pues se veía a estos programas como los métodos de elección para determinar las estructuras de proteínas antes de recurrir a técnicas experimentales que requieren un trabajo minucioso y una instrumentación costosa.

Esta tarea parece ideal para AlphaFold, pues se necesita una gran capacidad de cálculo, pero sobre todo eliminar falsas disyuntivas. El reto se puede apreciar al comparar el número de todas las estructuras proteicas publicadas, aproximadamente mil, con los 180 millones de secuencias de ADN y proteínas depositadas en la base de datos universal de proteínas. AlphaFold ayudará a clasificar secuencias de ADN en busca de nuevas proteínas con estructuras y funciones únicas.

Según relata Will Douglas Heaven en *Technology Review*, la revista del Massachusetts Institute of Technology, cuando Hassabis presenciaba, tras bambalinas, el encuentro de AlphaGo contra Lee Sedol, campeón mundial de ese juego:

[...] se dio cuenta de que la tecnología de su empresa estaba lista para enfrentarse a uno de los acertijos más importantes y complicados de la biología, para el cual los investigadores

llevaban 50 años intentado dar una respuesta: predecir la estructura de las proteínas.¹⁰

Hassabis le aseguró al periodista del MIT que AlphaFold2, “es lo más complejo que hemos hecho nunca”.

“Esta es la razón por la que creé DeepMind y, de hecho, por lo que he trabajado durante toda mi carrera en la inteligencia artificial”, confiesa Hassabis. Él ha estado pensando en las proteínas de forma intermitente durante 25 años, desde que conoció ese problema cuando era estudiante en la Universidad de Cambridge (Reino Unido), en la década de 1990.

El futuro parece promisorio. Según Hassabis:

Veremos un renacimiento en la ciencia, donde estas técnicas de IA se volverán cada vez más sofisticadas y se aplicarán a una amplia variedad de campos científicos. A medida que crece la ola de la inteligencia artificial, hay más problemas que se vuelven abordables.

No pude resistir la tentación de entrevistar a ChatGPT sobre estos temas. Respecto a la robótica, me dijo que las leyes postuladas por Isaac Asimov

[...] se han utilizado como punto de partida para la discusión sobre la ética y la seguridad en la robótica, y han influido en la forma en que se han diseñado los robots en la vida real. Sin embargo, hay muchos debates sobre si estas leyes son suficientes para garantizar una robótica segura y ética en el futuro.

—¿Sabes jugar ajedrez?

Sí, como modelo de lenguaje, puedo entender las reglas y la lógica detrás del ajedrez. También puedo ofrecer consejos y estrategias básicas para mejorar en el juego.

Es importante tener en cuenta que no tengo la capacidad de jugar ajedrez por mí mismo. Soy un modelo de lenguaje basado en *software* y no tengo la capacidad de interactuar con el mundo físico. Pero si tienes alguna pregunta



© Honorio Cruz. *El árbol de la vida 2*. Cerámica de alta temperatura, 121 × 191 cm.

específica sobre el ajedrez o necesitas ayuda con el juego, estaré encantado de ayudarte en la medida de mis posibilidades.

Le pregunté sobre la importancia del ajedrez para el desarrollo de la inteligencia artificial.

El ajedrez ha desempeñado un papel fundamental en el desarrollo de la inteligencia artificial desde sus primeros días. Durante décadas, el ajedrez ha sido una de las pruebas de referencia para la inteligencia artificial, ya que es un juego complejo que requiere una gran cantidad de análisis y estrategia.

—¿Cuál será el impacto de la inteligencia artificial en el ajedrez?

La inteligencia artificial ya está teniendo un impacto significativo en el ajedrez profesional. Los programas basados en la IA han mejorado drásticamente en los últimos años, lo que ha llevado a una mejora en la calidad del juego y a una mayor precisión en la evaluación de posiciones y movimientos. A medida que los programas de ajedrez basados en la IA continúan mejorando,

es probable que tengan un impacto aún mayor en el ajedrez profesional.

Y concluyó así:

Sin embargo, es importante tener en cuenta que el ajedrez sigue siendo un juego basado en la creatividad y la intuición, y que los programas basados en inteligencia artificial no pueden replicar completamente el pensamiento humano y la capacidad de tomar decisiones en un contexto más amplio. Por lo tanto, es probable que el ajedrez profesional siga siendo un juego emocionante y desafiante para los jugadores y los aficionados, incluso en el mundo de la inteligencia artificial.

NOTAS

¹ “¿Qué es una red neuronal?”, <https://aws.amazon.com/es/what-is/neural-network/>.

² *Ibid.*

³ Hopfield JJ (1982). Neural networks and physical systems with emergent collective computational abilities. PNAS 79:2554-2558

⁴ Rodrigo Díaz López, “AlphaZero: la revolución del machine learning”



© Honorio Cruz. *El viaje del Sol 1*. Cerámica de alta temperatura, 72 × 57 cm.

(<https://www.atsistemas.com/es/blog/alphazero-la-revolucin-del-machine-learning>).

⁵ Silver D, Hubert T, Schrittwieser J et al. (2018). A general reinforcement learning algorithm that masters chess, shogi and go through self play. *Science* 362 (6419):1140-1144.

⁶ *Ibid.*

⁷ Knight W (2017). AlphaZero, la inteligencia artificial “alienígena” que domina tres juegos distintos. <https://www.technologyreview.es/s/9846/>

[alpha-zero-la-inteligencia-artificial-alienigena-que-domina-tres-juegos-distintos](#).

⁸ Garri Kaspárov (2018). Chess, a *Drosophila* of reasoning. *Science* 362 (6419):1087.

⁹ The Conversation (2020). Otro avance de la Inteligencia Artificial: predecir cómo se pliegan las proteínas. *El Financiero*, 2 de diciembre de 2020.

¹⁰ *Ibid.*

Los contaminantes ambientales pueden alterar el comportamiento social

Carolina **Miller Pérez**
Martha **León-Olea**

La neurociencia social es una rama de las neurociencias cognitivas. Las bases biológicas que condicionan nuestras actitudes y comportamientos tienen su origen en las interacciones entre el sistema nervioso, el sistema endocrino y la genética. El medio ambiente puede intervenir de manera significativa en estos tres sistemas modificando sus respuestas mediante la plasticidad, la adaptación y la epigenética.

El estudio de las bases neurobiológicas (neuronales, neuroendocrinas, genéticas y ambientales) es esencial para comprender la complejidad del comportamiento humano y los principios fundamentales de las relaciones cerebro-conducta. La dominancia social, la agresión, las conductas afiliativas como el cuidado materno y las alianzas sociales (Wacker y Ludwig, 2012) tienen sustratos neurohormonales y fisiológicos diversos; por ejemplo, se ha demostrado que los niveles de serotonina y las hormonas oxitocina (OT) y vasopresina (VP) están relacionados. La oxitocina se considera un mediador neuroquímico prosocial, y la serotonina facilita conductas antisociales relacionadas con la interacción en ambientes adversos.

La oxitocina y la vasopresina son neuropéptidos que se producen principalmente en los núcleos supraóptico

(SON) y paraventricular (PVN) del hipotálamo. Ambos se almacenan en la hipófisis posterior y se liberan a la circulación sanguínea. Estos nonapéptidos se han mantenido casi sin variación a través de la escala zoológica a lo largo de más de dos millones de años de evolución.

Las funciones más conocidas de la vasopresina son mantener la homeostasis del agua y los electrolitos y la presión arterial. Las funciones principales de la oxitocina son la estimulación de la contractilidad uterina, promover la eyección de la leche durante la lactancia y participar en el comportamiento reproductivo. Se sabe que ambas hormonas participan en el comportamiento social de los mamíferos, actúan como reguladores en el desarrollo del cerebro social y participan en las conductas sociales tanto en la infancia como en la edad adulta. Además, tienen un papel importante en los trastornos neuropsiquiátricos caracterizados por deterioro de la cognición social: comportamiento social, memoria social, reconocimiento social y regulación de las conductas afiliativas en mamíferos.

FACTORES AMBIENTALES QUE PUEDEN AFECTAR LOS SISTEMAS DE VASOPRESINA Y OXITOCINA

Además del ambiente social que influye en los sistemas que regulan el comportamiento social, la composición química del medio ambiente tiene efectos importantes sobre estos sistemas.

Los contaminantes ambientales son un problema de salud pública que afecta a las poblaciones humanas en todo el mundo.

Entre estos contaminantes, los más tóxicos son los metales pesados como el plomo y el mercurio, así como el plaguicida diclorodifeniltricloroetano (DDT), el bisfenol A (BPA) y los compuestos organohalogenados, entre ellos los retardantes de flama (León-Olea *et al.*, 2014).

El BPA se encuentra en compuestos sintéticos utilizados para la producción de plásticos de polycarbonato y resinas epóxicas, y se ha utilizado en la producción de plásticos desde la década de 1950.

La exposición a este tóxico durante el desarrollo interfiere con las vías de señalización de estrógenos, oxitocina y vasopresina, y altera las vías de señalización críticas para la organización y transmisión sináptica en el cerebro (Arambula *et al.*, 2017).

El DDT, ampliamente distribuido a nivel mundial, es considerado un disruptor endocrino. Afecta la producción de oxitocina y vasopresina y se ha relacionado con problemas de obesidad. Se describió una correlación entre la exposición a DDT y el porcentaje de obesidad entre la población. Además, está vinculado con diversos tipos de cáncer, como el de mama (Safe, 2020).

Otros disruptores endocrinos son los compuestos halogenados que se han utilizado ampliamente como retardantes de flama, como los bifenilos policlorados (PCB) y los polibromados, entre ellos los éteres difenilos polibromados (PBDE). Estos compuestos se usan como aditivos en infinidad de productos de uso cotidiano, como textiles, plásticos, aparatos electrónicos y esponjas de poliuretano, entre muchos otros. Debido a su persistencia, su acumulación en el organismo, su transporte de largo alcance en la atmósfera y su toxicidad, se consideran contaminantes orgánicos persistentes. Son lipofílicos, por lo que se encuentran en el tejido adiposo, los tejidos que contienen lípidos (como el sistema nervioso) en la sangre, en la leche materna, y pueden atravesar la barrera placentaria (León-Olea *et al.*, 2023). La dieta (pescado, huevo, pollo, res, entre otros) y el polvo de casa son las vías principales de contaminación humana, aunque también están en el agua y el aire (Figura 1).

Los niños de cero a dos años son los más expuestos a este tipo de contaminantes ya que, por sus hábitos, que incluyen el juego y la conducta exploratoria, están más en contacto con el polvo doméstico, además de tener un índice proporcional de grasa más alto, lo que conlleva a niveles más elevados de estos tóxicos. Estos contaminantes afectan a los sistemas hormonales, entre ellos el tiroideo, el gonadal, el vasopresinérgico y el oxitocinérgico (León-Olea *et al.*, 2023). Tanto el plomo como los PCB y los PBDE, alteran la producción de otros mensajeros en el sistema nervioso que

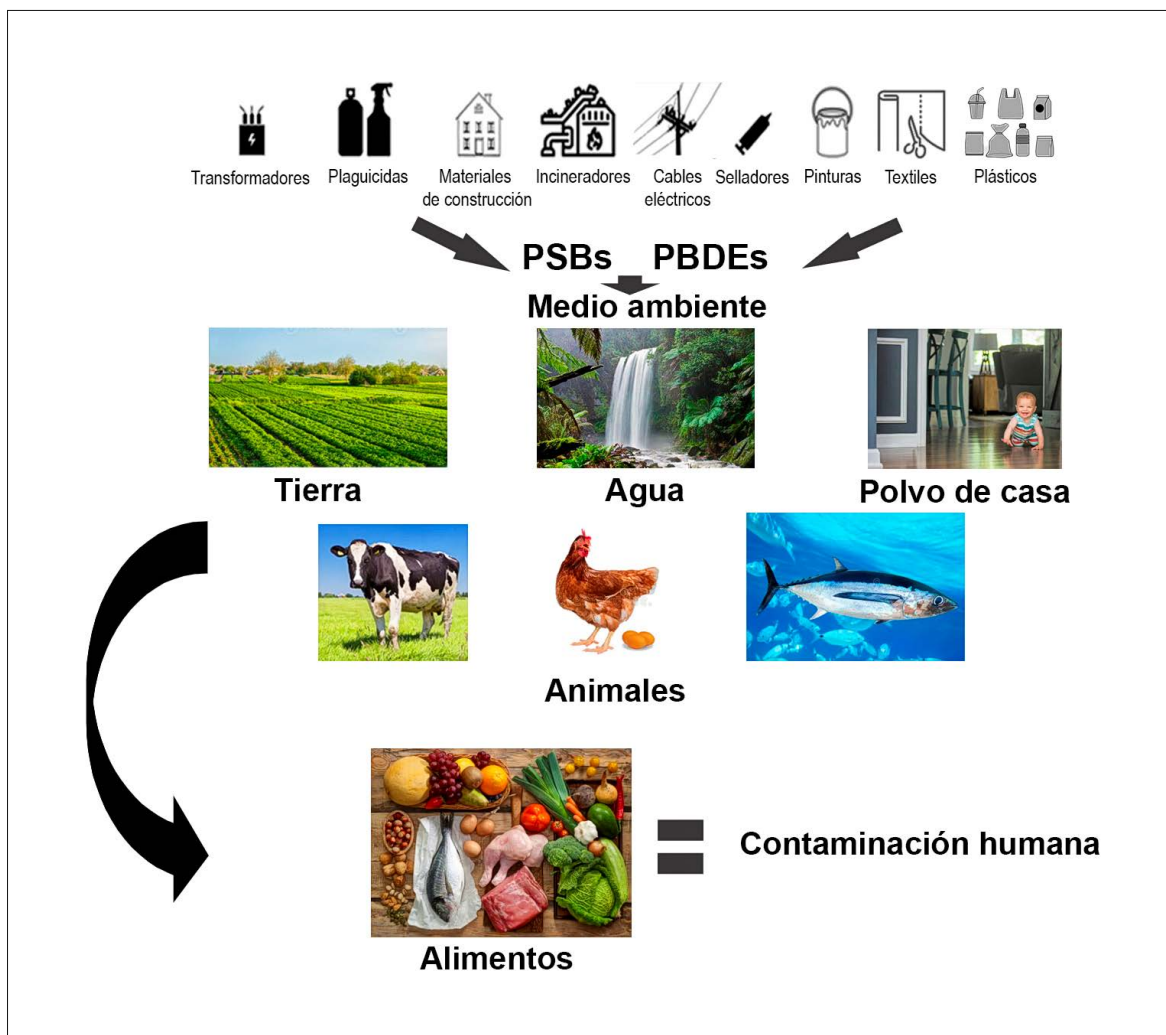


Figura 1. Representación de los productos industriales y de consumo humano que contienen y liberan compuestos organohalogenados, como los PCBs y PBDEs. Se muestran también las principales fuentes de transporte ambiental (agua, tierra y aire), la contaminación en los seres vivos, la bioacumulación y la biomagnificación hasta los alimentos de consumo humano.

participan en la regulación de estos sistemas hormonales, y también en funciones como la memoria y el aprendizaje.

En investigaciones de nuestro grupo, demostramos que la exposición perinatal a los PCB y PBDE afecta el sistema vasopresinérgico y oxitocinérgico en la rata. Al exponer a las ratas a un estímulo osmótico como la deshidratación, a los 3 y 10 meses de edad, los animales no presentan la respuesta osmorregulatoria, alterando la homeostasis hídrica (Mucio-Ramírez *et al.*, 2017; Álvarez-González *et al.*, 2020).

También se altera el comportamiento materno, el aprendizaje, la memoria y la conducta sexual (Cromwell *et al.*, 2007; Garduño-Gutiérrez *et al.*, 2023). Estos efectos son crónicos, ya que persisten en la edad

avanzada. Los niveles de los PCB y PBDE están asociados con un mayor riesgo de desarrollar hipertensión y una mayor incidencia de obesidad. Además, los PCB se asociaron con problemas de aterosclerosis coronaria, insuficiencia cardíaca y diabetes tipo 2, entre otros.

Estudios recientes sugieren que el autismo es causado por interacciones complejas entre factores genéticos y contaminantes ambientales como los PCB. Algunos autores reportan que altos niveles de PCB-95 (3-15 ng/g de lípidos) se asocian con alteraciones en la región cromosómica 15q11-13 (en donde se codifica el receptor de la oxitocina),

asociadas con el trastorno autista. El DE-71 (mezcla comercial de penta-PBDEs) puede alterar el sentido del olfato y la memoria de reconocimiento. En pacientes con estrés postraumático, otros padecimientos psiquiátricos y niveles altos de contaminantes ambientales, se han encontrado alteraciones en los genes, principalmente por metilación.

Sería imposible comprender el origen del comportamiento social sin conocer los sistemas neurobiológicos y cómo afectan o modulan el comportamiento. A nivel fisiológico, la regulación del comportamiento afiliativo debe explorarse para cada especie, reconociendo la importancia de la diversidad de los mecanismos neurales en la cognición social. Los modelos animales se utilizan para comprender el comportamiento humano, ya que permiten una investigación más rigurosa de la neurobiología de dicho comportamiento. Sin embargo, se requiere especial cuidado en la interpretación de los resultados de estudios neurobiológicos de comportamientos simples que han utilizado modelos animales para explicar comportamientos humanos sociales complejos.

Un factor que no debe pasar desapercibido es la contaminación ambiental. La exposición crónica a bajas concentraciones de múltiples neurotoxinas ha creado una pandemia silenciosa de trastornos del desarrollo neurológico, asociados con patologías como el espectro autista y los trastornos por déficit de atención. Hay un aumento significativo en la prevalencia de los trastornos del espectro autista en los últimos años. En México, las estimaciones revelan un aumento anual del 17 %, mientras que en España el número de casos ha aumentado un 40 % en los últimos 30 años.

Esto sugiere que los cambios en la prevalencia pueden derivarse de la exposición a contaminantes ambientales, incluidos pesticidas, productos químicos y metales pesados. Estos datos indican que debe promoverse el estudio de los factores que contribuyen a los trastornos psiquiátricos y que tienen impacto en la salud pública, particularmente los contaminantes ambientales como los mencionados en este trabajo.

REFERENCIAS

- Alvarez-Gonzalez MY, Sánchez-Islas E, Mucio-Ramírez S, de Gortari P, Amaya MI, Kodavanti PRS and León-Olea M (2020). Perinatal exposure to octabromodiphenyl ether mixture, DE-79, alters the vasopressinergic system in adult rats. *Toxicol Appl Pharmacol*. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.taap.2020.114914>.
- Arambula SE, Jima D and Patisaul HB (2017). Prenatal bisphenol A (BPA) exposure alters the transcriptome of the neonate rat amygdala in a sex-specific manner: a CLARITY-BPA consortium study. *Neurotoxicology* 65: 207-220. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.neuro.2017.10.005>.
- Garduño-Gutiérrez R, Rodríguez-Manzo G, Velázquez-Alvarado A, Miller-Pérez C and León-Olea M (2023). The endocrine disruptor DE-79 alters oxytocinergic transmission and sexual behavior expression in male rats. *Toxicol Appl Pharmacol*. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.taap.2023.116723>.
- Cromwell HC, Johnson A, McKnight L, Horinek M, Asbrock C, Burt S, Jolous-Jamshidi B and Meserve LA (2007). Effects of polychlorinated biphenyls on maternal odor conditioning in rat pups. *Physiol Behav* 91(5):658-66. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.physbeh.2007.03.029>.
- León-Olea M, Martyniuk CJ, Orlando EF, Ottinger MA, Rosenfeld C, Wolstenholme J and Trudeau VL (2014). Current concepts in neuroendocrine disruption. *Gen Comp Endocrinol* 203C:158-173. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ygcen.2014.02.005>.
- León-Olea M, Alvarez-Gonzalez MY, Mucio-Ramírez S, Sánchez-Jaramillo E and Sánchez-Islas E (2023). Chapter Six - Neuroendocrine effects of brominated flame retardants, focused on polybrominated diphenyl ethers. In: Prasada Rao S, Kodavanti, Michael Aschner, Lucio G. Costa (Eds.), *Advances in Neurotoxicology* (Volume 10, pp. 209-277), Academic Press. DOI: <https://doi.org/10.1016/bs.ant.2023.08.001>.
- Mucio-Ramírez S, Sánchez-Islas E, Sánchez-Jaramillo E, Currás-Collazo M, Juárez-González VR, Álvarez-González MY, Orser LE, Hou B, Pellicer F, Kodavanti PRS and León-Olea M (2017). Perinatal exposure to organohalogen pollutants decrease vasopressin content and its mRNA expression in magnocellular neuroendocrine cells activated by osmotic stress in adult rats. *Toxicol. Appl. Pharmacol.* 329:173-189. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.taap.2017.05.039>.
- Safe S (2020). Recent advances in understanding endocrine disruptors: DDT and related compounds. *Fac Rev* 12:9-7. DOI: <https://doi.org/10.12703/b/9-7>.
- Wacker DW and Ludwig M. (2012). Vasopressin, oxytocin, and social odor recognition. *Horm Behav* 61:259-265. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.yhbeh.2011.08.014>.

Carolina Miller Pérez
Martha León-Olea
Instituto Nacional de Psiquiatría
Ramón de la Fuente Muñiz
marthalo@inprf.gob.mx

Lupus eritematoso sistémico: un desafío diagnóstico y terapéutico

Iara Yazmín **Hernández-Fernández**
Alejandra **Tavera-Tapia**

El lupus eritematoso sistémico (LES) es una enfermedad crónica e inflamatoria de tipo autoinmune. En esta clase de enfermedades, el sistema inmunitario, que nos defiende contra infecciones, pierde el control y ataca al tejido sano. El lupus afecta principalmente a la piel, los riñones, el sistema nervioso y las articulaciones, y provoca una diversidad de signos y síntomas. Existen cuatro formas de la enfermedad: 1) sistémico (el más común, 70 % de todos los casos); 2) cutáneo (solo afecta a la piel); 3) secundario (causado por ciertos medicamentos y cesa al dejar de consumirlos); 4) neonatal (enfermedad rara que afecta a los recién nacidos) (Accapezzato *et al.*, 2023).

¿QUÉ TAN COMÚN ES Y A QUIÉNES AFECTA?

De acuerdo con datos de la Fundación de Lupus de América (2022), se estima que al menos cinco millones de personas en todo el mundo presentan algún tipo de lupus con una mayor manifestación en mujeres con edad reproductiva (9 de cada 10 casos). A pesar de la poca información con respecto a la epidemiología en países de Latinoamérica, la mujer hispana se encuentra en tercer lugar de incidencia en la mayoría de los estudios a nivel mundial. Además, esta enfermedad no se limita al sexo femenino, también puede afectar a hombres, adolescentes y niños

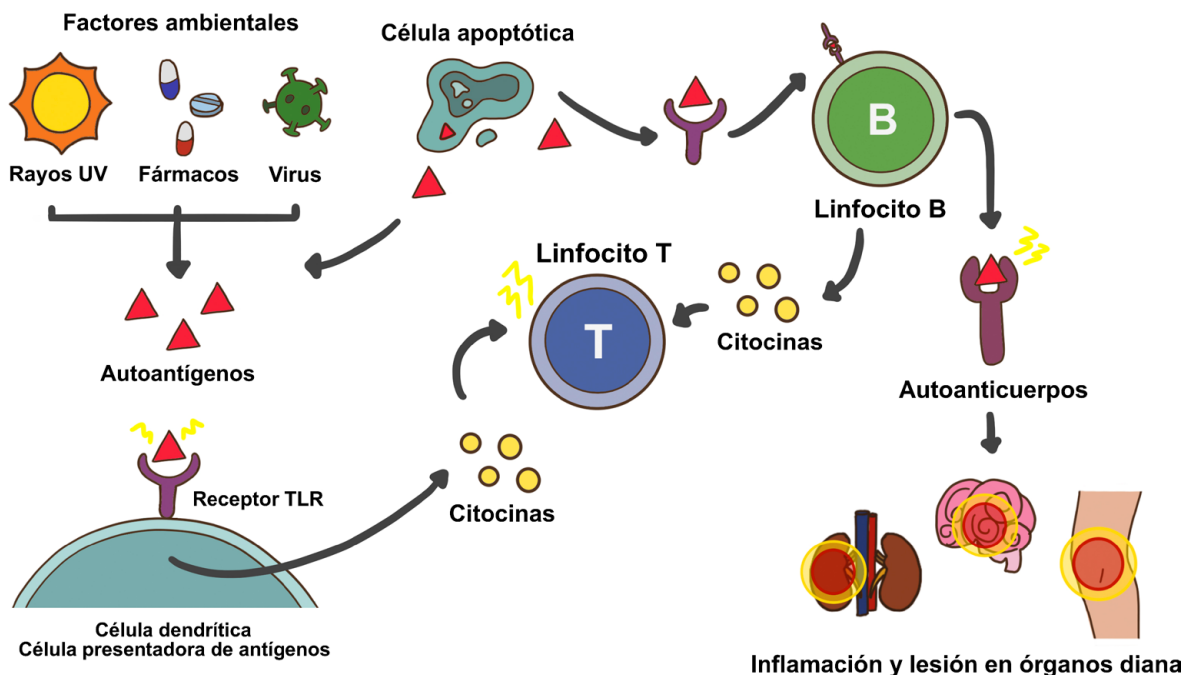


Figura 1. Causas asociadas al desarrollo de LES. Los síntomas del lupus eritematoso sistémico son inducidos por autoantígenos originados a partir de factores ambientales como los rayos UV, ciertos fármacos y virus, así como por células en apoptosis. Estos autoantígenos activan a los receptores de las células presentadoras de antígenos (que estimulan a los linfocitos T) y a los receptores de los linfocitos B, iniciando la formación de células plasmáticas que generan autoanticuerpos. El acúmulo de autoanticuerpos provoca inflamación y daños en los tejidos diana como los riñones, el cerebro, las articulaciones, entre otros.

(Barber *et al.*, 2023). Según el Registro Mexicano de Lupus, casi 94 % de la cohorte de pacientes con la enfermedad son mujeres y un 39 % de la cohorte fue diagnosticada a una edad entre los 31 y los 40 años. La mayor parte de los registros proceden del centro del país (Ciudad de México, Estado de México, Querétaro y Morelos). Otras enfermedades frecuentes en estas pacientes incluyeron hipertensión y enfermedades de la tiroides; en tanto que las manifestaciones de LES más reportadas son artritis y alopecia (Hernández-Ledesma *et al.*, 2023).

¿QUÉ CAUSA EL LUPUS?

En la actualidad se desconoce la causa específica. No obstante, una cantidad importante de investigadores señalan la predisposición genética como un pilar para la expresión de la enfermedad. Esta carga genética requiere una sinergia con factores externos que contribuyen a la aparición del padecimiento: hormonas (como los estrógenos), factores

ambientales (como los rayos UV), infecciones por algunos virus (por ejemplo, el virus Epstein-Barr), medicamentos que favorezcan la sensibilidad al sol (como los diuréticos y ciertos antibióticos), una lesión traumática, estrés emocional, entre otros (González-Jiménez *et al.*, 2021)

EL PAPEL DEL SISTEMA INMUNITARIO

En individuos afectados, la predisposición genética interactúa con los factores ambientales, lo que desencadena una respuesta del sistema inmunitario contra antígenos nucleares endógenos. Esto conduce a la producción de autoanticuerpos, principalmente anticuerpos antinucleares (ANA), que atacan tanto los tejidos como los componentes celulares propios (Schilirò *et al.*, 2024). Los autoantígenos también pueden ser liberados por células en apoptosis, un tipo de muerte celular que está alterada en la enfermedad. Además, se ha observado una baja eliminación de células muertas, lo que provoca su acumulación en distintos tejidos y exacerba fenómenos de autoinmunidad (Sheriff *et*

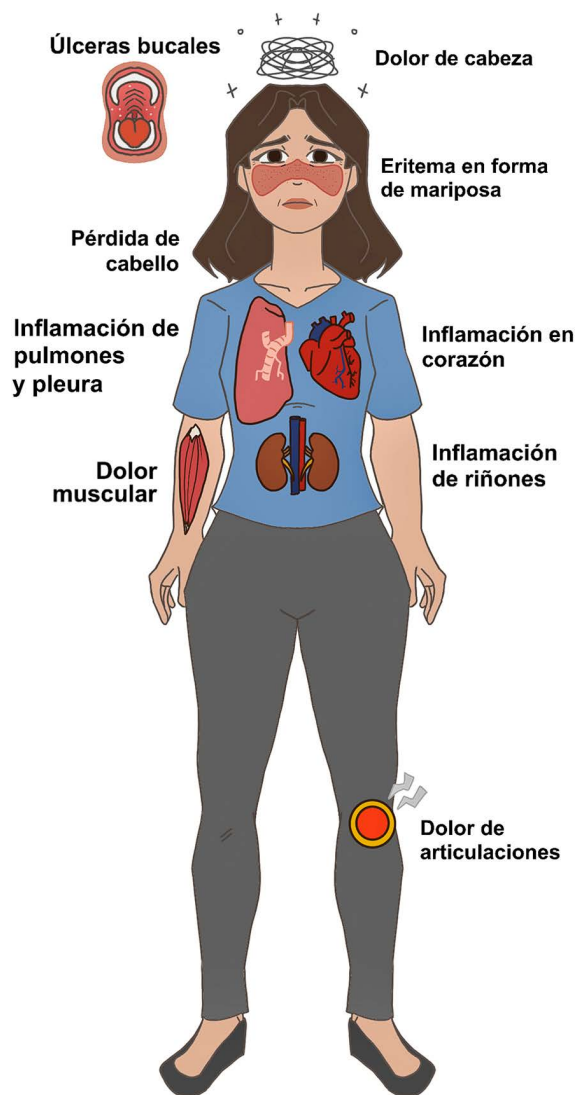


Figura 2. Sintomatología del LES. Los síntomas más comunes incluyen dolor de cabeza, úlceras bucales, cansancio, pérdida de cabello, dolor muscular, eritema malar o “en forma de mariposa”, inflamación de pulmones, pleura, corazón y riñones, así como dolor en las articulaciones.

al., 2004). Estos eventos favorecen que los autoantígenos queden expuestos y las células dendríticas los capten, procesen y presenten a los linfocitos T, los cuales coordinan una respuesta inmune específica. Este fenómeno de comunicación se lleva a cabo mediante citocinas, como el interferón alfa [INF- α] y diversas interleucinas, pequeñas moléculas que funcionan como mensajeros para regular la función de otras células. Las citocinas también activan a los linfocitos B, responsables de producir anticuerpos, que en este caso se dirigen contra moléculas propias, generando autoanticuerpos (Charras *et al.*, 2021).

Los autoanticuerpos pueden dañar los tejidos mediante la formación de inmunocomplejos, estructuras compuestas por la unión de antígenos y anticuerpos. Este proceso genera una reacción inflamatoria que interfiere con las funciones celulares normales, desencadenando los síntomas asociados (Figura 1). La gravedad de los síntomas puede variar dependiendo del grado de alteración del sistema inmunitario del paciente.

El cuadro clínico de la enfermedad puede diferir significativamente entre individuos, e incluye desde afecciones leves en la piel y articulaciones, hasta daño renal y en el sistema nervioso. Los signos y síntomas más comunes son cansancio, dolor muscular, fotosensibilidad, erupción malar o “en forma de mariposa”, pérdida de cabello, fiebre y artritis no erosiva (inflamación del recubrimiento de las articulaciones causado por un acúmulo de inmunocomplejos) (Figura 2) (González-Jiménez *et al.*, 2021).

El daño en el tejido de los vasos sanguíneos activa una cascada de elementos que resulta en el uso de plaquetas para repararlo, así que el LES también puede propiciar alteraciones sanguíneas como la disminución en la cuenta de plaquetas y anemia. Los depósitos de inmunocomplejos pueden llegar al riñón y causar inflamación y diversos problemas renales (Illescas-Montes *et al.*, 2019).

¿CÓMO SE DIAGNOSTICA?

El especialista deberá realizar una historia clínica completa del paciente; esto es fundamental debido al factor genético, que tiene un gran peso en el origen de LES. Además, la identificación de la enfermedad se basa en la identificación del cuadro característico de la enfermedad (Lazar *et al.*, 2023). También son de utilidad los estudios serológicos para detectar autoanticuerpos (principalmente ANA [anticuerpos antinucleares], aunque también se puede buscar anti-DNA, anti-SM [anticuerpos anti Smith] y antifosfolípidos, estos últimos para descartar otros padecimientos que podrían ser compatibles con los signos clínicos) (Yu *et al.*, 2021).

En LES se ha reportado que los ANA presentan elevaciones más acentuadas en caso de exacerbación de las manifestaciones clínicas (Kucy *et al.*, 2024; Charras *et al.*, 2021). Asimismo, diversos estudios sugieren que las respuestas a los ANA pueden reducir a lo largo del tiempo dado el curso natural de la enfermedad o por el tratamiento. Actualmente se investigan los valores cuantitativos de ANA en los diversos estados de la enfermedad, pues podrían proporcionar información importante sobre los mecanismos del LES (Pisetsky *et al.*, 2020).

Basarse únicamente en los datos clínicos puede dificultar o ralentizar el diagnóstico debido a la diversidad y a la variabilidad en la expresión de la enfermedad; es por ello que, para identificar el LES, se deben considerar en conjunto los criterios clínicos y los inmunológicos. Solo así se podrá brindar un tratamiento oportuno (Schilirò *et al.*, 2024). Además, los síntomas de LES se parecen a los de otros padecimientos y pueden variar, lo que en algunos casos podría llevar a un diagnóstico incorrecto, por ello son de relevancia los criterios diagnósticos (Fundación del Lupus en América, 2022). En 2019, se desarrollaron los criterios de la Alianza Europea Contra el Reumatismo y el Colegio Americano de Reumatología (EULAR/ACR, por sus siglas en inglés) que establecen el requerimiento de una prueba de anticuerpo ANA positiva al menos una vez como criterio de ingreso obligatorio a LES, seguida de criterios aditivos en grupos de siete índices clínicos (constitucional, hematológico, neuropsiquiátrico, mucocutáneos, serosos, musculoesquelético y renal) y tres marcadores inmunológicos (anticuerpos antifosfolípidos, proteínas del complemento y anticuerpos específicos de LES). Estos índices clínicos y marcadores inmunológicos poseen diversos ítems cuya presencia se evalúa cada uno con una puntuación entre dos y diez. Los pacientes con diez puntos o más se pueden clasificar con LES, si se cumple con el criterio de entrada. Estos criterios muestran mayor sensibilidad y una especificidad similar en comparación con criterios anteriores para pacientes adultos con LES, como en el caso de los propuestos por la ACR

en 1997 (Charras *et al.*, 2021; Yu *et al.*, 2021; Kucy *et al.*, 2024; Aringer *et al.*, 2019).

¿CÓMO SE TRATA?

El tratamiento del LES dependerá de la intensidad de las manifestaciones y de los órganos afectados en el momento del diagnóstico. Es por ello que los medicamentos tienden a variar, inclusive en la misma persona, de acuerdo con las necesidades particulares del paciente y su evolución clínica. Además de cambios en el estilo de vida que disminuyan la influencia de los factores ambientales desencadenantes de la enfermedad, el tratamiento puede incluir fármacos antiinflamatorios e inmunosupresores (estos últimos se encargan de disminuir la actividad y respuesta del sistema inmunitario) (Tsang-A-Sjoe *et al.*, 2021).

El tratamiento farmacológico de LES se basa en medicamentos antiinflamatorios no esteroideos, medicamentos antimaláricos (el más usado es la hidroxicloroquina), antiinflamatorios glucocorticoides y fármacos citotóxicos o inmunosupresores (entre los más empleados están azatioprina, ciclofosfamida, metotrexato y mofetil de micofenolato) para formas severas de la enfermedad (Illescas-Montes *et al.*, 2019; González-Jiménez *et al.*, 2021).

En la última década, la investigación sobre nuevos tratamientos para la enfermedad ha avanzado de manera exponencial, dando lugar al desarrollo de opciones terapéuticas más eficientes con resultados prometedores. No obstante, la literatura al respecto señala que muchas de estas se emplean aún en conjunto con la terapia convencional. El enfoque, conforme avance la ciencia, es reemplazar esta última, dada su toxicidad y efectos secundarios (Accapezzato *et al.*, 2023).

El belimumab es un anticuerpo monoclonal que actúa como inmunosupresor de una proteína (el factor estimulador del linfocito B [BLyS]) en personas con LES. En estudios recientes, su empleo ha mostrado ser beneficioso en pacientes con LES grave, demostrando ser significativamente más efectivo cuando se combina con el tratamiento convencional para ralentizar el daño renal, una de las principales



© Honorio Cruz. El toro domado por la Luna 1. Cerámica de alta temperatura. 57 x 73 cm.

complicaciones de la enfermedad. Por su parte, el obixelimab, un anticuerpo monoclonal humanizado, ha demostrado reducir la cantidad de células B circulantes provocando una mejora clínica significativa.

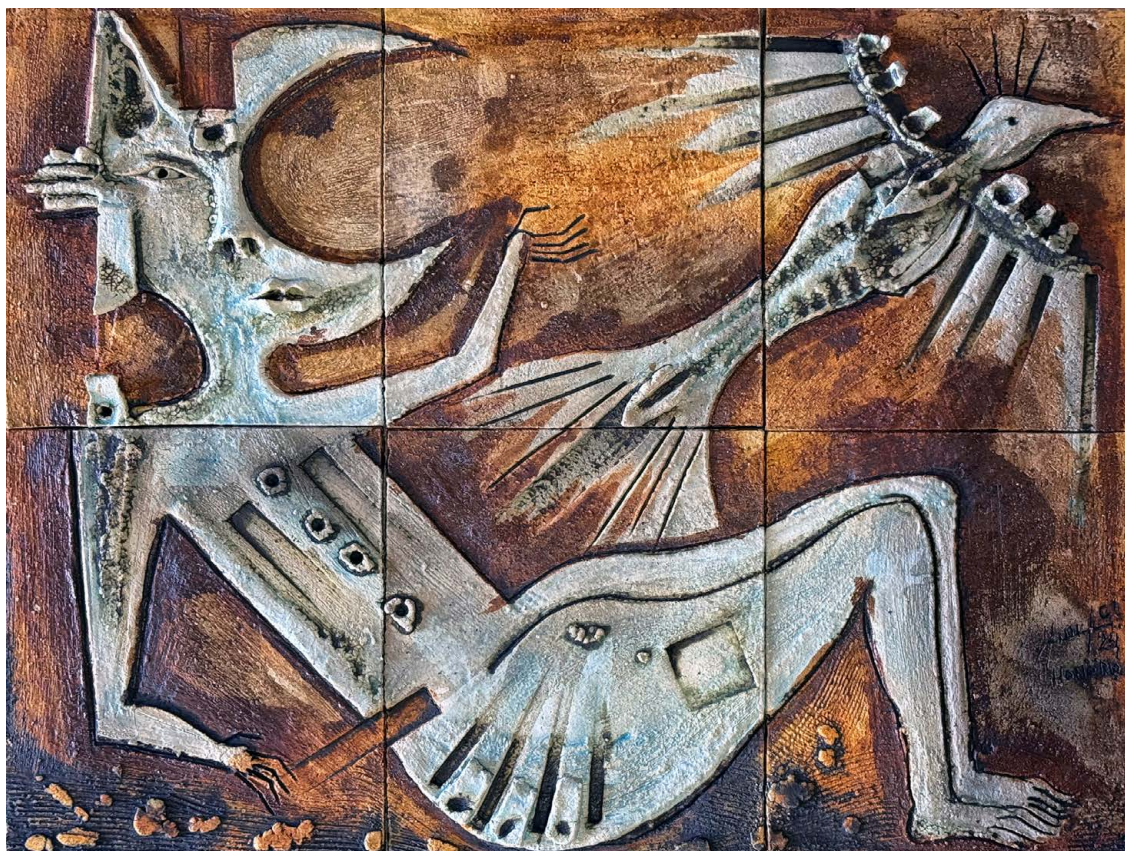
El desarrollo de nuevos tratamientos también se enfoca en el uso de inmunomoduladores, fármacos diseñados para regular la respuesta inmunitaria y así detener o prevenir el daño en los órganos diana. Sin embargo, muchos de estos agentes, como el igruratimod, aún se encuentran en fase de prueba (Tsang-A-Sjoe *et al.*, 2021).

Estos nuevos tratamientos, pese a sus buenos resultados en la clínica, presentan sus propios desafíos, como son efectos adversos y el desconocimiento sobre los tiempos de administración (Accapezzato *et al.*, 2023), además de ser costosos y poco accesibles para el público general.

Algunos estudios han analizado la asequibilidad de estos tratamientos en otros países, como Estados Unidos. Por ejemplo, tras la administración del belimumab, se reportó que los costos promedios totales, en general, fueron mayores durante

un semestre después del inicio del tratamiento en comparación con el periodo anterior a su administración. A pesar de ello, no se descarta que en un futuro se presenten a un precio más costeable (Bell *et al.*, 2020).

Otra gran esperanza de tratamiento es el trasplante de células troncales hematopoyéticas, también conocidas como células madre, que poseen una notable capacidad para generar y regenerar distintos tipos celulares. El enfoque consiste en eliminar tanto los linfocitos T y B como las células plasmáticas afectadas por el LES, y reemplazarlos por células normales, capaces de cumplir su función sin generar una respuesta inmunitaria exacerbada. Los resultados de estudios realizados con esta opción muestran que los pacientes que responden al tratamiento no desarrollan síntomas y presentan resultados negativos hacia anticuerpos ANA en sus estudios posteriores, un efecto que es difícil de lograr con la terapia convencional (Accapezzato *et al.*, 2023).



No obstante, algunas complicaciones del trasplante de células troncales hematopoyéticas pueden ser la mielosupresión, la enfermedad de obstrucción sinusoidal, así como la posibilidad de infecciones bacterianas, virales o fúngicas. A ello se suma la toxicidad en distintos órganos asociada al régimen preparativo con quimioterapia o radiación al que se somete al paciente para eliminar los linfocitos y células plasmáticas afectadas por LES (Khaddour *et al.*, 2023).

¿PUEDO PREVENIRLO?

Al ser una enfermedad multifactorial con alteraciones genéticas, no es posible prevenir la predisposición. Sin embargo, se pueden seguir medidas sencillas para evitar futuros brotes sintomáticos en los pacientes que ya tienen la enfermedad. Entre estas medidas se incluyen cumplir con el tratamiento farmacológico indicado por el especialista, limitar la exposición solar, usar bloqueador solar y ropa que

cubra la mayor parte del cuerpo en caso de exposición, mantener una dieta equilibrada y descansos adecuados, reducir el estrés tanto como sea posible y realizar ejercicio de manera rutinaria. En personas con LES se han asociado enfermedades del corazón e infecciones como causa de mortalidad; por ello, hay autores que entre las medidas preventivas incluyen chequeos médicos habituales, manejo controlado de hiperlipidemia o diabetes en caso de presentarlos, y esquemas de vacunación actualizados (Accapezzato *et al.*, 2023; Lazar *et al.*, 2023).

CONCLUSIONES

El lupus eritematoso sistémico, una enfermedad autoinmune e inflamatoria que afecta principalmente a mujeres, representa un desafío significativo tanto para quienes lo padecen como para quienes presentan la sintomatología y buscan un diagnóstico oportuno. Sin duda, un área de oportunidad es fomentar más investigaciones sobre la incidencia en nuestro país. Además, se requieren más estudios que



© Honorio Cruz. *Mujer tierra* 1. Cerámica de alta temperatura, 57 x 72 cm.

ahonden en la investigación de cómo se comportan en la población mexicana las nuevas alternativas terapéuticas, como los anticuerpos monoclonales. Finalmente, promover la difusión del conocimiento sobre esta afección es esencial para procurar tanto su comprensión a nivel nacional, como para facilitar un diagnóstico adecuado.

REFERENCIAS

- Accapezzato D, Caccavale R, Paroli MP *et al.* (2023). Advances in the Pathogenesis and Treatment of Systemic Lupus Erythematosus. *International Journal of Molecular Sciences* 24:6578.
- Aringer M, Costenbader K, Daikh D *et al.* (2019). 2019 European League Against Rheumatism/American College of Rheumatology Classification Criteria for Systemic Lupus Erythematosus. *Annals of Rheumatic Disease* 78:1151-1159.
- Barber MRW, Falasinnu T, Ramsey-Goldman R and Clarke AE (2023). The global epidemiology of SLE: narrowing the knowledge gaps. *Rheumatology (Oxford)* 62:i4-i9.
- Bell CF, Priest J, Stott-Miller M *et al.* (2020). Real-world treatment patterns, healthcare resource utilisation and costs in patients with systemic lupus erythematosus treated with belimumab: a retrospective analysis of claims data in the USA. *Lupus Science and Medicine* 7:e000357.
- Charras A, Smith E and Hedrich CM. (2021). Systemic Lupus Erythematosus in Children and Young People. *Current Rheumatology Reports* 23:20.
- Fundación de Lupus en América (2022). Datos y estadísticas sobre el lupus. Recuperado de: <https://www.lupus.org/es/resources/datos-y-estadisticas-sobre-el-lupus>.
- González-Jiménez D, Mejía-Bonilla S y Cruz-Fallas M (2021). Lupus eritematoso sistémico: enfoque general de la enfermedad. *Revista Médica Sinergia* 6:e630.
- Khaddour K, Hana CK, Mewawalla P (2023). Hematopoietic Stem Cell Transplantation. Treasure Island (FL): StatPearls Publishing.
- Kucy N, Kula P, Kotula A *et al.* (2024). Antinuclear Antibodies in Systemic Lupus Erythematosus –Their Complex Role and Clinical Significance in Diagnosis. *Quality in Sport*. 21:53250.
- Hernández-Ledesma AL, Martínez D, Fajardo-Brigido E *et al.* (2023). Lupus RGMX: Social and Clinical Characteristics and their Contribution to Quality of Life in a Mexican Cohort with SLE. *medRxiv preprint*: 1-35.
- Illescas-Montes R, Corona-Castro CC, Melguizo-Rodríguez L *et al.* (2019). Infectious processes and systemic lupus erythematosus. *Immunology*. 158:153-60.
- Lazar S and Kahlenberg JM (2023). Systemic Lupus Erythematosus: New Diagnostic and Therapeutic Approaches. *Annual Review of Medicine* 74:339-352.



© Honorio Cruz. Mural de cerámica de alta temperatura, 72 × 52 cm.

Pisetsky DS and Lipsky PE (2020). New insights into the role of anti-nuclear antibodies in systemic lupus erythematosus. *Nature Reviews Rheumatology* 16:565-579.

Schilirò D, Silvagni E, Ciribè B *et al.* (2024). Systemic lupus erythematosus: one year in review 2024. *Clinical and Experimental Rheumatology* 42:583-592.

Sheriff A, Gaip US, Voll RE *et al.* (2004). Apoptosis and systemic lupus erythematosus. *Rheumatic Diseases Clinics of North America* 30:505-527.

Tsang-A-Sjoe MWP and Bultink IEM (2021). New developments in systemic lupus erythematosus. *Rheumatology* 60:vi21-vi28.

Yu H, Nagafuchi Y and Fujio K (2021). Clinical and Immunological Biomarkers for Systemic Lupus Erythematosus. *Biomolecules* 11:927.

Iara Yazmín Hernández-Fernández
Alejandra Tavera-Tapia
Facultad de Medicina Dr. Alberto Romo Caballero
Universidad Autónoma de Tamaulipas
atavertapia@gmail.com

¿Es el cáncer una enfermedad prevenible?

Paola Maycotte González

El cáncer es una enfermedad de importancia nacional y mundial. Las estadísticas recientes calculan que 1 de cada 5 personas desarrollará cáncer a lo largo de su vida. Además, de manera más alarmante, se calcula que 1 de cada 9 hombres y 1 de cada 12 mujeres morirán por causa de esta enfermedad (Bray *et al.*, 2024). Esta enfermedad no es nueva, existen reportes en papiros egipcios (2,500 A.C.) y en historias griegas sobre masas observadas en diversas partes del cuerpo que sugieren la existencia de pacientes con cáncer. Sin embargo, esta enfermedad se ha vuelto más común en nuestros tiempos.

Una de las principales causas del incremento en los casos de cáncer se relaciona con el aumento en la esperanza de vida. Los avances tecnológicos y médicos han reducido significativamente las principales causas de mortalidad, lo que ha llevado a un incremento en la expectativa de vida, que pasó de 32 años en 1900 a 71 años en 2021 (Our World in Data, 2024). En 2022, en México, la esperanza de vida promedio se ubicó en 75.5 años, con variaciones que iban desde 76.8 en la CDMX hasta 73.6 años en Guerrero, pasando por 75.1 años en Puebla (INEGI, 2023). Esto ha provocado una mayor prevalencia de enfermedades asociadas al envejecimiento, como el Alzheimer y el cáncer.

Por otro lado, el incremento en la exposición a factores de riesgo vinculados a nuestro estilo de vida, también

contribuye significativamente al aumento en los casos de cáncer en diversas partes del cuerpo. Por lo tanto, ¿qué podemos hacer para disminuir este riesgo y mejorar nuestra calidad de vida?

¿QUÉ ES EL CÁNCER?

El cáncer es una enfermedad causada por una proliferación descontrolada de las células del cuerpo. En etapas avanzadas de la enfermedad, las células cancerosas pueden migrar por el torrente sanguíneo y establecerse en sitios secundarios llamados metástasis. Estas últimas son la principal causa de muerte por cáncer. Sin embargo, esto no quiere decir que el cáncer sea siempre una enfermedad mortal. Se calcula que el tiempo que transcurre desde la aparición de una célula cancerosa o desde la exposición a un carcinógeno, hasta que se establece una lesión visible, varía entre años y décadas. Por lo tanto, los médicos tienen un periodo amplio de tiempo para detectar y tratar lesiones tempranas que, en su mayoría, son curables.

¿QUÉ CAUSA EL CÁNCER?

El cáncer se considera una enfermedad de caos, un quiebre en el orden biológico existente en el cuerpo. En efecto, las células del cuerpo tienen mecanismos de control de la proliferación celular. Normalmente, las células se dividen solo en el lugar y tiempo adecuados. Por ejemplo, cuando el organismo se está formando se necesitan células para formar los tejidos. También se necesitan células cuando el sistema inmunitario debe activarse para defendernos de alguna infección, o cuando se requiere reparar heridas y reemplazar células dañadas con nuevas. Para asegurar que las células se dividan adecuadamente, el cuerpo produce factores de crecimiento específicamente en el sitio donde esta proliferación es necesaria. Las células responden a estos factores entrando al ciclo celular y dividiéndose, pero no de manera indefinida. Cuando las células “sienten” la proximidad de otras

a través de sus receptores de membrana, que se unen a los receptores de células vecinas o a la matriz extracelular, inhiben su proliferación.

Las células también pueden regularse de manera negativa, como las células del sistema inmunitario, que deben inactivarse mediante la señalización de células regulatorias después de una respuesta inmune. Así, el cuerpo se asegura de mantener solo el número de células necesario para cumplir con sus funciones. Cuando una célula pierde estos mecanismos de control debido a una mutación o a cambios en los mecanismos de regulación génica, puede proliferar incluso en ausencia de factores de crecimiento, o puede desactivar los mecanismos que le impiden entrar en el ciclo celular, lo que provoca que se divida sin control.

Los genes que regulan la proliferación celular y que se activan en cáncer se denominan protooncogenes y están presentes en todas las células de nuestro cuerpo, pero cuando estos se activan permanentemente y pierden su regulación por los mecanismos de control, se transforman en oncogenes, los cuales están activos en la mayoría de los casos de cáncer.

El cuerpo también posee mecanismos para defenderse contra mutaciones espontáneas y contra células o lesiones precancerosas. Existen puntos de control en todas nuestras células que pueden enviarlas a apoptosis, un proceso de muerte celular programada; es decir, una forma de suicidio celular que se activa en caso de existir mutaciones o proliferación descontrolada. Estos mecanismos de control, o los genes que codifican para las proteínas que los regulan, y que se conocen como genes supresores de tumores, se encuentran inactivados en cáncer también como consecuencia de mutaciones o por alteraciones regulatorias.

Los genes supresores de tumores más frecuentemente inactivados en el cáncer son p53 (nombrado así por el peso molecular de su proteína, de 53 kDa, y conocido como el “guardián del genoma”), y Rb (o retinoblastoma, denominado así por haber sido descubierto en casos de retinoblastoma, un tipo de cáncer que ocurre en la retina; es conocido como el “guardián del ciclo celular”).

Factores no modificables	Factores modificables demostrados	Factores modificables sugeridos
• Edad • Herencia genética importante en algunos tipos de cáncer como cáncer de mama, ovario o cáncer colorrectal familiar. • Recomendación: mantener una vigilancia médica adecuada.	• Exposición a carcinógenos: - Químicos, como el benceno, asbestos, productos de la combustión y tabaco - Radiación • Infecciones • Inmunosupresión (como en enfermedades inmunitarias o al recibir un trasplante) • Recomendación: reducir exposición a carcinógenos, no fumar, vacunación contra agentes infecciosos.	• Dieta • Consumo de alcohol • Actividad física • Obesidad • Diabetes • Factores de riesgo ambientales • Recomendación: llevar un estilo de vida saludable, consumir frutas y verduras frescas, hacer ejercicio, no tomar alcohol o consumirlo con moderación.

Tabla 1. Factores de riesgo asociados al desarrollo de cáncer (NCI y NIH, 2023).

Existen también células especializadas del sistema inmunitario, como las células *natural killer* (NK) o las células T citotóxicas que, como su nombre lo indica, se encargan de “matar” o inducir apoptosis en células disfuncionales o alteradas que podrían convertirse en células cancerosas.

Por lo tanto, para que una célula se vuelva cancerosa, debe desactivar o evadir mecanismos supresores de tumores celulares y del sistema inmunitario, así como activar las funciones de uno o varios oncogenes. La carcinogénesis, o formación del cáncer, es un proceso multietapa que no ocurre de manera repentina, sino que se desarrolla a lo largo del tiempo. Al vivir más tiempo y al perder funciones importantes del sistema inmunitario mientras envejecemos, acumulamos alteraciones funcionales en el cuerpo que, en ciertos casos, pueden dar lugar a una célula cancerosa.

FACTORES DE RIESGO

El hecho de que el cáncer esté ligado al envejecimiento sugiere que no hay mucho que hacer al respecto y que solo nos quedaría esperar a desarrollar cáncer mientras envejecemos. Sin embargo, sabemos que no todas las personas adultas mayores desarrollan cáncer a lo largo de su vida. Entonces, ¿cómo explicar esta paradoja?

Como ya se mencionó, los cambios asociados a la carcinogénesis se dan a lo largo de mucho tiempo y constan de una serie de pasos. Por ello, aunque

algunos casos de cáncer pueden considerarse accidentes aleatorios de la naturaleza y presentan una incidencia similar en todas las poblaciones, incluso en niños o jóvenes, otros están vinculados a la exposición a factores de riesgo ambientales o de estilo de vida que es posible evitar. Además, se han identificado factores preventivos que se asocian con una menor incidencia de la enfermedad. La Tabla 1 muestra los factores de riesgo más importantes que han sido asociados al desarrollo de cáncer.

¿CÓMO PREVENIR EL CÁNCER?

Si bien no se puede evitar por completo la posibilidad de desarrollar cáncer, sí podemos crear conciencia en caso de tener predisposición al desarrollo de esta enfermedad; o bien, identificar posibles cambios en nuestro estilo de vida que nos ayuden a disminuir la probabilidad de desarrollarlo. A continuación, se mencionan los factores de riesgo presentados en la Tabla 1 y recomendaciones sobre cada uno.

Los factores de riesgo no modificables son la edad y la herencia genética. Si bien no podemos evitar envejecer ni podemos cambiar nuestros genes, sí podemos acudir a visitas médicas de rutina para vigilancia. Por ejemplo, en México, se recomienda a las mujeres mayores de 25 años realizarse una autoexploración mamaria mensual, y a las mujeres de 40 a 65 años una mastografía (radiografía a

las mamas) cada 2 años, con el fin de detectar de manera temprana cualquier masa extraña en las mamas, el tejido más frecuentemente afectado por cáncer en mujeres (IMSS, 2021). También se recomienda que los hombres, a partir de los 45 años, o 40 si tienen antecedentes familiares, se sometan a pruebas para la detección del cáncer de próstata (Secretaría de Salud, 2021).

En el caso de cáncer colorrectal, un tipo de cáncer cuya incidencia ha aumentado en los últimos años, se recomienda realizar pruebas de detección temprana en adultos mayores de 50 años, o antes para la población con mayor riesgo (IMSS). Todas estas pruebas son indicadas por el médico familiar, por lo que es importante asistir a visitas regulares e informar a nuestro médico sobre antecedentes familiares de cáncer, para que pueda recomendar medidas específicas. Entonces, si bien no podemos evitar los factores de riesgo no modificables, sí podemos vigilarlos y asistir a consultas médicas regulares para que, en caso de desarrollar algún tipo de cáncer, este se detecte en etapas tempranas y tenga un tratamiento oportuno.

Los factores de riesgo modificables son aquellos en los que podemos incidir para disminuir nuestro riesgo de desarrollar cáncer e incluyen exposición a carcinógenos, infecciones e inmunosupresión.

En cuanto a la exposición a carcinógenos, dos carcinógenos cuya asociación con el desarrollo del cáncer está bien establecida son el tabaco y la radiación UV del sol. Fumar tabaco se ha relacionado con diversos tipos de cáncer, incluyendo un tipo de leucemia, cáncer de vejiga, cervical, de esófago, riñón, de la cavidad oral, páncreas, estómago y, por supuesto, de pulmón. La exposición al humo de cigarro de segunda mano en los llamados fumadores pasivos, se asocia también con el riesgo de desarrollar cáncer y otras enfermedades. En algunos países, como Estados Unidos, se calcula que el tabaco es causante del 30 % de todas las muertes por cáncer (NCI y NIH, 2023). De manera importante, no fumar o dejar de fumar disminuye el riesgo de morir por cáncer en general. Por lo

tanto, es crucial evitar la exposición propia y de otras personas al humo del tabaco para reducir el riesgo de padecer cáncer en diversos tejidos.

La radiación UV del sol es la causa principal de cáncer de piel, por lo que es fundamental reducir la exposición directa al sol, proteger la piel con ropa adecuada y utilizar bloqueador solar cuando sea necesario exponerse. Además, la exposición continua a los rayos X u otras pruebas de diagnóstico que involucren radiación puede contribuir al desarrollo de cáncer en algunos tejidos. Aunque una o pocas radiografías generalmente no tienen efectos significativos, la exposición continua a la radiación sí puede incrementar el riesgo de desarrollar leucemia, cáncer de tiroides, de mama, mieloma, cáncer de pulmón, estómago, colon, esófago, vejiga, ovario y cáncer en niños y adolescentes (NCI y NIH, 2023).

Otro factor de riesgo modificable es la exposición a infecciones, particularmente porque ciertos tipos de virus y bacterias predisponen al desarrollo de cáncer. Como ejemplo tenemos al virus del papiloma humano (VPH), que predispone a cáncer de cérvix, vagina, pene, ano y orofaringe; los virus de la hepatitis B y C, que predisponen al cáncer de hígado; el virus de Epstein-Barr, que aumenta el riesgo de linfoma de Burkitt, un tipo de cáncer del sistema linfático; y la bacteria *Helicobacter pylori* que incrementa el riesgo de cáncer de estómago. Actualmente existen vacunas para algunos de estos virus, como el de la hepatitis B y el VPH, por lo que es importante vacunarse para disminuir el riesgo de padecer los tipos de cáncer a los que están asociados. En México, la vacuna contra el VPH se recomienda para niñas de quinto grado de primaria (11 años de edad), por no haber iniciado su vida sexual y no haber estado expuestas a la infección con este virus (Gobierno de México, 2015). En otros países se recomienda también la vacunación en niños, ya que el VPH también causa cáncer en hombres.

Los medicamentos inmunosupresores se han asociado a un mayor riesgo de cáncer ya que evitan la función vigilante o supresora de tumores del sistema inmunitario y favorecen las infecciones. Hay poco que se pueda hacer con respecto a este tipo de medicamentos, ya que se recomiendan en personas

que han recibido trasplantes; en estos casos es importante estar bajo vigilancia médica continua.

Otros factores de riesgo cuya asociación no es completamente clara incluyen la dieta, el consumo de alcohol, la falta de actividad física, la obesidad, la diabetes y factores ambientales. Aunque la contribución de cada uno de estos factores no está bien definida, un estudio calculó que, durante 2019, el 40 % de todos los casos de cáncer y el 44 % de todas las muertes por esta enfermedad pudieron evitarse si se hubieran evitado factores de riesgo modificables, incluyendo los sugeridos y los demostrados (Islami *et al.*, 2024). Por lo tanto, se recomienda mantener un peso adecuado, alimentarse con alimentos saludables y mantenerse activo.

Tener sobrepeso u obesidad, así como llevar una vida sedentaria, aumenta el riesgo de desarrollar 15 tipos distintos de cáncer, incluyendo cáncer de cabeza y cuello, tiroides, pulmón, hepático, vejiga, ovario, endometrio, mama posmenopáusico, estómago, páncreas, riñón, colorrectal, próstata, mieloma múltiple y meningioma.

Se recomienda realizar actividad física aeróbica durante 150 minutos semanales a intensidad moderada o 75 minutos a intensidad vigorosa, combinada con actividad de fuerza dos o más veces a la semana. En el caso de adolescentes (menores de 18 años), se recomienda 60 minutos diarios de actividad aeróbica y ejercicios de fuerza tres días a la semana. Las actividades aeróbicas moderadas para mayores de 18 años incluyen caminar, podar el césped o practicar aerobics, mientras que las vigorosas abarcan correr, nadar o andar en bicicleta (AACR, 2023). Las actividades de fuerza incluyen actividades como yoga, artes marciales y pesas. Un estudio también reveló que las personas que realizan actividad aeróbica de manera regular tienen menos probabilidad de desarrollar cáncer metastásico. Aunque la actividad física no previene completamente el desarrollo de cáncer, puede mejorar el pronóstico en caso de desarrollar esta enfermedad.

Con respecto a la alimentación, una dieta inadecuada, caracterizada por el consumo de alimentos procesados y la ausencia de frutas y vegetales frescos, se asocia con el 5 % de los casos de cáncer,

particularmente el colorrectal. Los alimentos procesados suelen contener altos niveles de azúcar, sal, grasa, conservadores y aditivos. La dieta debe incluir frutas y vegetales frescos, nueces, granos enteros y pescado. Además, el consumo del alcohol está asociado con más de 200 enfermedades distintas y aumenta el riesgo de desarrollar algunos tipos de cáncer, como los de cabeza y cuello, esófago, mama, colorrectal, hígado y estómago. Las recomendaciones son las siguientes: no beber es mejor que beber, pero si se bebe, debe hacerse en moderación. Un consumo moderado de alcohol se considera menos de una bebida al día en mujeres y menos de dos bebidas diarias en hombres adultos (AACR, 2023).

Las enfermedades metabólicas, como la diabetes tipo 2, se han relacionado con varios tipos de cáncer, entre ellos el hepático, de páncreas, endometrio, colorrectal, de mama y de vejiga. Se ha propuesto que esta susceptibilidad se debe a factores propios de la enfermedad, como los altos niveles de insulina e inflamación. Por lo tanto, las personas con diabetes deben mantener un control adecuado de su condición y una vigilancia médica regular para evaluar el riesgo de desarrollar cáncer.

Finalmente, es fundamental evitar, o al menos minimizar, la exposición a contaminantes o carcinógenos asociados a la profesión. Ejemplos de estos son el arsénico, el asbesto, la radiación y el plomo (AACR, 2023).

El conocimiento de los factores de riesgo asociados al cáncer ha permitido a los gobiernos establecer políticas públicas encaminadas a su prevención. Destacan los convenios internacionales para el control del tabaco que regulan su publicidad, promoción, medidas fiscales y etiquetado, además de medidas para la prevención primaria como la vacunación o el asesoramiento médico para evitar comportamientos de alto riesgo que promuevan la aparición de la enfermedad. Será importante también asegurar el acceso equitativo de toda la población a los servicios de salud, de manera que las medidas institucionales para la prevención la enfermedad y su detección temprana nos beneficien a todos.



© **Honorio Cruz**. Gallo 4. Cerámica de alta temperatura, 106 × 72 × 42 cm.

Como mensaje final, es importante mencionar que tener una vida saludable, comer sano, hacer ejercicio y evitar exponernos a carcinógenos como el tabaco y la luz UV son hábitos que nos ayudarán a mantener una buena salud y disminuir nuestra predisposición a desarrollar muchas enfermedades comunes en la actualidad, entre ellas, el cáncer.

REFERENCIAS

American Association for Cancer Research, AACR (2023). *Reducing the Risk of Cancer Development*. Recuperado de: <https://cancerprogressreport.aacr.org/progress/cpr23-contents/cpr23-reducing-the-risk-of-cancer-development/>.

Bray F, Laversanne M, Sung H, Ferlay J, Siegel RL, Soerjomataram I and Jemal A (2024). Global cancer statistics 2022: GLOBOCAN estimates of incidence and mortality worldwide for 36 cancers in 185 countries. *CA Cancer J Clin* 74(3):229-263. DOI: <https://doi.org/10.3322/caac.21834>.

Gobierno de México (2015). *Vacunas contra el Virus del papiloma Humano (VPH)*. Recuperado de: <https://www.gob.mx/salud/articulos/vacunas-contr-el-virus-del-papiloma-humano-vph>.

Instituto Nacional de Estadística y Geografía, INEGI (2023). Cuéntame de México / Población / Esperanza de vida. Recuperado de: <https://cuentame.inegi.org.mx/poblacion/esperanza.aspx?tema=P>.

Instituto Mexicano del Seguro Social, Dirección de Prestaciones Médicas. *Guía de Referencia Rápida. Detección Oportuna y Diagnóstico de Cáncer de Colon y Recto no Hereditario en Adultos en Primero, Segundo y Tercer Nivel de Atención*. Recuperado de: <https://www.imss.gob.mx/sites/all/statics/guiasclinicas/145GRR.pdf>.

Instituto Mexicano del Seguro Social, IMSS, Gobierno de México (2021). *Guía Técnica para la Atención Integral del Cáncer de Mama*.

Islami F, Goding Sauer A, Miller KD *et al.* (2024). Proportion and number of cancer cases and deaths attributable to potentially modifiable risk factors in the United States, 2019. *CA Cancer J Clin*. DOI: <https://doi.org/10.3322/caac.21858>.

National Cancer Institute, NCI and National Institutes of Health, NIH (2023). Risk Factors for Cancer. Recuperado de: <https://www.cancer.gov/about-cancer/causes-prevention/risk>.

Our World in Data. University of Oxford, Oxford Martin School and Lab GCD. Recuperado de: <https://ourworldindata.org>.

Secretaría de Salud, Gobierno de México (2021). Prueba oportuna de antígenos favorece la detección del cáncer de próstata. *Blog*. Recuperado de: <https://www.gob.mx/salud/es/articulos/prueba-oportuna-de-antigenos-favorece-la-deteccion-del-cancer-de-prostata?idiom=es>.

Paola Maycotte González
Centro de Investigación Biomédica de Oriente
Instituto Mexicano del Seguro Social
paola.maycotte@imss.gob.mx

Vesículas extracelulares: ¿caballos de Troya para los virus?

Itzel Alejandra Rivera Ruz
Moisés León Juárez

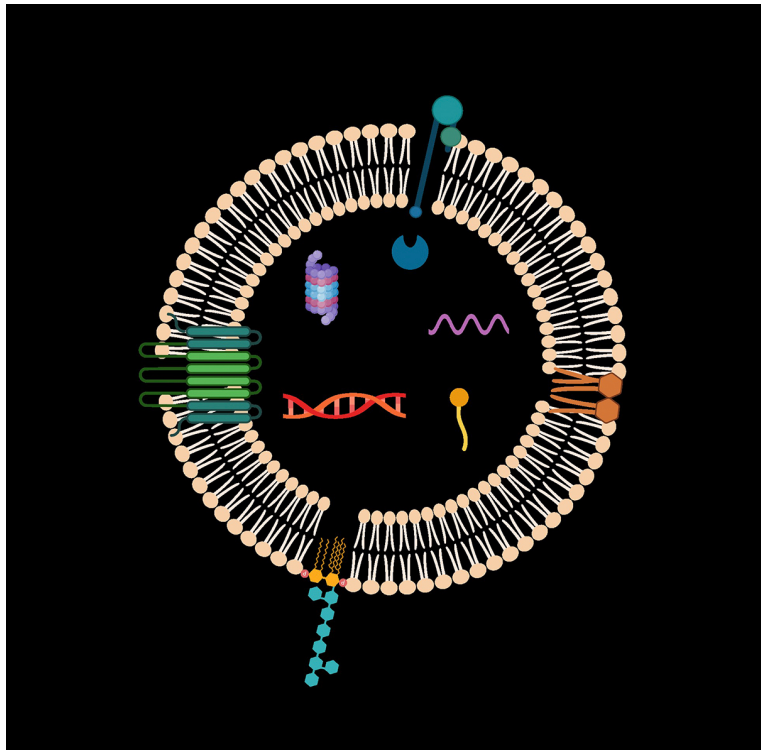
En el microambiente celular existe una comunicación entre células por medio de la cual se transportan proteínas, lípidos y ácidos nucleicos para activar o inactivar diversas vías de señalización. Las células tienen la capacidad de empaquetar estas moléculas en vesículas que después serán secretadas al exterior de las células.

Este método de comunicación es empleado por las células para evitar que las moléculas sean degradadas y no activar la respuesta del sistema inmunitario hacia ellas, teniendo como resultado una comunicación eficiente entre células sin importar si es a corta o a larga distancia (Maravillas-Montero y Martínez-Cortés, 2017; Tabata *et al.*, 2016).

Las vesículas extracelulares (EVs) se componen de una estructura membranosa rodeada por una bicapa lipídica y una composición de proteínas transmembrana que puede variar según el tipo celular de origen, el estado fisiológico de la célula y las condiciones ambientales. Estos componentes hacen que las EVs sean estructuras versátiles y mediadoras de la comunicación intercelular (Tabata *et al.*, 2016; Yates *et al.*, 2022).

Existen clasificaciones de estas vesículas según su tamaño (grandes > 200 nm y pequeñas < 200 nm), origen y biogénesis. Un grupo principal de EVs lo constituyen las vesículas apoptóticas (100-5,000 nm), que se generan

Figura 1. Estructura básica de un exosoma en donde se puede observar su morfología esférica conformada por una membrana compuesta por diversos tipos de lípidos como colesterol, ceramidas y fosfatidilserina. Además, contiene proteínas transmembrana que le permiten interactuar con el sistema inmunitario, así como proteínas que le ayudan a interactuar con las células a las que van dirigidas. En cuanto a su contenido, puede transportar diversas moléculas biológicas como enzimas, proteínas, factores de transcripción e incluso material genético (Tabata *et al.*, 2016).



de la gemación (proceso en el que la célula forma vesículas pequeñas o cuerpos apoptóticos derivados de su membrana, que contienen fragmentos de material celular que serán eliminados de manera ordenada) de células que están en un proceso de muerte celular.

Otro de ellos está constituido por los ectosomas (30-150 nm), que son pequeñas vesículas heterogéneas generadas por gemación de la membrana plasmática en una variedad de tipos celulares. Por último, podemos mencionar a los exosomas (30-120 nm), que se generan a partir de la segmentación interna de los compartimentos endosómicos, y tienen la capacidad de fusionarse con la membrana plasmática para poder salir y liberarse al medio extracelular (Arroyo y Zazueta, 2021; Jeppesen *et al.*, 2023).

EXOSOMAS

Este tipo de EVs es uno de los más estudiados en los últimos años, entre otras razones porque, según

el tipo de molécula que se haya introducido en ellas, se puede producir un cambio en la célula diana y, por lo tanto, en el microambiente.

La formación de los exosomas es un proceso celular complejo que comienza con la biogénesis de endosomas multivesiculares (MVB), que se originan a partir de las membranas endosómicas que contienen moléculas internalizadas durante la endocitosis. A medida que estos endosomas evolucionan hacia MVB, se forman en su interior vesículas más pequeñas que contienen diversos cargamentos biológicos (proteínas, lípidos y ácidos nucleicos; Figura 1). Posteriormente, los MVB pueden seguir dos destinos: fusionarse con otros compartimentos celulares para la degradación de su contenido, o fusionarse con la membrana plasmática para salir al medio extracelular (Arroyo y Zazueta, 2021; Fordjour *et al.*, 2022; Jeppesen *et al.*, 2023).

VIRUS Y SUS ESTRATEGIAS DE INFECCIÓN

Los virus son entidades microscópicas que se componen de proteínas y material genético (ADN o ARN);

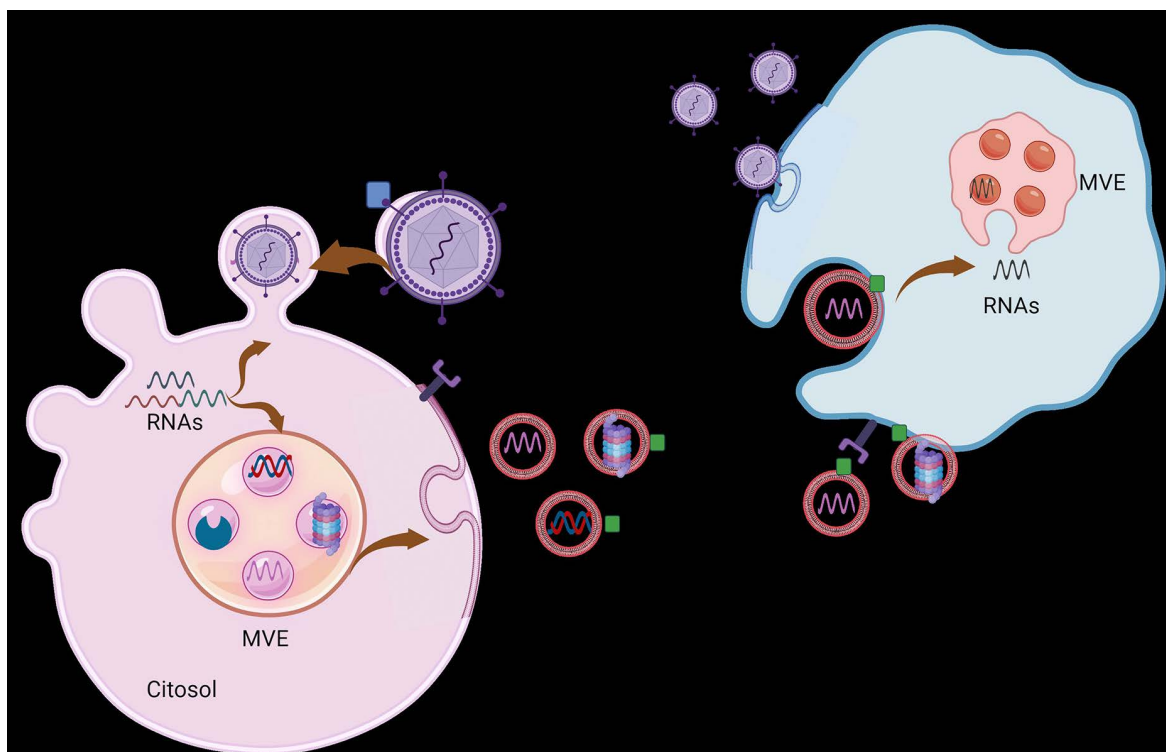


Figura 2. Mecanismo de diseminación de exosomas liberados por una célula infectada hacia una célula blanco. Los exosomas que contienen partículas virales son secretados por la célula infectada y transportados a través del medio extracelular. Estos exosomas interactúan con la membrana de la célula objetivo, facilitando la transferencia de las partículas virales sin la necesidad de que el virus completo participe. Este proceso contribuye a la propagación del virus y a la evasión del sistema inmunitario del hospedero. Adaptado de Safadi *et al.* (2013).

se caracterizan por actuar como un tipo de parásito obligado ya que, al carecer de una maquinaria metabólica y replicativa propia, necesitan infectar células hospederas para poder reproducirse y completar su ciclo de vida (Yates *et al.*, 2022).

A lo largo del tiempo, los virus han desarrollado una gran variedad de estrategias para infiltrarse y aprovechar las maquinarias celulares, lo que resulta en su propagación. La facultad de un virus para infectar exitosamente a su hospedero depende en gran medida de sus estrategias de entrada y replicación, así como de su capacidad de evadir al sistema inmunitario.

Algunas de las estrategias que suelen utilizar son: 1) la entrada a la célula hospedera por medio de receptores específicos; 2) su variación genética, para dificultar la detección por el sistema inmunitario; 3) la supresión de la respuesta inmunitaria mediante su interferencia con componentes clave del sistema de defensa celular; 4) por medio de un estado de latencia, ya que algunos virus pueden permanecer inactivos en la célula hospedera durante periodos

prolongados, en espera del mejor momento para reactivarse; 5) utilizando la llamada transferencia horizontal, por medio de la cual los virus pueden aprovecharse de vectores como insectos u otros animales para transmitirse entre hospederos (Fordjour *et al.*, 2022).

Sin embargo, recientes investigaciones han descubierto que algunos virus parecen tener un mecanismo de infección diferente a los ya conocidos, y es por medio de las vesículas extracelulares, las cuales parecen ser el caballo de Troya perfecto para infectar células tanto de tejidos cercanos como lejanos y, al mismo tiempo, evadir el sistema inmunitario.

Esto añade un nivel adicional de complejidad a la comprensión sobre los virus y ha abierto nuevas vías para profundizar en la investigación antiviral y el desarrollo de terapias específicas (Kerviel *et al.*, 2021; Maravillas-Montero y Martínez-Cortés, 2017; Yates *et al.*, 2022).

¿SON LOS EXOSOMAS CABALLOS DE TROYA?

En la búsqueda por comprender las interacciones que existen entre los virus y sus hospederos, se ha realizado un fascinante hallazgo: el empleo de exosomas como medio de transporte estratégico para promover la infección viral. Este fenómeno sigue siendo objeto de intensa investigación, ya que ha proporcionado una visión más amplia sobre cómo los virus aprovechan las vesículas extracelulares para optimizar su propagación y supervivencia (Lee y Shin, 2023; Safadi *et al.*, 2023; Tabata *et al.*, 2016).

Investigaciones recientes han mostrado que las células C6/36 de mosquitos *Aedes Albopictus* que son infectadas con el virus de Zika, tienen la capacidad de liberar exosomas. Se ha demostrado, además, que estas vesículas contienen ARN y proteínas virales. Este hallazgo no solo sugiere un papel activo de los exosomas con carga de moléculas virales, sino que también apunta a una función en la propagación del virus dentro del mosquito (Lee y Shin, 2023; Safadi *et al.*, 2023; Yates *et al.*, 2022).

Otro descubrimiento asombroso es que algunos flavivirus, como el del dengue y el zika, tienen la capacidad de asociar diversas proteínas, como la proteína no estructural NS1, con los exosomas de líneas celulares permisivas a la infección, lo que plantea preguntas cruciales sobre el papel de los exosomas en la gravedad de la patogénesis y en la respuesta inmunitaria durante las infecciones por estos virus (Lee y Shin, 2023; Safadi *et al.*, 2023; Yates *et al.*, 2022).

Incluso se ha sugerido que, en virus respiratorios como el de la influenza y los coronavirus, los exosomas pueden jugar un papel clave como medio de transmisión intercelular y en la evasión del sistema inmunitario. Además, se ha demostrado que algunos virus manipulan la biogénesis de los exosomas; esto destaca la capacidad del patógeno para modificar la composición, el tamaño y la cantidad de las vesículas con tal de facilitar el transporte de componentes virales (Lee y Shin, 2023; Safadi *et al.*, 2023; Yates *et al.*, 2022).

Estos antecedentes subrayan la versatilidad de los virus para adaptarse y aprovechar las vesículas

extracelulares, particularmente los exosomas, como parte integral de sus estrategias de infección. Una posible estrategia que falta por evaluar, es la posibilidad de que los exosomas con elementos virales puedan ser un sistema para evadir la respuesta inmunitaria del hospedero, al poder camuflajearse con estas vesículas celulares. Este intrigante campo de investigación promete proporcionar conocimientos esenciales para el desarrollo de enfoques antivirales más precisos y eficaces, que nos ayuden a cerrar el paso a los caballos de Troya virales (Figura 2) (Lee y Shin, 2023; Safadi *et al.*, 2023, Yates *et al.*, 2022).

R E F E R E N C I A S

- Arroyo M (2021). Trascendencia de los exosomas en la cardiología: heraldos de la cardioprotección. *Archivos de Cardiología de México* 91(1):105-113.
- Fordjour F (2022). A shared, stochastic pathway mediates exosome protein budding along plasma and endosome membranes. *Journal of Biological Chemistry* 298(10):102394.
- Jeppesen D (2023). Extracellular vesicles and nanoparticles: emerging complexities. *Trends Cell Biol.* 33(8):667-681.
- Kerviel L (2021). A New Infectious Unit: Extracellular Vesicles Carrying Virus Populations. *Annual Review of Cell and Developmental Biology* 37:171-197.
- Lee J (2023). Zika virus modulates mitochondrial dynamics, mitophagy, and mitochondria-derived vesicles to facilitate viral replication in trophoblast cells. *Frontiers in Immunology* 14:1203645.
- Maravillas M (2017). Los exosomas de las células presentadoras de antígeno y su papel en la regulación de las respuestas inmunológicas. *Revista Alergia México* 64(4):463-476.
- Safadi D (2023). Extracellular Vesicles Are Conveyors of the NS1 Toxin during Dengue Virus and Zika Virus Infection. *Viruses* 15(2):364.
- Tabata T (2016). Zika Virus Targets Different Primary Human Placental Cells, Suggesting Two Routes for Vertical Transmission. *Cell Host & Microbe* 20(2):155-66.
- Yates A (2022). In sickness and in health: The functional role of extracellular vesicles in physiology and pathology in vivo. *Journal of Extracellular Vesicles* 11(1):e12190.

Itzel Alejandra Rivera Ruz
Posgrado en Biología Experimental
Universidad Autónoma Metropolitana

Moisés León Juárez
Instituto Nacional de Perinatología
moisesleoninper@gmail.com

Honorio Cruz y los karilunios: una entrevista con el artista*

Enrique Soto



© Honorio Cruz. Detalle de mural.
Cerámica de alta temperatura.

Honorio Cruz es un ceramista oriundo de Santiago Suchilquitongo, Oaxaca. Se inició desde joven en el trabajo de carpintería, en el que ya mostró una cierta creatividad, pero no fue hasta que entró a trabajar como ayudante en el taller del maestro ceramista Alejandro Santiago cuando se inició en el oficio. Con el maestro Alejandro estuvo alrededor de cinco años (ca. 2005 a 2010), periodo en que aprendió la técnica y se empezó a capacitar, además, con diferentes maestros, como Claudio Gerónimo, Adán Paredes y Katy McFadden. Entonces, dice Honorio, “fue como me empecé a nutrir del conocimiento de la cerámica”.

¿Qué estudios alcanzaste?

Aquí, en el pueblo, estudié la primaria, la secundaria, me quedé en el segundo semestre del CETIS.

¿Y luego?

Ahí, por cuestiones económicas, ya no pude continuar y fue cuando me metí al curso de carpintería, ¿no?, porque necesitaba un oficio para vivir. Y ya, terminando ese año y medio de carpintería, fue cuando me enteré del proyecto del maestro Alejandro Santiago.

Honorio, habiéndose desarrollado como ceramista en 2017, realizó una estancia de tres meses en Portland, Oregón, donde trabaja una técnica de mucho más alta temperatura que la que utilizan los artesanos en los hornos en México.



© Honorio Cruz. Honorio Cruz en taller el Tecolote.



© Honorio Cruz. *Ser de Luna 7*.
Cerámica de alta temperatura, 117 × 45 × 17 cm.



© Honorio Cruz. *El guardián del hogar IV*.
Cerámica de alta temperatura, 190 × 60 × 29 cm.

¿Tienes algunas de esas piezas o has realizado ese tipo de piezas aquí?

Sí, pero estas ya se vendieron también, porque es una técnica muy bonita, donde el acabado lo da la ceniza, el humo y la alta temperatura; entonces son unos vidriados muy atractivos, por eso se fueron muy rápido. El año pasado, estuve dos meses con otros maestros que hacen cerámica, ahí en Portland. Ahora está programado para el mes de marzo de este 2025, ir a cocer unas piezas allá, participar en más demostraciones y compartir ahí más conocimientos. De hecho, en la estancia previa tuve la oportunidad de exponer en el consulado de México, junto con otras dos compañeras; también expusimos en una escuela de oficios que enseña cerámica y otros oficios, y luego estuvimos en una galería llamada Eutektic.

Me comentaron en la galería Villafañá sobre una pieza tuya que se envió a Nueva York. ¿Tienes ya muchos clientes en Europa, en Estados Unidos?

El problema de los envíos a Estados Unidos es la mayor complejidad que tiene la cerámica, su peso, su volumen... y la delicadeza de las piezas; entonces a mucha gente que viene le llaman muchísimo la atención.

Pero nada más de pensar en el envío se complica. El costo es de unos 1,000 dólares o algo así...

Sí, eso es costoso...

Mucho más caro que la pieza, a veces, por eso mucha gente duda; sin embargo, pues sí tenemos alguna piecita en Venecia, en Los Ángeles, en Portland, Nueva York, Florida...

Estas experiencias en Estados Unidos, ¿sientes que te cambiaron?

Pues, de hecho, en el 2008, fue cuando participé en la primera exposición colectiva, que fue cuando yo todavía trabajaba con el maestro Alejandro y hubo un curso de diferentes maestros ya posicionados, entre ellos la maestra Ivonne Kennedy, la maestra Claudia Tejada, que ya son reconocidas.

¿Ellas están en Oaxaca?

Sí, ellas están aquí en Oaxaca, tienen hornos, tienen hojas, lo que pasa es que estos artistas fueron a un curso en el taller del maestro Alejandro Santiago y ahí fue donde ellos vieron mi trabajo y me pagaron la quema para que se pudieran cocer mis primeras piezas, y las llevaron a exhibir.



© **Honorio Cruz.** *Toro conversando con la Luna 2.*
Cerámica de alta temperatura, 142 × 88 × 30 cm.



© **Honorio Cruz.** *El guardián de su ser 3.*
Cerámica de alta temperatura, 180 × 74 × 36 cm, base: 15 × 70 × 45 cm.

Háblame de Alejandro Santiago

A él, siendo pintor, se le ocurrió la idea de trabajar un proyecto monumental acerca de la migración.

Todo era cerámica de alta temperatura. Y lo hizo, aquí en Suchilquitongo, fue el proyecto que vino a realizar.

Pero eso a veces es raro, ¿no?, porque, yo había dejado de estudiar, aprendía carpintería y de repente el brinco a conocer la cerámica. Realmente fue una oportunidad casual la que me brindó.

¿De dónde sacaste la idea de los toros? ¿Del minotauro? Parece un minotauro, algo griego...

Sí, es que todo va relacionado, el tema de la humanidad, de las plantas, de los animales, todo eso me gusta, como tratar de mostrar la conexión que tenemos con ellos. El toro demuestra alguna expresión emocional, todo es ese tema.

¿Cómo les llamas?

Karilunios, seres con cara de luna y siempre representando los rostros con los astros. La Luna y el Sol.

Siempre conservando la idea de que es parte de la vida, ¿no? Ahí tenemos el maíz, es como una adoración al alimento...

Me sigue dando curiosidad cómo te iniciaste, por qué te metiste en el arte, digamos, de pequeño, ¿te imaginabas artista? ¿Y si dibujabas hacías este tipo de cosas?

Siempre tenía yo la paciencia. Me gustaba mucho hacer piñatas o canastas florales, que se ven sencillas, pero al final de cuentas tiene su paciencia, su forma de poder realizarla. Yo creo que desde que entré con el maestro Alejandro, siempre hacía yo personajes un poco diferentes, porque él nos daba la forma; decía: "hagan los pies, hagan el cuerpo y yo los termino", porque era cantidad lo que se tenía que hacer (para el proyecto de los emigrantes). Entonces, yo me puse a experimentar e hice diferentes formas, inclusive esa vez trabajamos con el maestro Alejandro en una pieza de tres metros.

En ese momento, me acuerdo mucho, hasta lloró de la emoción. Y es que su tema era un poco social, entonces era como tratar de provocar algo aquí, de que no era necesario irse a Estados Unidos, sino que podrías hacer algo aquí, en tu país.

¿Qué fue de la obra monumental que hicieron?

De hecho, me parece que parte está aquí, en su taller. Y parte está en el parque Primavera que acaban de inaugurar.



© Honorio Cruz. *Sin título.*
Cerámica de alta temperatura.



© Honorio Cruz. *Máscara.*
Cerámica de alta temperatura.



© Honorio Cruz. *Adoración a la vida 1.*
Cerámica de alta temperatura, 201 x 118 cm.

¿Dónde es ese parque?

Donde está el mercado del centro, en Oaxaca. Ahí me parece que presentaron algunas piezas, es un proyecto muy impresionante, porque se hicieron 2,500 figuras de buen tamaño y el proceso, la técnica, pues sí es compleja.

¿Por eso no muchos hacen cerámica, ¿no?

Aquí, en Oaxaca, me parece que, de esculturas, son como 3 o 4 talleres. Por eso es que también de repente abro el espacio para que vengan a trabajar otros artistas. Viene el maestro Pantaleón Ruiz; ahorita viene el maestro Sabino Guisu también, que está trabajando otras piezas, y de repente así abrimos el espacio para que puedan venir.

¿Y con Francisco Toledo tuviste alguna interacción?

Nos conocimos porque coincidíamos en algunas partes, pero no, no tuve la fortuna de tener trato directo con él. Realmente para mí fue el maestro Alejandro el que me dió la oportunidad de conocer la técnica de la cerámica, lo cual le agradezco muchísimo al maestro Adán Paredes; entré a su taller para mejorar la calidad del material y los acabados. El maestro Javier Cervantes, Katy McFadden, Claudio Gerónimo, o sea, he ido como absorbiendo conocimientos de diferentes maestros. De algunos he podido tomar cursos,

como del maestro Gustavo Pérez, ahí pagué un curso, también de la maestra Graciela Olio. Y así se ha formado el taller.

Tienes una pieza con ballenas, diferente a todo lo que habías hecho.

Sí, esa la preparamos para unas presentaciones en Cancún; entonces, como es más costa, más playa, tocamos más el tema de los animales marinos.

¿Qué tanto te fuerza el mercado a hacer cierto tipo de cosas o a un cierto ritmo, más allá de lo puramente artístico?

Pues... en parte; hay algunos que me dicen "quiero una ballena", pero al final de cuentas yo lo trabajo a mi estilo. Entonces, como ese de la ballena, pues también siempre tiene los personajes, ¿no?, el Sol, la Luna. El mar, ajá sí, sí, al final de cuentas todo está basado en el arte. Lo importante es la interpretación, cómo se pueden interpretar las texturas, los colores. Este material está cocido a 1,280 grados, realmente es complejo. Para mí, esta pieza es sorprendente porque se logró más o menos el acabado que quería yo. Con muchas piezas el resultado es complejo, porque a veces los colores se van a oscuros o salen totalmente diferentes de lo que uno quería.

El material tiene su propia vida, ¿no? Hay una cerámica que hacen en Puebla, la talavera, ¿has visitado los talleres de talavera en Puebla?



© Honorio Cruz. *Guardián de lo intangible 7*.
Cerámica de alta temperatura, 204 × 76 × 46 cm.



© Honorio Cruz. Horno.
Cerámica de alta temperatura.



© Honorio Cruz. *Sin título*.
Cerámica de alta temperatura.

¿De Talavera?, no, pero sí algunos talleres ahí de cerámica.

El barro que usas es barro Zacatecas...

Bueno, así lo registraron como la marca y al parecer también lo sacan en Zacatecas y lo mandan a la Ciudad de México, y ya nosotros lo adquirimos ahí.

Es un material bastante refractario. No he sabido de algún lugar aquí en Oaxaca que lo venda. Y todos los barritos de acá, pues son como para un poco más baja temperatura, si nosotros cocemos ese barro a esta temperatura se vitrifica y se vuelve vidrio. Entonces nos da mayor volumen, más soporte para poder realizar las piezas más grandes.

Hacemos una mezcla en que al barro Zacatecas le ponemos una pasta, que es para vaciado, para que nos dé plasticidad; le ponemos el feldespatos para que nos ayude a vitrificar un poco, y le ponemos una pasta que se llama 931. También; entonces lo mezclamos, para conseguir mejor plasticidad y soporte, y para buscar que vitrifique bien el material.

¿Y los colores?

Para eso se hace toda la combinación. Y ya los colores, pues se añade cobalto, estaño, o titanio.

El cobalto queda azul, el titanio blanco, y mezclado con óxido de hierro negro nos sale un amarillo. Un verde como este. Bueno, es un vidriado, ese es ya el más complejo.

La mayoría de tus obras son colores mate, tienen muy poco brillo.

Lo que pasa es que los míos son más engobes, óxidos puros. Y ya los otros son vidriados. Para eso le meten más fundentes como el feldespatos, el talco. Hay varios minerales que hacen que queden vidriados.

¿Qué tanto se cuidan, por ejemplo, del plomo y el cadmio, que son muy tóxicos?

Pues siempre tratamos de cuidarnos en ese sentido. Creo que a la altísima temperatura es difícil que se resista, que siga el plomo, por lo menos queda vitrificado. Nos han comentado que el cobalto es el más fuerte.

¿Y tu familia?, ¿viven tus papás?

Sí, ah...

¡Qué bueno, felicidades! Se que tú tienes 37 ¿y ellos?

Soy el penúltimo de nueve hermanos, entonces pues ya mis papás son grandes; mi papá creo que tiene como 83 años, y mi mamá tendrá como sus 73 o 74, son personas que fueron bien hechas, están bien y mi papá aún se va al campo.



© Honorio Cruz. Sin título.
Cerámica de alta temperatura.



© Honorio Cruz. De la serie *Navegando juntos*.
Cerámica de alta temperatura, 43 x 73 x 15 cm.

¿Trabaja el campo?

Toda su vida ha sido campesino, pero lo trabaja con una ansiedad, un placer que... ¡híjoles! Tiene unas tierritas donde cultiva maíz, calabaza, frijol; tiene algunas vaquitas, un caballito, unos burritos, entonces esa es su pasión. Yo me acuerdo que, antes, a las cinco de la mañana nos levantaba para ir a cortar zacate, sí, es una persona que se apasiona por el campo.

¿Y tú mamá qué hace?

Mi mamá hace la casa todo el tiempo.

¿Y tus hermanos?

La mayor está con mis papás, ahorita le ayuda a mi mamá; mis otros hermanos trabajan. Una de mis hermanas que tengo en Estados Unidos, igual emigró.

¿Con su pareja o sola?

Se fue sola y se juntó allá, tuvo una niña, se separaron y ahora vive sola con su hija. En Las Vegas. Fui a verla el año pasado.

¿No te hicieron problemas para la visa?

No, porque tenías invitaciones. Tuve la suerte de que la maestra me consiguiera invitaciones por parte del consulado y por parte de Tlacama, la escuela de allá, y ya con eso pues me aliviaron bastante. Sí, sí, me dieron la visa.

Si tienes un pariente migrante se ponen bien pesados para la visa, ¿no?

Bueno, de hecho, no lo mencioné, pero ahora sí voy a ver a mi hermana, la visito y todo, ¿no?, claro, aquí tengo toda mi vida. Aquí también nosotros podemos salir adelante, este es un terrenito que me heredó mi papá. Cuando lo vi nadie lo quería.

¿Por qué? ¿está muy alto?

Estaba muy alto y pues, si no se le mete trabajo, no sirve. Pero aquí le he invertido mucho trabajo para aplanarlo. Está precioso el paisaje, se ve todo el valle. Estoy construyendo lo que va a hacer mi casa, podríamos decir, pero la parte de arriba estoy pensando que va a ser una galería, por ahora.

¿Eres casado?

No, hasta ahorita no.

Vivo con mi hermana y mi sobrina; no, no soy casado, la verdad es que a la cerámica hay que dedicarle mucho tiempo. Y sí, decía un maestro, es una de dos: o la cerámica o la pareja, ¿no?

Pero pues, bueno, yo todavía no pierdo la esperanza de, tal vez adelante, tener alguna relación.

** Esta entrevista se realizó en diciembre de 2024 en el estudio del artista en Santiago Suchilquitongo, Oaxaca. Las fotografías, de Enrique Soto, fueron hechas con teléfono celular, a excepción de dos o tres realizadas con una cámara Samsung NX-500.*

Hongos contra la resistencia bacteriana: ¿una nueva alternativa?

Mariana Irán **Rodríguez Cayón**
José Antonio **Cervantes Chávez**

La resistencia bacteriana es el mecanismo que algunas especies de bacterias desarrollan para resistir la acción de antibióticos que provocarían su muerte. Estos mecanismos son resultado de la adaptación genética o de factores adquiridos.

Actualmente, la búsqueda de fuentes de compuestos con capacidad antimicrobiana es de interés científico y tiene el objetivo de brindar alternativas para paliar la resistencia bacteriana y evitar problemas de salud pública y agropecuaria.

En este sentido, la investigación se enfoca en el estudio de metabolitos secundarios producidos por plantas y hongos con potencial acción antimicrobiana. Los hongos *Epicoccum nigrum* y *Monascus sanguineus* producen compuestos que, se ha demostrado, poseen actividad antimicrobiana, y representan una posible alternativa a los antibióticos convencionales.

Hoy en día, la resistencia bacteriana a antibióticos causa la muerte de 5 millones de personas cada año. Según pronósticos de la Organización Mundial de la Salud, para el año 2050 esta cantidad podría aumentar a 10 millones de muertes anuales. Esta cifra es mayor que los decesos provocados por enfermedades no transmisibles,

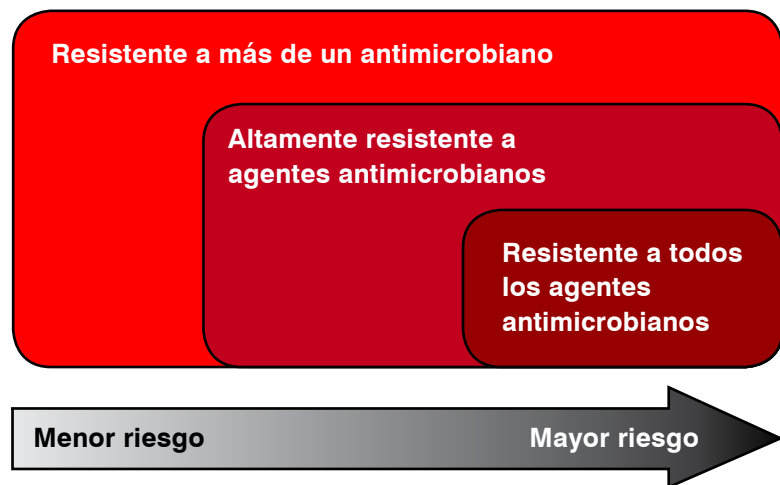


Figura 1. Grado de resistencia de bacterias a antimicrobianos y representación de riesgo epidemiológico en sector público y agropecuario.

como diabetes o cáncer, por lo tanto, se destaca la importancia de apostar en proyectos de investigación y desarrollo de nuevos antibióticos producidos a partir de fuentes alternativas como los hongos.

¿CÓMO SE GENERA LA RESISTENCIA BACTERIANA?

Las bacterias resistentes, a través de mecanismos intrínsecos o adquiridos, pueden evadir el efecto de los antibióticos. Los primeros son inherentes a las bacterias debido a su estructura o sus funciones biológicas. Ejemplos de ese grupo de mecanismos son la pared celular bacteriana, que evita que el antibiótico se infiltre, y la síntesis enzimática para la degradación de compuestos con capacidad bactericida. Por otro lado, los mecanismos adquiridos son resultado de mutaciones genéticas o de la transferencia horizontal de genes a través de transposones o plásmidos; en su conjunto, brindan características que codifican para la resistencia, dado que inactivan la molécula del antibiótico, lo eliminan con facilidad del interior de la célula, o alteran la diana hacia la que van dirigidos (Jian *et al.*, 2021).

Cuanto mayor sea la exposición y el contacto de una bacteria con dosis subletales de un antibiótico, más probable será que desarrolle algún mecanismo para evadirlo. Los grados de resistencia bacteriana han sido clasificados en tres niveles, en orden creciente según el riesgo que generan a la salud

pública y agropecuaria. El primer nivel es la resistencia a más de un agente antimicrobiano, o bien, a un agente antimicrobiano clave, es decir, aquel que es considerado el antibiótico de elección para combatir la bacteria en cuestión, como sucede con cepas de *Staphylococcus aureus* resistentes a la metilicina, o enterococos resistentes a vancomicina.

Las bacterias que pertenecen al segundo grado son conocidas como “altamente resistentes a agentes antimicrobianos” y son resistentes a por lo menos dos antimicrobianos claves.

Por último, el grado pandrogo-resistente, hace referencia a la resistencia a todos los agentes antimicrobianos (Figura 1), aunque, en países en vías de desarrollo, este grado puede ser aplicado a organismos resistentes a todos los agentes antimicrobianos a los que se tiene acceso en dicho país (Magiorakos *et al.*, 2012).

Por ello, resulta imprescindible la búsqueda de estrategias para mitigar el desarrollo de bacterias resistentes, y la población en general debe de ser consciente y reconocer aquellas malas prácticas que propician esta problemática.

ESTRATEGIAS DE CONTENCIÓN Y MITIGACIÓN DE RESISTENCIA

Existen medidas para reducir el desarrollo de resistencia bacteriana en distintos sectores de la población. Los profesionales de la salud tienen la responsabilidad de diagnosticar con precisión el microorganismo

	Metabolitos Primarios	Metabolitos Secundarios
Función	Esenciales o vitales	De mantenimiento
Origen	Productos del metabolismo	Dependientes de los primarios
Incluyen	Carbohidratos, lípidos, vitaminas, entre otros	Pigmentos, aromas, sabor, entre otros

Figura 2. Diferencias entre metabolitos primarios y secundarios.

causante de la infección, utilizando cultivos bacterianos y pruebas de sensibilidad para prescribir el tratamiento adecuado. A su vez, la población debe seguir estrictamente el tratamiento en humanos, mascotas y otros animales. La continuidad del plan terapéutico, incluso cuando los síntomas o signos de infección hayan desaparecido, evitará la supervivencia y propagación de bacterias con potencial de desarrollar resistencia.

Además, el personal médico veterinario y zootecnista es responsable de establecer el tiempo de retiro adecuado de los antibióticos entre su administración en animales de consumo y su posterior sacrificio, reduciendo así la presencia de residuos de antibióticos en carne, leche, huevos y otros productos de origen animal destinados al consumo humano. Aunado a esto, el profesional de la salud animal debe evitar el contacto innecesario de antibióticos con bacterias ambientales, manteniendo la limpieza en corrales, campos e instalaciones, con el apoyo de los trabajadores.

Otra medida en el sector agropecuario es el uso adecuado de equipo de protección (guantes, batas, overoles, botas o tapetes sanitarios) por parte de médicos veterinarios zootecnistas y trabajadores que tengan contacto con animales enfermos. Esto tiene como objetivo prevenir la propagación de bacterias resistentes a los antibióticos que puedan causar zoonosis, es decir, infecciones que se transmiten de animales a humanos y que pueden ser difíciles de tratar.

ALTERNATIVAS CONTRA LA RESISTENCIA BACTERIANA A ANTIBIÓTICOS

Hoy en día, existen otras opciones para combatir a las bacterias resistentes a antibióticos, entre las que destacan las nanopartículas de plata u otros metales que potencian la acción de antibióticos al combinarse con ellos; sin embargo, los materiales comúnmente utilizados para su síntesis son tóxicos para animales y humanos, además de que deterioran el medio ambiente. Los bacteriófagos son virus que atacan bacterias, y representan una perspectiva interesante; no obstante, a diferencia de los antibióticos, carecen de versatilidad al ser altamente específicos, ya que en muchas ocasiones actúan únicamente contra una sola especie de bacteria.

Debido a estas desventajas, continúa la búsqueda de moléculas con actividad antimicrobiana a partir de fuentes naturales, como los metabolitos producidos por hongos, plantas o bacterias. Esta es una línea de investigación que se ha desarrollado desde que Alexander Fleming descubrió en 1928 un metabolito secundario proveniente de hongos del género *Penicillium*, capaz de inhibir el crecimiento de bacterias, al que hoy conocemos como penicilina, y que cambió el curso de la historia de la humanidad. Las moléculas consideradas metabolitos secundarios son resultado de diversas rutas metabólicas y se caracterizan por no estar vinculadas al crecimiento,

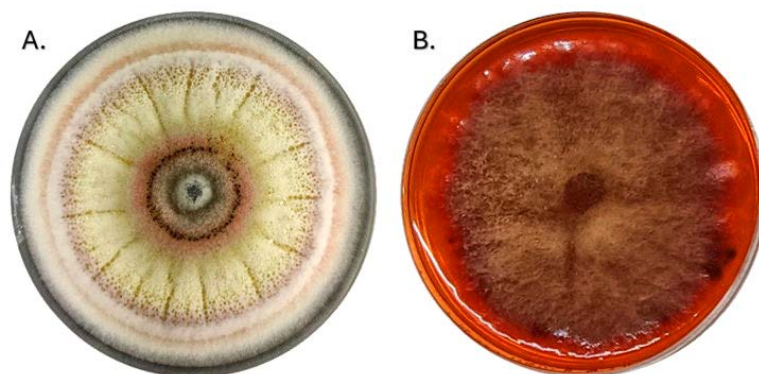


Figura 3. Hongos filamentosos. A: *Epicoccum nigrum*. B: *Monascus sanguineus*. Los hongos se sembraron en medio de cultivo agar dextrosa papa. Se incubaron a temperatura ambiente durante dos semanas.

desarrollo o reproducción del organismo, al que sin embargo aportan una ventaja; por ejemplo, la capacidad de inhibir el crecimiento de otros organismos que compiten por los mismos recursos (Abdel-Aziz *et al.*, 2017). Se diferencian de los metabolitos primarios en función, origen y estructura química (Figura 2).

La identificación y cuantificación de estos compuestos han sido un desafío, pues son compuestos numerosos que pueden tener una o varias funciones y cuya síntesis dependerá de las condiciones particulares de crecimiento del organismo. Estos metabolitos se producen como mecanismo de defensa ante la influencia de factores externos como la radiación ultravioleta, la temperatura, las condiciones de pH, los daños físicos, la respuesta ante enfermedades, así como en respuesta a las condiciones en que el organismo crece, y suelen estar relacionados con los colores, texturas, sabores y aromas característicos de los organismos. Es por ello que algunos son usados en la industria como colorantes en textiles, alimentos, materiales, etcétera, y su uso se extiende en la actualidad a las industrias farmacéutica y agroalimentaria como antimicrobianos, antifúngicos o herbicidas, entre otros.

HONGOS FILAMENTOSOS: ¿UNA ALTERNATIVA?

Los hongos filamentosos o mohos son organismos microscópicos que pueden encontrarse en diversas fuentes como alimentos, suelos, plantas, animales, entre otros.

Su nombre se debe a que poseen estructura en forma de filamentos, generalmente microscópicos, conocidos como hifas. Durante su ciclo de vida, los hongos son capaces de producir una variedad de compuestos con funciones específicas (da Costa Souza *et al.*, 2016).

En la naturaleza existe una gran variedad de hongos filamentosos que se han estudiado; por ejemplo, *Epicoccum nigrum* y *Monascus sanguineus* con propiedades importantes y variadas (Figura 3).

El primero está presente en diferentes tipos de suelo, alimentos, plantas e incluso pieles de animales (aunque no existe evidencia de que sea perjudicial para estos). Por su parte, *M. sanguineus* es utilizado desde tiempos ancestrales en países asiáticos para la fermentación de arroz y otros alimentos a los que añade una característica pigmentación rojiza (Kumar Shetty *et al.*, 2021).

A diferencia de otros hongos de su género, su producción de toxinas es escasa o nula, por lo que su consumo no representa un riesgo.

En ambos hongos se han reportado metabolitos secundarios con actividades antibacterianas, antioxidantes, antitumorales e incluso anticancerígenas (Agboyibor *et al.*, 2018; Dzoyem *et al.*, 2017), y su proceso de crecimiento es relativamente sencillo en comparación con otros. Es por ello que actualmente se llevan a cabo proyectos de investigación enfocados en el estudio de metabolitos secundarios con actividad antimicrobiana, producidos por *E. nigrum* y *M. sanguineus* con la finalidad de buscar compuestos capaces de inhibir el crecimiento de bacterias resistentes.



CONCLUSIONES

Es importante apostar por las investigaciones enfocadas en el desarrollo de nuevas formas de inhibir a las bacterias patógenas. Es de igual relevancia que los organismos gubernamentales sean capaces de controlar la venta de antibióticos sin receta médica y se deben tomar medidas para concientizar a la población acerca del uso inapropiado de estos medicamentos. Hay un camino largo por recorrer, pero si se cuenta con el apoyo y la contribución de todos los sectores, se tiene por delante una gran oportunidad en la lucha contra la resistencia bacteriana.

REFERENCIAS

- Abdel-Aziz SM, Abo Elsoud MM and Anise AAH (2017). Microbial Biosynthesis: A Repertory of Vital Natural Products. In Handbook of Food Bioengineering, Food Biosynthesis (pp. 25-54). Academic Press.
- Agboyibor C, Kong WB, Chen D, Zhang AM and Niu SQ (2018). Monascus pigments production, composition, bioactivity and its application: A review. Biocatalysis and Agricultural Biotechnology 16:433-447.
- Da Costa Souza PN, Grigoletto TLB, de Moraes LAB, Abreu LM, Guimarães LHS, Santos C, Galvão LR and Cardoso PG (2016). Production

and chemical characterization of pigments in filamentous fungi. Microbiology 162:12-22.

Dzoyem JP, Melong R, Tsamo AT, Maffo T, Kapche DGWF, Ngadjui BT, McGaw LJ and Eloff JN (2017). Cytotoxicity, antioxidant and antibacterial activity of four compounds produced by an endophytic fungus *Epicoecum nigrum* associated with *entada abyssinica*. Revista Brasileira de Farmacognosia 27:251-253.

Jian Z, Zeng L, Xu T, Sun S, Yan S, Yang L, Huang Y, Jia J and Dou T (2021). Antibiotic resistance genes in bacteria: Occurrence, spread, and control. Journal of Basic Microbiology 61:1049-1070.

Kumar Shetty AV, Dave N, Murugesan G, Pai S, Pugazhendhi A, Varadavenkatesan T, Vinayagam R and Selvaraj R (2021). Production and extraction of red pigment by solid-state fermentation of broken rice using *Monascus sanguineus* NFCCI 2453. Biocatalysis and Agricultural Biotechnology 33(101964).

Magiorakos AP, Srinivasan A, Carey RB et al. (2012). Multidrug-resistant, extensively drug-resistant and pandrug-resistant bacteria: An international expert proposal for interim standard definitions for acquired resistance. Clinical Microbiology and Infection 18:268-281.

Mariana Irán Rodríguez Cayón
José Antonio Cervantes Chávez
Facultad de Ciencias Naturales
Universidad Autónoma de Querétaro
mrodriguez261@alumnos.uaq.mx



© **Honorio Cruz.** *Sin título.* Cerámica de alta temperatura.

Neuroimagen funcional con fNIRS en la investigación del sistema motor

Pedro **Mabil Espinosa**
Jaime **Martínez Castillo**

La espectroscopía funcional de infrarrojo cercano (fNIRS, por sus siglas en inglés) es de gran interés para explorar la conexión entre el movimiento muscular y sus respuestas hemodinámicas en la corteza cerebral. Se trata de un método que mide los cambios en los niveles de oxigenación y desoxigenación de la molécula de hemoglobina mediante la colocación de múltiples optodos, los cuales son un par de dispositivos optoelectrónicos que están conformados por un emisor (leds infrarrojos de 850 nm) y un detector (fotodiodos) que se colocan en el cuero cabelludo. Este procedimiento permite crear mapas cerebrales de la actividad en una región determinada cuando se aplica algún estímulo o se realiza algún movimiento voluntario o involuntario (Figura 1). Estas investigaciones son posibles gracias a la portabilidad y tolerancia al movimiento del sistema fNIRS, ya que otras técnicas como la resonancia magnética funcional y la electroencefalografía requieren que el sujeto esté prácticamente inmóvil para poder analizar sus respuestas hemodinámicas ante estímulos que no implican movimiento.

Sin embargo, también es muy importante en la investigación neurológica ahondar en el movimiento muscular, pues este es esencial para la vida diaria y la supervivencia de las personas. El movimiento muscular nos permite realizar una amplia gama de actividades, desde

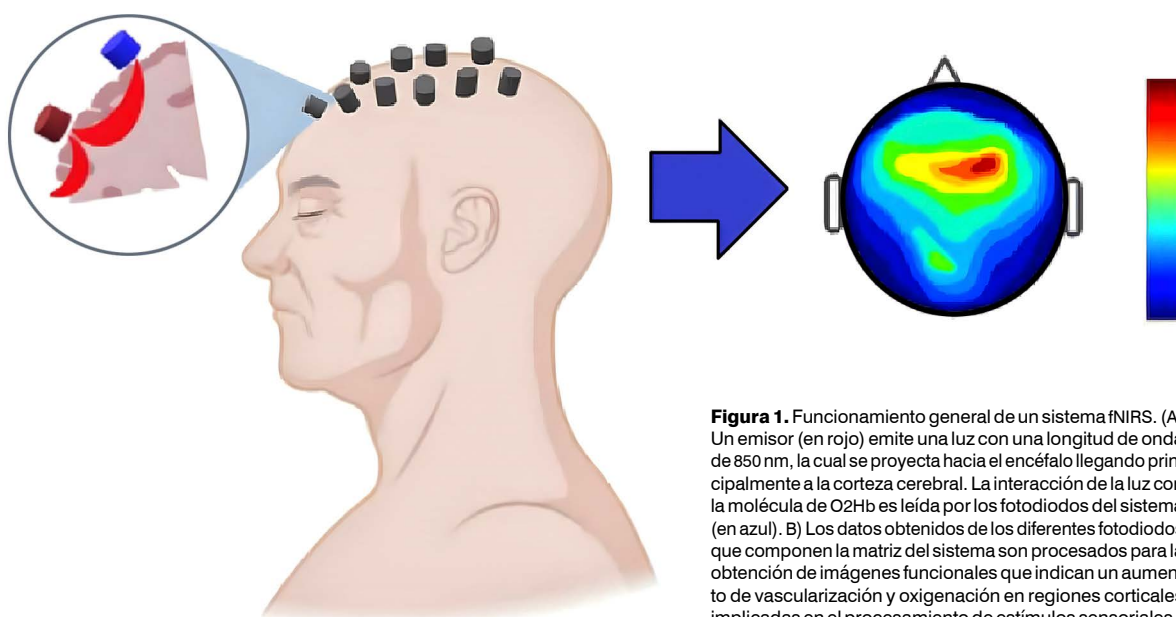


Figura 1. Funcionamiento general de un sistema fNIRS. (A) Un emisor (en rojo) emite una luz con una longitud de onda de 850 nm, la cual se proyecta hacia el encéfalo llegando principalmente a la corteza cerebral. La interacción de la luz con la molécula de O₂Hb es leída por los fotodiodos del sistema (en azul). (B) Los datos obtenidos de los diferentes fotodiodos que componen la matriz del sistema son procesados para la obtención de imágenes funcionales que indican un aumento de vascularización y oxigenación en regiones corticales implicadas en el procesamiento de estímulos sensoriales.

las básicas, como respirar y digerir los alimentos, hasta las más complejas, como correr, bailar o practicar deporte. Se trata de un sistema que, a través de señales nerviosas, permite ejecutar de forma eficiente y eficaz movimientos que dependen de diferentes tipos de músculos en una amplia gama de actividades físicas. Entender cómo funcionan los músculos a nivel neurofisiológico es fundamental para diagnosticar y tratar trastornos musculares como distrofias musculares, lesiones musculares y trastornos neuromusculares. Este conocimiento facilita el desarrollo de estrategias terapéuticas más efectivas y personalizadas.

Inicialmente, la fNIRS se utilizó ampliamente para investigar la respuesta hemodinámica de la corteza sensoriomotora provocada por estímulos motores, sensoriales, eléctricos y magnéticos (*Franceschini et al.*, 2003).

Estos estudios evidenciaron un aumento en la concentración cerebral de oxihemoglobina (O₂Hb) en la región cortical contralateral al área estimulada, lo cual resulta consistente con los resultados de la tomografía por emisión de positrones (PET), la resonancia magnética funcional (fMRI) y el electroencefalograma (EEG).

Posteriormente, varios grupos presentaron evidencias de la utilidad de la fNIRS para evaluar los cambios en la oxigenación de la corteza motora humana en respuesta a movimientos voluntarios no automáticos (*Wriessnegger et al.*, 2008).

En uno de los estudios se evaluó una tarea sencilla de golpeteo con cada mano: todos los sujetos mostraron aumentos significativos de O₂Hb durante la tarea, en comparación con el período de descanso. Los resultados de estas investigaciones establecieron un precedente que respalda la funcionalidad de los sistemas fNIRS para la visualización de la activación hemodinámica para grandes áreas de registro a nivel cortical.

Sin embargo, además de demostrar la relación entre la activación de grandes áreas de registro y la ejecución de movimientos voluntarios, Nambu y colaboradores (2009) clasificaron el contenido de un evento sensoriomotor a través de los cambios relativos en las concentraciones de oxihemoglobina en las cortezas sensoriomotoras bilaterales. Durante este estudio, los participantes realizaban una prueba isométrica de fuerza de pinza con el pulgar y el índice, aplicando repetidamente una de las tres fuerzas objetivo (25 %, 50 % o 75 % de la fuerza máxima). La retroalimentación en esta clase de sistemas tiene un gran potencial en el campo

de la rehabilitación motora, donde las interfaces cerebro-computadora pueden ofrecer retroalimentación en tiempo real para ayudar a los usuarios en su proceso de entrenamiento, además de monitorear continuamente el estado del cerebro durante todo el proceso de rehabilitación. Se han realizado algunas revisiones muy completas sobre aspectos de la rehabilitación motora en pacientes de edad avanzada, con el objetivo de preservar la cognición y la movilidad en la vejez (Udina *et al.*, 2020), así como en personas con discapacidades motoras graves, lo que genera una creciente demanda de interfaces cerebro-computadora para restaurar (al menos parcialmente) sus capacidades motoras.

Es necesario revisar los trabajos en los que se mencionan las ventajas y limitaciones de los sistemas fNIRS para considerar los ajustes técnicos que se podrían requerir en su implementación.

USO DE fNIRS PARA ESTUDIOS DE IMÁGENES DE MOVILIDAD EN NIÑOS Y ADULTOS

En los últimos años, en estudios realizados en niños y adultos, se ha empleado la fNIRS para investigar el procesamiento del movimiento. Estos estudios están relacionados exclusivamente con la activación de actividades motoras y sensoriomotoras en la corteza cerebral. Para cada revisión se incluye lo siguiente: las especificaciones, las áreas corticales investigadas, los estímulos-tareas cognitivas adoptadas y los principales hallazgos observados. La mayoría de estos estudios informaron resultados solo cuando cambia la O₂Hb cortical.

Se ha estudiado la eficiencia neuronal mediante estudios fNIRS en niños de entre 6 y 8 años (46 % niñas) de dos escuelas, y se ha observado una mejora en el rendimiento cognitivo con respecto al grupo control conformado por niños de otra escuela (Mazzoli *et al.*, 2021).

En estos estudios, los patrones de sedentarismo, bipedestación y comportamiento de concentración se vieron afectados positivamente por las pausas activas al final de la prueba, produciendo un cambio significativamente mayor en la proporción de hemoglobina desoxigenada en la corteza prefrontal

dorsolateral izquierda de los niños asignados a las pruebas de pausa activa. Siguiendo los beneficios que la actividad física tiene en los individuos, se realizó un estudio sobre tareas motoras en el que se mostró que el ciclismo mejora la oxigenación cortical como efecto secundario (Tsubaki *et al.*, 2017). La O₂Hb en la zona relacionada con la actividad motora se elevó tanto durante el ejercicio como durante un descanso postejercicio de 8 minutos. Se trató de un estudio realizado en 10 sujetos sanos (edad media 21.3 ± 0.7 años; 4 mujeres).

En estos estudios se midió de forma continua el flujo sanguíneo cutáneo y la presión arterial media. Además de la activación de la propia corteza motora en respuesta a determinados estímulos motores, se evaluó la interconectividad con otras áreas importantes. Por ejemplo, cuando se comparó el efecto de caminar rápido, la hemoglobina oxigenada se concentró en la corteza prefrontal e indicó la activación de la red locomotora de la corteza sensoriomotora, la cual engloba a la corteza premotora y el área motora suplementaria; además, el sitio con la tasa de activación cortical más alta se desplazó de la corteza sensoriomotora al área motora suplementaria. Estos estudios indican una conectividad efectiva de las redes sensoriomotoras cortico-corticales durante las tareas de movimiento (Anwar *et al.*, 2016); también se encontró una relación direccional dinámica subyacente entre las regiones cerebrales activadas simultáneamente durante el desempeño de tareas motoras de los dedos. La información relacionada fluye de una región cerebral a otra. Sin embargo, no solo los movimientos voluntarios provocan actividad en regiones de la red sensoriomotora cortical; los estudios de neuroimagen (Muthalib *et al.*, 2015) han demostrado que los movimientos provocados por estimulación eléctrica neuromuscular activan regiones de la red sensoriomotora cortical, incluida la corteza sensoriomotora primaria, la corteza premotora, el área motora suplementaria y el área somatosensorial secundaria.

En otros experimentos se demostró que la neuroimagen fNIRS permite la cuantificación de los perfiles

de activación regional sensoriomotora bilateral durante los movimientos de extensión de la muñeca provocados por estimulación eléctrica neuromuscular y movimientos voluntarios.

Kim y colaboradores (2021) identificaron el área cortical más activada sobre la corteza sensoriomotora primaria, donde se caracterizó la codificación cortical para la producción de fuerza por los músculos de la muñeca en el cerebro humano.

Estudios como los que hemos reseñado son importantes no solo porque pueden proporcionar información sobre el control neuronal cortical de la fuerza muscular, sino porque pueden ser predictores de la fuerza muscular y por lo tanto ser usados en el diagnóstico clínico y las interfaces neuronales para los seres humanos. Estas últimas son interfaces cerebro-computadora que miden la actividad cerebral y la convierten en salidas eléctricas capaces de controlar actuadores mecánicos de prótesis o sillas de ruedas y, por lo tanto, coadyuvan a la independencia de las personas que la han perdido.

Además de utilizar fNIRS en condiciones fisiológicas en sujetos sanos, se han realizado estudios en condiciones disfuncionales. Incluso cuando la patología no es causada por un accidente, también se puede utilizar para evaluar la función motora deteriorada en neurología y neurorrehabilitación (Holper *et al.*, 2009).

Se han estudiado algunas tareas motoras de la mano para evaluar el rendimiento unimanual o bimanual, así como la complejidad de la tarea, que va desde tareas de secuencia simple hasta tareas de secuencia compleja. Se encontraron diferencias significativas en la concentración de oxihemoglobina y desoxihemoglobina en el hemisferio derecho a lo largo de la corteza motora primaria humana. Dieciséis sujetos diestros sanos realizaron cinco tareas de golpeteo de dedos: tareas unimanuales con la mano izquierda y derecha, tareas simples y complejas, así como tareas bimanuales complejas. Este estudio tuvo como objetivo apoyar el establecimiento de la fNIRS como un método de neuroimagen para evaluar la función motora de la mano en entornos

clínicos donde no se pueden aplicar otros métodos de neuroimagen tradicionales.

PERSPECTIVAS EN EL CAMPO DEL PROCESAMIENTO DE IMÁGENES EN MOVIMIENTO

La técnica de fNIRS tiene aún numerosos objetivos por alcanzar. Estos objetivos pueden estar enfocados en investigar si existe una correlación entre la actividad hemodinámica cortical y algún estímulo o actividad motora asignada a una persona para mejorar su rendimiento cognitivo o su atención, que implique una mayor concentración para un mejor desempeño en alguna actividad.

Otra aplicación de la neuroimagen funcional basada en fNIRS en las regiones corticales de la red sensoriomotora es mejorar la codificación cortical de patrones de movimiento en una persona y utilizar ese conocimiento para predecir dicho patrón cortical. Esto podría ser empleado en un dispositivo capaz de interpretar el cambio hemodinámico como una alerta de variación en la posición de alguna extremidad y utilizarlo para diagnósticos clínicos o para la implementación de interfaces cerebro-computadora en sistemas de rehabilitación dirigidos a personas que han sufrido un accidente y perdido una extremidad.

En esta revisión también se observó la falta de investigación en niños. En los pocos estudios que se han realizado en este grupo de edad, se ha analizado su rendimiento cognitivo en un aula en función de un estímulo motor asignado. Sin embargo, en el futuro serán necesarios trabajos que incluyan estudios longitudinales, especialmente durante el desarrollo cerebral en niños, para observar cambios en la conectividad efectiva entre los diferentes elementos que componen las redes sensoriomotoras corticales durante tareas de movimiento en esta población. Además, sería importante establecer un rango de edad en el que estos cambios en la conectividad se mantengan a lo largo del tiempo como resultado de la maduración de las redes neuronales a nivel cortical.

Por otro lado, considerar aspectos como la portabilidad inalámbrica del sistema fNIRS contribuirá

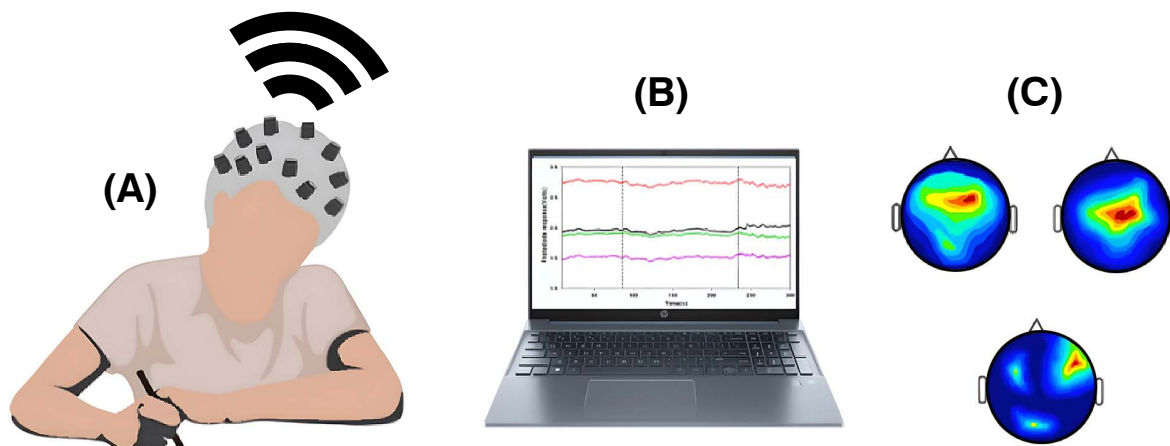


Figura 2. Diagrama del uso de fNIRS en entornos cotidianos. (A) Los datos fNIRS se registran durante la ejecución de actividades de movimiento y se transmiten de forma inalámbrica a un ordenador. (B) Los datos provenientes de los canales incluidos en el gorro fNIRS son almacenados y posteriormente graficados. (C) A partir de la localización de cada canal en el gorro, se genera una imagen en 2D que representa las zonas activas durante la ejecución del movimiento.

a que los experimentos que requieren movilidad de las extremidades sean más fiables. Por ello, es de suma importancia reducir las señales provenientes de errores causados por el movimiento involuntario del optodo en el sistema, ya que en experimentos que requieren movimiento pueden ocurrir desplazamientos mecánicos debido a la inercia que experimentan los componentes en el cuero cabelludo. Por lo tanto, se debe mejorar la robustez de las señales obtenidas frente a errores y aplicar un *software* especial que pueda reconocer y aprender de los errores originados por los movimientos de los instrumentos de medición.

En este sentido, la dirección futura de la investigación en aspectos motores debería incluir modos de movimiento más variados que involucren actividades distintas a las indicadas en esta revisión, de modo que se puedan ampliar los datos sobre codificación de respuestas corticales en las áreas de activación. Esto ampliará el conocimiento necesario para diagnosticar y tratar trastornos musculares, como distrofias y lesiones.

Es importante considerar que esta herramienta debe complementarse con otras técnicas de neuroimagen; por ejemplo, la resonancia magnética funcional permite medir la activación en todo el cerebro, mientras que la fNIRS solo permite medir la activación cerebral a nivel del tejido cortical, limitación que, no obstante, la convierte en una

herramienta útil para evaluar la activación cerebral relacionada con las tareas cognitivas realizadas en las actividades diarias normales (Figura 2).

Un enfoque que tiene el potencial de ayudar a comprender la organización funcional del cerebro humano es la conectividad funcional, definida como la relación direccional dinámica subyacente entre las regiones cerebrales activadas simultáneamente durante la realización de tareas motoras (Anwar *et al.*, 2016).

Se puede observar que existe una conexión fundamental entre diferentes regiones de la red sensoriomotora cortical activadas mediante estimulación eléctrica neuromuscular, red que también involucra regiones que procesan el dolor en la corteza prefrontal. Esto subraya la importancia de estudiar y comprender la relación entre las señales fNIRS y la actividad neuronal, con el objetivo de avanzar en el desarrollo de sistemas fNIRS, útiles en la resolución de preguntas clínicas y de investigación en neurociencias.

En conclusión, es necesario mejorar los sistemas fNIRS para aportar mayor fiabilidad en nuevos paradigmas experimentales que permitan analizar diferentes movimientos en otros contextos de la vida diaria y aumentar el conjunto de imágenes corticales con el objetivo de construir una base de datos capaz de responder a alguna necesidad en la clínica o en la investigación.



Existen fortalezas en el sistema fNIRS que representan importantes ventajas para su uso; sin embargo, debería ser complementado, cuando sea posible y dependiendo del paradigma experimental, con otras técnicas de neuroimagen para asegurar su fiabilidad en la resolución de preguntas de investigación. De este modo, en los próximos años, el fNIRS se proyectará como una herramienta clave en el campo de la neuroimagen.

REFERENCIAS

Anwar AR, Muthalib M, Perrey S *et al.* (2016). Effective Connectivity of Cortical Sensorimotor Networks During Finger Movement Tasks: A Simultaneous fNIRS, fMRI, EEG Study. *Brain Topography* 29(5):645-660.

Franceschini MA, Fantini S, Thompson JH *et al.* (2003). Hemodynamic evoked response of the sensorimotor cortex measured noninvasively with near-infrared optical imaging. *Psychophysiology* 40(4):548-560.

Holper L, Biallas M and Wolf M (2009). Task complexity relates to activation of cortical motor areas during uni- and bimanual performance: a functional NIRS study. *NeuroImage* 46(4):1105-1113.

Kim H (2021). Cerebral hemodynamics predicts the cortical area and coding scheme in the human brain for force generation by wrist muscles. *Behavioural Brain Research* 396:112865.

Mazzoli E, Salmon J, Teo WP *et al.* (2021). Breaking up classroom sitting time with cognitively engaging physical activity: behavioural and brain responses. *PLoS one* 16(7):e0253733.

Muthalib M, Re R, Zucchelli L *et al.* (2015). Effects of increasing neuromuscular electrical stimulation current intensity on cortical sensorimotor network activation: A time domain fNIRS study. *PLoS one* 10(7):e0131951.

Nambu I, Osu R, Sato MA *et al.* (2009). Single-trial reconstruction of finger-pinch forces from human motor-cortical activation measured by near-infrared spectroscopy (NIRS). *NeuroImage* 47(2):628-637.

Tsubaki A, Takehara N, Sato D *et al.* (2017). Cortical oxyhemoglobin elevation persists after moderate-intensity cycling exercise: A near-infrared spectroscopy study. *Advances in Experimental Medicine and Biology* 977:261-268.

Udina C, Avtzi S, Durduran T *et al.* (2020). Functional Near-Infrared Spectroscopy to Study Cerebral Hemodynamics in Older Adults During Cognitive and Motor Tasks: A Review. *Frontiers in Aging Neuroscience* 11:367.

Wriessnegger SC, Kurzmann J and Neuper C (2008). Spatio-temporal differences in brain oxygenation between movement execution and imagery: a multichannel near-infrared spectroscopy study. *International Journal of Psychophysiology* 67(1):54-63.

Pedro Mabil Espinosa
Jaime Martínez Castillo
Centro de investigación en Micro y Nanotecnología
Universidad Veracruzana
jaimartinez@uv.mx

Metales y metaloides: tóxicos ambientales que afectan la memoria

Lucio Antonio **Ramos-Chávez**
Martha **León-Olea**

El desarrollo industrial ha traído consigo la explotación de minerales de la capa profunda de la corteza terrestre. Ello ha propiciado que una variedad de elementos químicos se exponga al ambiente (suelo, agua y aire). Desde la antigüedad el ser humano ha estado en contacto con estos compuestos de manera natural, pero la actividad humana (minería, agricultura, fundición, quema de combustibles fósiles) ha generado un incremento importante en la concentración y biodisponibilidad de estos minerales. Un grupo de estas sustancias no tienen función biológica en el ser humano y representan un riesgo para la salud, ya que de manera directa o indirecta altera la fisiología de los organismos (Hernández-Caricio *et al.*, 2022).

Por definición, los tóxicos ambientales son sustancias o compuestos que se van a encontrar en el ambiente en una concentración que puede afectar o poner en riesgo la salud de los seres vivos, la flora o la fauna y los ecosistemas. Los tóxicos ambientales se pueden dividir por su origen en físicos, químicos o biológicos. Generalmente, estos compuestos dañan a la mayoría de los órganos, incluyendo pulmón, corazón, hígado, riñón y cerebro. Sin embargo, el cerebro presenta un grado de vulnerabilidad mayor a los efectos negativos de estos compuestos debido a que tiene: 1) requerimientos específicos que llegan desde el torrente sanguíneo, 2) menor capacidad de metabolizar

y neutralizar tóxicos, 3) células que funcionan bajo un estricto ambiente bioquímico, 4) componentes susceptibles de sufrir daño como los ácidos grasos que componen las membranas de las neuronas, 5) un metabolismo altamente oxidante.

La exposición a contaminantes ambientales tóxicos tiene repercusiones severas en la carga de enfermedad global (la carga de enfermedad es un método que calcula el impacto de las enfermedades en una población en términos de mortalidad y morbilidad), particularmente en países en desarrollo como México.

Se estima que hasta el 20 % de la carga de enfermedad se relaciona con factores ambientales. Los niños, debido a la inmadurez de sus sistemas biológicos, y los adultos mayores, por la disminución natural en la capacidad de respuesta de sus sistemas fisiológicos representan una población susceptible a desarrollar enfermedades asociadas con los tóxicos ambientales (Téllez-Rojo *et al.*, 2023; Vargas-Marco, 2005; Smith *et al.*, 1999).

Entre los tóxicos ambientales más comunes presentes en suelo, agua, aire y alimentos están los metales y metaloides. Los que destacan por su importancia toxicológica y han sido los más estudiados son el plomo (Pb), el cadmio (Cd), el mercurio (Hg) y el arsénico (As), este último un metaloide con propiedades intermedias de metal (de la Torre-Munilla *et al.*, 2001).

En la Tabla 1 se muestran los metales y metaloides tóxicos más frecuentemente encontrados en el ambiente, sus efectos negativos en la salud humana y el tiempo que tardan en ser eliminados del cuerpo (vida media).

Desde la antigüedad se han aprovechado algunos metales y metaloides. El plomo (Pb) se ha empleado en la elaboración de tuberías de agua, recipientes, pinturas, soldaduras, baterías y plásticos y como aditivo antidetonante en la gasolina. El cadmio (Cd) forma parte de los componentes activos de plaguicidas usados en la industria agroalimentaria, en algunos materiales como palos de golf, en hojas de tabaco y hortalizas. El mercurio

(Hg) es usado en la minería, en la fabricación de baterías, en amalgamas dentales y en la industria eléctrica. El arsénico (As), forma parte de agroquímicos, conservadores de madera, semiconductores y, raramente, se usa en medicina para tratar a algunos pacientes con leucemia, y se usó para el tratamiento de la sífilis (Rodríguez-Heredia *et al.*, 2017; Londoño-Franco *et al.*, 2015).

METALES Y METALOIDES

Los metales y metaloides son elementos químicos con densidad y masa atómica elevada; tienen la propiedad de conducir la electricidad y un aspecto lustrado. Existen dos grupos de metales: aquellos que cumplen una función biológica en el organismo y de los que el ser humano requiere cantidades trazas (oligoelemento, menor a 100 mg/kg de peso), como son el cobalto (Co), el cobre (Cu), el molibdeno (Mo), el magnesio (Mn), el hierro (Fe), el selenio (Se) y el zinc (Zn), que forman parte de los centros activos de muchas enzimas metabólicas (funcionan como cofactores y catalizadores enzimáticos). El otro grupo es conocido como el de los metales tóxicos, que no cumplen una función fisiológica en el organismo y se asocian a envenenamientos agudos o crónicos. La principal vía por la que los humanos nos exponemos a ellos es a través del agua, el polvo, el aire y los alimentos contaminados que, una vez ingeridos, se absorben a nivel de intestino, pasan a torrente sanguíneo y llegan a los diferentes órganos (Ferrer, 2003).

Los contaminantes ejercen su efecto tóxico mediante el desplazamiento (por similitud química) de otros metales con función biológica (calcio, zinc, fósforo, entre otros); ya en el organismo, inactivan proteínas esenciales, inhiben y consumen enzimas metabólicas y antioxidantes y dañan los componentes de las células, particularmente de las neuronas (Ferrer, 2003).

El cerebro es un órgano blanco de toxicidad por metales. En niños y adultos se ha visto que esta disminuye la capacidad de memoria y aprendizaje y causa daños a los nervios periféricos, lo que reduce la calidad de vida de las personas.

Metal/metaloide	Efecto crónico	Exposición
Plomo (Pb)	• Interfiere con la liberación de neurotransmisores, afecta la plasticidad sináptica, causa daño en la mielina y disminuye la capacidad de transmisión neuronal. • Afecta el desarrollo cerebral en niños, resultando en déficits cognitivos, de memoria y aprendizaje. • Osteoporosis, daño gastrointestinal, neuromuscular, renal y anemia. (Vida media en sangre tiene de 35 días, en tejidos blandos 40 días y en hueso de 20 a 30 años)	Oral y aérea (alimentos y aire)
Cadmio (Cd)	• Genera daño oxidativo, inhibe enzimas antioxidantes, y altera la homeostasis del calcio, cruciales para la función neuronal. • Su exposición crónica está asociada con deterioro cognitivo y neurodegeneración, alteraciones de la conducta y pérdida de la memoria en niños • Daño en la piel, cáncer de pulmón, enfermedad cardio vascular, daña el riñón, reproducción. (Vida media de 17 a 30 años)	Oral (alimentos y agua)
Mercurio (Hg)	• Altamente neurotóxico, se acumula en el cerebro, especialmente en su forma metilmercurio. • Provoca estrés oxidativo, apoptosis neuronal y daño en las membranas celulares. • Puede causar temblores, problemas de memoria y déficits motores. • Daño renal y en pulmón, alteraciones motoras y del ánimo y conducta. (Vida media de 30 a 60 días)	Aérea (vapores de Hg)
Arsénico (As)	• Induce estrés oxidativo y neuroinflamación. • Afecta la neurotransmisión y el metabolismo energético neuronal. • Su exposición crónica está relacionada con disfunción cognitiva y trastornos neuropsiquiátricos. • Cáncer multiórgano, daño reproductivo, neurodegeneración, pérdida de la memoria (Vida media de 10 horas, del 50-80% es eliminado en 3 días)	Oral (agua)

Tabla 1. Metales y metaloides tóxicos ambientales más comúnmente encontrados en el ambiente y sus efectos en salud.

Los metales tóxicos producen alteraciones cognitivas (déficits en aprendizaje, memoria y atención), trastornos motores (movimientos descoordinados o rigidez), trastornos psiquiátricos (ansiedad, depresión o cambios de comportamiento), y la exposición prolongada a ellos se asocia a enfermedades neurodegenerativas tales como Alzheimer, Parkinson y esclerosis lateral amiotrófica.

No existe a la fecha un tratamiento específico para neutralizar el envenenamiento por metales. Sin embargo, se han empleado agentes quelantes hidrosolubles para neutralizar la disponibilidad de estos compuestos en humanos intoxicados. Los agentes quelantes actúan uniéndose irreversiblemente al

metal para formar complejos inocuos e hidrosolubles que son eliminados por el organismo, principalmente a través de la orina.

Entre los que se han empleado están BAL (British Anti-Lewisite o dimercaprol, para As, Hg y Pb), DMPS (ácido 2,3-dimercapto-1-propanosulfónico, para As, Hg y Pb), DMSA (ácido meso-2,3-dimercatosuccínico o succimer, para As, Hg y Pb), ácido etilendiaminotetraacético (EDTA, para Pb), penicilamina (β,β -dimetilcisteína, para As, Hg y Pb) (Ferrer, 2003).

La prevención, detección temprana y la desintoxicación son esenciales para minimizar sus efectos en poblaciones expuestas.

Además de los daños a la salud producidos por los metales o metaloides, ellos representan un riesgo importante a la flora y fauna. Se sabe que estos compuestos disminuyen la fertilidad del suelo de donde las plantas los absorben afectando su crecimiento en la medida en la que son concentrados (magnificación de la cadena trófica) (Hernández-Caricio *et al.*, 2022).

En animales ambientalmente expuestos se han reportado afectaciones metabólicas, inmunológicas, físicas y reproductivas (López Alonso *et al.*, 2002).

CONCLUSIONES

Los metales y metaloides tóxicos son compuestos ubicuos en el ambiente cuya concentración depende de la naturaleza del suelo, pero también de actividades antropogénicas relacionadas con la explotación de minerales, que aumentan su concentración. Los seres humanos se han expuesto desde la antigüedad a metales tóxicos que han mejorado la calidad de vida, pero que también han llevado a efectos dañinos a la salud.

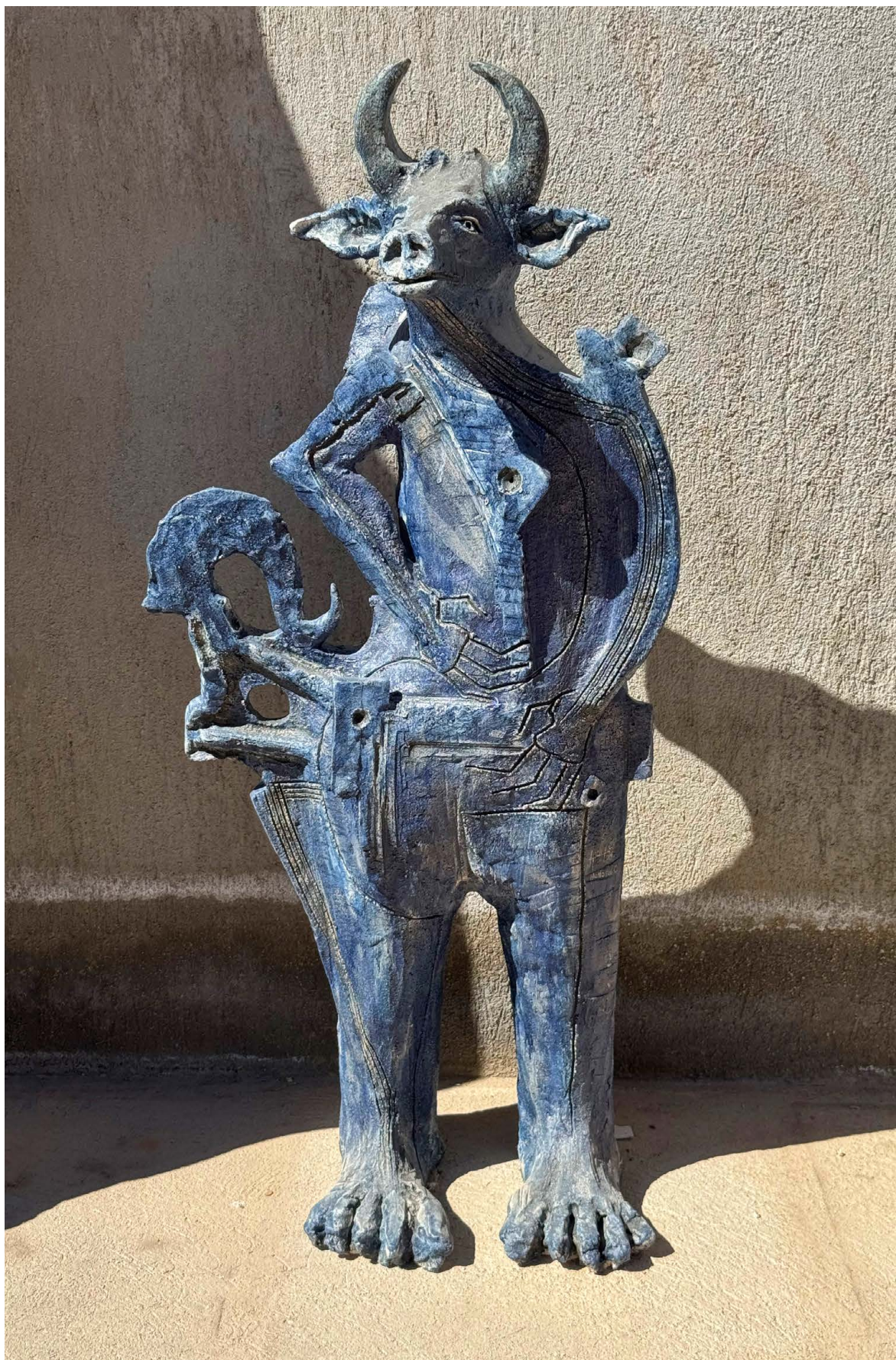
El cerebro es un órgano blanco de los efectos dañinos de estos contaminantes; los efectos más documentados en niños y adultos son disminución de la capacidad de aprendizaje y memoria, lo que impacta en la calidad de vida de las poblaciones.

Si bien metales como Zn, Mn, Co y Se son vitales para el organismo, otros como el Pb, Cd, Hg y As son venenos crónicos y silenciosos. Por ello, es necesario el constante monitoreo ambiental de estos compuestos con el fin de limitar la exposición, proteger a la flora y fauna y a las poblaciones humanas, sobre todo a las más susceptibles como los niños y adultos mayores.

REFERENCIAS

- De la Torre-Munilla P, Vicente-Vicente L, Prieto M, Casanova AG y Morales AI (2001). Neurotoxicidad por exposición a metales pesados. *Revista de Toxicología* 38:103-108.
- Ferrer A (2003). Intoxicación por metales. *ANALES del Sistema Sanitario de Navarra* 26:141-153.
- Hernández-Caricio C, Ramírez V, Martínez J, Quintero-Hernández V, Baez A, Munive J y Rosas-Murrieta N (2022). *Alianzas y Tendencias BUAP* 7:1-68.
- Londoño-Franco LF, Londoño-Muño PT y Muñoz-García FG (2015). Los riesgos de los metales pesados en la salud humana y animal. *Biotechnología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial* 14:145-153.
- López Alonso M, Miranda M, Castillo C, Hernández J y Benedito JL (2002). Interacción entre metales tóxicos y esenciales en ganado vacuno de Galicia. *Revista de Toxicología* 19: 69-72.
- Ramos-Chávez LA, Rendón-López CR, Zepeda A, Silva-Adaya D, Del Razo LM and Gonshebb ME. (2015). Neurological effects of inorganic arsenic exposure: altered cysteine/glutamate transport, NMDA expression and spatial memory impairment. *Front Cell Neurosci.* 9:1-12.
- Rodríguez-Heredia D (2017). Intoxicación ocupacional por metales pesados. *MEDISAN* 21:33-72.
- Smith KR, Corvalan CF and Kjellstrom T (1999). How much global ill health is attributable to environmental factors? *Epidemiology* 10:573-584.
- Téllez-Rojo MM, Ríos-Blancas MJ, Lerma-Treviño C, Bautista-Arredondo LF, Spearman S, Marsh L, Burkart K, Stanaway J, Ashbaugh C, Brauer M y Hurtado-Díaz M (2023). Análisis de la carga de enfermedad atribuible a los factores de riesgo ambientales en México en el período 1990-2021. Identificación de avances, rezagos y emergencias. *Gaceta Médica de México* 159:532-542.
- Vargas-Marcos F (2005). La contaminación ambiental como factor determinante de la salud. *Revista Española de Salud Pública* 79:117-127.

Lucio Antonio Ramos-Chávez
Martha León-Olea
Laboratorio de Neuromorfología Funcional
Dirección de Investigaciones en Neurociencias
Instituto de Nacional de Psiquiatría
Ramón de la Fuente Muñiz-SSA
marthalo@inprf.gob.mx



© **Honorio Cruz.** *Minotauro 2.* Cerámica de alta temperatura, 111 × 51 × 30 cm.



© **Honorio Cruz**. Detalle del *Minotauro 2*. Cerámica de alta temperatura, 111 × 51 × 30 cm.

Movimientos migratorios en aves: métodos para su rastreo

Luz E. Zamudio-Beltrán
Blanca E. Hernández-Baños

En el mundo existen animales que llevan a cabo movimientos estacionales a grandes distancias con un mismo objetivo: sobrevivir. Ejemplos contrastantes de estas migraciones los podemos ver en las mariposas monarca, insectos que realizan viajes hasta de 4,000 km de distancia a finales del verano e inicios del otoño, desde Estados Unidos y Canadá hasta México; o los viajes realizados por las ballenas, mamíferos que de forma estacional buscan mejores condiciones para poder llevar a cabo la procreación y crianza de los ballenatos.

Entre el gran número de organismos que realizan este tipo de viajes destacan las aves, uno de los grupos más estudiados por los biólogos y del que, irónicamente, queda mucho por descubrir.

Desde los primeros estudios sobre aves migratorias ha existido un enorme interés por conocer los tiempos que las aves requieren para hacer sus travesías, los patrones estacionales de los movimientos migratorios y las rutas que siguen las diferentes poblaciones de una misma especie para llegar a sus sitios de destino.

Es importante recordar que las aves viajan largas distancias a inicios del otoño con el objetivo de buscar lugares con mejores condiciones ambientales y con una mayor disponibilidad de recursos durante la temporada invernal. Esto quiere decir que la migración implica huir de los sitios

de reproducción anual debido a las condiciones estacionales adversas. Así, pues, las aves migratorias tienen distribuciones geográficas diferentes durante el ciclo anual y, por tanto, tienen hábitats específicos durante la temporada de reproducción y hábitats específicos durante la temporada de invierno. El término “conectividad migratoria” hace referencia a los patrones de movimiento de las aves y nos brinda información muy importante sobre los ciclos de migración anual. Saber hacia dónde viajan las aves implica conocer también los sitios de partida y descanso, los sitios de alimentación y sus destinos finales, todo con el fin de identificar los hábitats y las condiciones en las que estos se encuentran.

A lo largo de los años se han empleado diferentes estrategias y herramientas para conocer los patrones de movimiento de las aves durante el ciclo anual. En general, estos métodos se pueden clasificar de acuerdo con el tipo de marcadores utilizados, ya sea marcadores indirectos o extrínsecos (externos al ave) o marcadores directos o intrínsecos (que forman parte del ave) (Albert *et al.*, 2018).

A continuación, se explican de forma general las metodologías más utilizadas para detectar movimientos migratorios en aves, de acuerdo con los tipos de marcadores utilizados. Dentro de las metodologías que utilizan marcadores externos están el anillamiento de individuos y la colocación de dispositivos electrónicos; mientras que en las metodologías que emplean marcadores internos están el uso de isótopos estables y el uso de información genética.

ANILLAMIENTO

El anillamiento de aves es una actividad que tuvo sus orígenes en los trabajos del ornitólogo danés Hans Christian Cornelius Mortensen, en el año de 1899 (Baillie *et al.*, 2009). Desde entonces, esta técnica ha sido empleada para entender las dinámicas poblacionales de las aves, así como para obtener información sobre su conducta, ecología y evolución. Existen protocolos estandarizados para realizar el anillamiento de aves. El método implica

el entrenamiento y certificación previos de los especialistas que realizarán esta actividad. El objetivo se centra en colocar anillos metálicos con códigos únicos a diferentes individuos, los cuales podrán ser recapturados en distintos sitios a lo largo de su ciclo anual. De esta forma se puede obtener información valiosa sobre los movimientos que realizan las aves.

En algunos casos, se llevan a cabo monitoreos en sitios específicos que no necesariamente pertenecen a los sitios de partida de las poblaciones migratorias. En este sentido, no se obtiene información sobre el sitio de donde se inicia la migración, pero sí sobre la temporalidad y los sitios que funcionan como escalas para descanso y uso de recursos durante las largas jornadas de vuelo.

Hay estudios que con el empleo de este método han logrado obtener información muy importante sobre la biología de diferentes grupos de aves. Un ejemplo es el trabajo realizado por un equipo de especialistas y voluntarios que durante los últimos 18 años han monitoreado poblaciones de colibríes en Canadá, Estados Unidos y México (The Hummingbird Conservation Networks). Uno de los éxitos más recientes fue la recaptura de una hembra de zumbador garganta rayada (*Selasphorus calliope*), anillado en mayo del 2017 en las montañas Chiricahua en Arizona, Estados Unidos; el ejemplar fue recapturado en mayo del 2022 en Sheridan, Wyoming, Estados Unidos (Figura 1). Otro caso relevante y reciente fue la recaptura de un macho de colibrí magnífico (*Eugenes fulgens*), el cual fue anillado por primera vez hace diez años; aquí resalta la importancia de este tipo de estudios al brindar información no solo sobre los movimientos migratorios, sino también sobre la biología de las especies y de su esperanza de vida.

Una de las principales desventajas del anillamiento radica en que la tasa de recaptura puede llegar a ser muy baja, como en el caso de pequeñas aves con menos del 0.01 % (Hobson, 2003), por lo que, en proporción, la cantidad de información que se obtiene es menor al esfuerzo realizado. Así mismo, se deben considerar los recursos necesarios para la operación de los sitios de monitoreo y el seguimiento de estos a largo plazo, incrementando

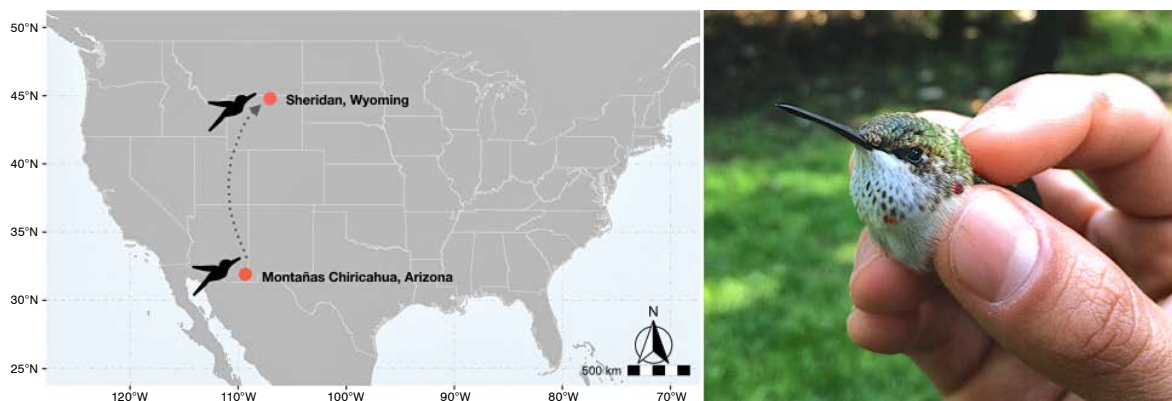


Figura 1. Sitios de migración de un individuo de *Selasphorus calliope*. Registro obtenido a partir del método de anillamiento por la red de monitoreo de colibríes Hummingbird Monitoring Network. Sitio de anillamiento: montañas Chiricahua (Arizona, EUA). Sitio de recaptura: Wyoming (EUA). Fotografía de Genaro Rodríguez Otero.

los costos. Para que el anillado proporcione información útil es necesario recapturar a las aves marcadas, lo cual en ocasiones es una limitante para la obtención de datos en estudios a corto plazo. Otro punto importante es que se requiere de personal capacitado para llevar a cabo el anillamiento de aves, ya que la manipulación y captura de aves, si no se realiza de la forma correcta, puede generar estrés o lesiones en algunos casos.

GEOLOCALIZADORES

Este tipo de dispositivos electrónicos permite rastrear aves con una gran precisión. De forma general, esta tecnología recopila información sobre la posición geográfica real de un individuo a través de sistemas de posicionamiento global (GPS), por señales satelitales o por radiofrecuencia.

El uso de estos dispositivos en el pasado tenía desventajas derivadas de su tamaño y peso, por lo que estaban destinados solamente a las aves de mayor tamaño. Esta limitante se ha reducido con el paso del tiempo, ya que los avances en la tecnología han permitido el desarrollo de dispositivos más compactos. Un estudio que evidenció la ventaja de contar con dispositivos de menor tamaño fue el realizado por un grupo de investigadores en Europa, quienes colocaron geolocalizadores de un peso aproximado de 1.4 gramos a varios individuos de charrán ártico (*Sterna paradisaea*, cuyo peso oscila alrededor de

los 125 gramos), de los cuales pudieron recuperar 11 dispositivos en el siguiente ciclo anual (Egevang *et al.*, 2010). En este estudio se mostró que los trayectos recorridos por esta especie eran mayores de los que se tenía pensado: más de 80,000 km en total durante el ciclo anual por algunos individuos; también se identificó una región como un sitio de descanso que se desconocía (Figura 2). Esta migración es considerada como una de las más largas realizadas por cualquier animal en el mundo. Otro ejemplo sobresaliente en el uso de estos dispositivos compactos es el reciente estudio donde se colocaron geolocalizadores en diferentes individuos de colibrí gigante (*Patagona gigas*) y se lograron recuperar 7 de 47 dispositivos al término de dos años de monitoreo (Williamson *et al.*, 2024). A partir de este estudio se encontró que algunos cambios evolutivos en el comportamiento migratorio de esta especie permitieron la expansión de su hábitat, lo que condujo a un proceso de especiación. Este proceso de especiación ha resultado en poblaciones residentes que se han adaptado a grandes altitudes en las montañas de los Andes, y en poblaciones migratorias.

De las poblaciones migratorias, consideradas ahora una especie diferente (*Patagona chaski*), se logró describir sus movimientos durante el ciclo anual y se encontró que llevan a cabo una migración de alrededor de 8,300 km con un ascenso altitudinal

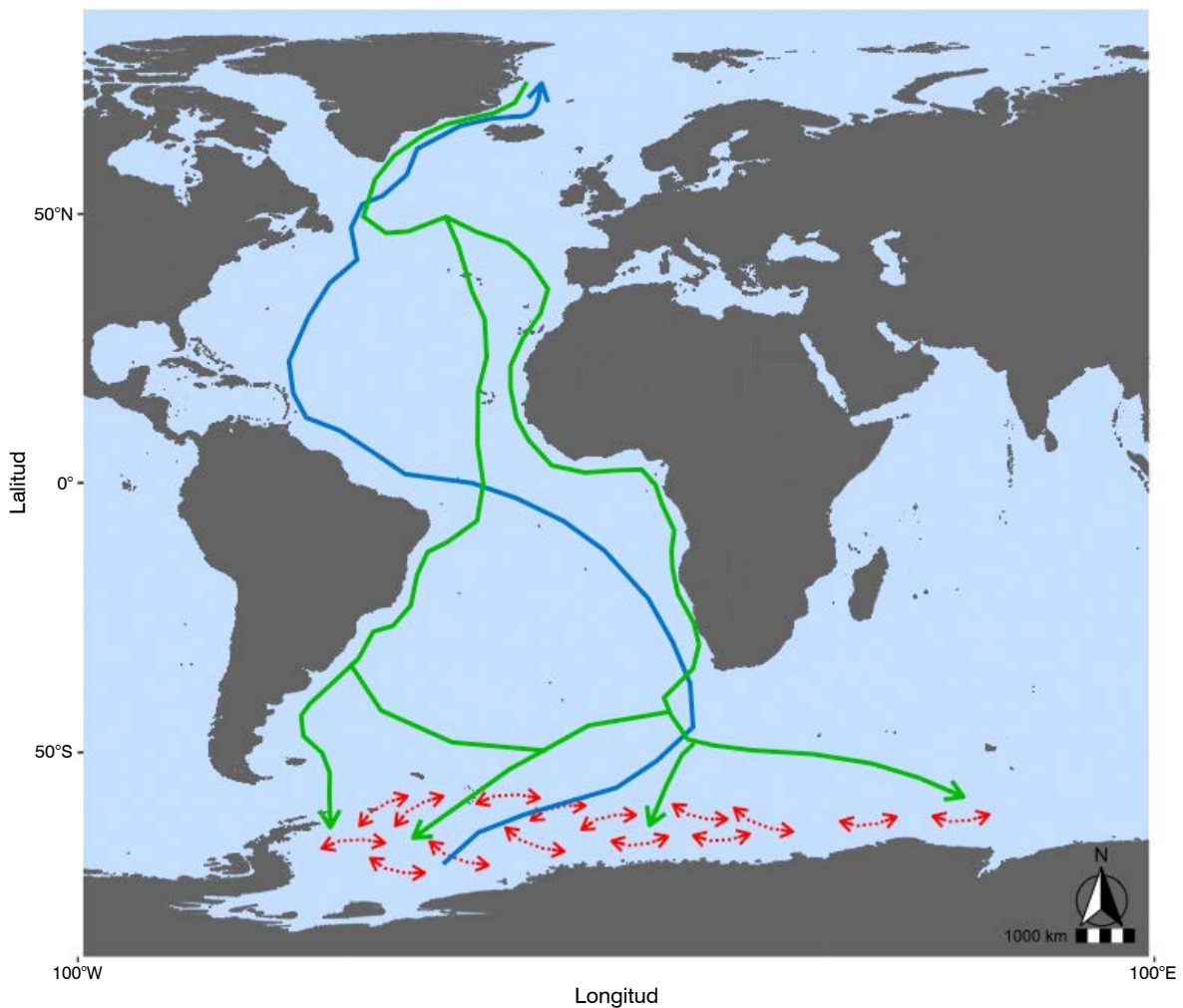


Figura 2. Movimientos migratorios del charrán ártico (*Sterna paradisaea*) durante el ciclo anual: migración después de la época reproductiva (verde), época invernal (rojo), migración posinvierno (azul). Se observan diferentes patrones de movimiento durante la migración hacia los sitios de invierno: uno por el este del océano Atlántico y otro por el oeste. Imagen modificada de Egevang *et al.*, 2010.

de aproximadamente 4,100 metros en tres semanas. Los datos obtenidos a partir de los geolocalizadores ayudaron a describir los patrones de migración y a entender cómo se lleva a cabo la aclimatación desde los sitios de origen a nivel del mar, hasta los sitios de destino, con elevaciones arriba de los 4,000 metros, simulando la aclimatación que realizan los montañistas con descansos y ascensos graduales.

Una de las mayores desventajas del uso de geolocalizadores es que, en ocasiones, se requiere recuperar cada dispositivo para poder descargar la información almacenada durante el viaje de cada individuo. Es importante mencionar que los dispositivos

podrían llegar a perderse debido a diversos factores como, por ejemplo, el desprendimiento del dispositivo del ave, el desgaste de la batería, la depredación o muerte del ave, fallas en los dispositivos, entre otras. A pesar de que el costo de estos dispositivos ha disminuido con los años, resulta ser una técnica más costosa en comparación con el anillamiento. Además, se deberá tomar en cuenta el equipo adicional que se requiere (por ejemplo, el equipo de cómputo y el *software* especializado para el manejo de datos) y la capacitación de personal. De igual forma, la precisión de los datos estará en función del tipo de dispositivo electrónico utilizado, ya que algunos equipos tienen errores de distancia mayores; existe también la limitante de la duración de la batería de cada dispositivo.

A pesar de que los geolocalizadores modernos son más pequeños y livianos, podrían tener un impacto en el comportamiento de algunas aves o interferir con el vuelo, lo que también deberá tomarse en cuenta.

ISÓTOPOS ESTABLES

Los isótopos de un elemento tienen el mismo número atómico (mismo número de protones en su núcleo), pero difieren en su número de masa (es decir, en el número de neutrones). Los isótopos pueden ser estables, o sea, que permanecen sin cambio a través del tiempo; o inestables, los cuales tienden a desintegrarse. En general, los isótopos estables son los más utilizados en estudios geológicos, biológicos y de datación.

Los isótopos presentan variaciones en su abundancia relativa respecto de otros isótopos según la región geográfica y pueden integrarse con facilidad en los tejidos de los organismos a través de sus dietas. El conjunto de proporciones de los diferentes isótopos de un elemento en una muestra es lo que se conoce como firma isotópica. Para un análisis con isótopos estables, en el contexto de la migración, es necesario obtener la información asociada a estos marcadores a partir de una muestra de tejido corporal del ave. Por lo general, se obtienen las huellas de hidrógeno a partir de las plumas de las aves u otros tejidos como músculo, sangre o huesos. Con esto, se realizan inferencias; por ejemplo, sobre el lugar en el que se encontraba el individuo cuando la pluma muestreada creció. Cuando las aves se encuentran migrando utilizan recursos con diferentes composiciones isotópicas, según las diferentes zonas por las que pasen; de esta forma se pueden rastrear sus movimientos a lo largo del ciclo anual.

En un estudio llevado a cabo en el 2002 (Kelly *et al.*, 2002), se tomaron huellas isotópicas de plumas de individuos del chipe corona negra (*Cardellina pusilla*) en diferentes poblaciones durante la época reproductiva (Estados Unidos y Canadá), la época migratoria y la época invernal (México y Centroamérica). Con los datos obtenidos a partir de isótopos de hidrógeno, se obtuvo información sobre la temporalidad de la migración para esta especie, y se encontró que las

poblaciones con sitios reproductivos más al norte comienzan su migración más temprano durante el otoño. También se logró determinar que en la época reproductiva las poblaciones más norteñas viajan mayores distancias hacia el sur durante la época invernal. En un estudio más reciente se estimó la conectividad migratoria de la reinita protonotaria (*Protonotaria citrea*), un ave asociada a humedales que se reproduce en el noreste de Estados Unidos (Reese *et al.*, 2019).

En este estudio se analizaron isótopos estables de hidrógeno a partir de muestras de plumas, y se logró establecer los sitios de invierno más probables para la especie. Sin embargo, la precisión de los sitios de invernada inferidos a partir de los datos obtenidos en los sitios de reproducción fue limitada, y se obtuvo como conclusión una baja conectividad migratoria, lo cual indica que hay una baja coincidencia geográfica entre las poblaciones en los sitios de reproducción y las poblaciones en sus sitios de invierno; es decir, las aves que se reproducen en una región particular no necesariamente migrarán hacia una misma región invernal, sino que podrían migrar hacia diferentes sitios.

Hay que considerar que una de las desventajas en el uso de isótopos estables para el estudio de la migración es que se podrían identificar zonas geográficas generales sin la precisión adecuada para determinar ubicaciones específicas. Esto podría generar incertidumbre en cuanto a la variación que se pudiera presentar en una misma región geográfica, produciendo errores de interpretación de los datos. Esta metodología no permite seguir la trayectoria o ruta migratoria exacta de un ave, como sí lo hacen los otros métodos antes abordados, ya que solo brinda la información sobre áreas de origen o uso de hábitats específicos en el tiempo. Para la interpretación correcta de los datos obtenidos por esta técnica es necesario contar con mapas de referencia isotópica que muestren la variación de los isótopos en distintas áreas geográficas; sin embargo, no todas las regiones cuentan con mapas de referencia, sobre todo las zonas poco estudiadas con hábitats complejos.

Figura 3. *Cardellina pusilla*. A partir de diferentes métodos se obtuvo información sobre las rutas migratorias de esta especie. Mediante el uso de isótopos estables se logró conocer las principales rutas migratorias (Kelly et al., 2002), y mediante el uso de marcadores genéticos fueron determinados con mayor precisión los sitios de invierno para las diferentes poblaciones de esta especie (Ruegg et al., 2014). Fotografía de Anuar López López.



MARCADORES GENÉTICOS

Cada día es más sencillo y accesible obtener información genética de cualquier organismo. Los marcadores genéticos pueden brindar información general y de alta calidad para conocer la conectividad migratoria, es decir, la conexión que existe entre los sitios de reproducción y los sitios no reproductivos de las aves migratorias, entre muchas otras aplicaciones. Para la obtención de este tipo de información basta con tener una pequeña muestra de ADN, por ejemplo, de las plumas; o unas cuantas gotas de sangre de los especímenes. Estas herramientas moleculares han sido utilizadas con gran éxito en estudios de aves que se reproducen en Estados Unidos y Canadá (www.birdgenoscape.org), las cuales migran hacia la región neotropical durante el invierno. Muchas de estas aves tienen distribuciones geográficas muy amplias o con condiciones ambientales diversas, lo que podría implicar algún grado de aislamiento poblacional y ciertos patrones de diferenciación dentro de una misma especie. Esto es importante, ya que con el uso de esta técnica se pueden conocer los movimientos migratorios, no solo de la especie en estudio, también de cada una de las poblaciones diferenciadas a nivel genético.

Con esta metodología se busca en el genoma sitios que sean variables al comparar las diferentes poblaciones muestreadas. Estos sitios son conocidos como Sitios Polimórficos Únicos o SNPs (por sus siglas del inglés *Single Nucleotide Polimorphisms*). Sin embargo, obtener la información genética que nos ayude a distinguir entre las diferentes poblaciones no siempre es posible, ya sea por una baja calidad en el ADN obtenido, o por un número insuficiente de SNPs. Estos problemas fueron abordados por un grupo de investigadores (Ruegg et al., 2014) que desarrollaron una técnica para poder identificar sitios variables específicos y extraer la información asociada a los fragmentos de ADN cercanos a los sitios variables, a pesar de tener ADN en baja concentración. Estos investigadores realizaron un primer estudio en el que emplearon esta técnica para conocer los patrones de conectividad migratoria del chipe corona negra, *Cardellina pusilla* (Figura 3).

En este estudio se llevó a cabo un muestreo a lo largo de los sitios reproductivos de la especie, y se obtuvo información genómica que permitió la identificación de seis poblaciones genéticamente diferenciadas. De la misma forma, se obtuvieron muestras e información genética de los sitios de invierno y se identificaron las regiones variables específicas del genoma para cada población; así se logró identificar con gran detalle las rutas migratorias de esta especie. En un estudio posterior, con los datos obtenidos de

conectividad migratoria a partir de datos genómicos, se consiguió identificar las áreas geográficas prioritarias para su conservación, tanto en los sitios de reproducción como de invierno (Ruegg *et al.*, 2020).

Es importante destacar que una gran ventaja de este método es que, como ocurre con el uso de isótopos estables, no se requiere recapturar a los individuos para obtener la información deseada.

Se debe considerar que no siempre es posible asignar algunos individuos a áreas geográficas específicas, ya que esto dependerá de la estructuración poblacional a nivel genético, la cual en algunas especies puede ser baja, lo que limita la precisión de la asignación del lugar de origen. El uso de esta técnica requiere de tecnología avanzada y personal capacitado, incrementándose su costo relativo al número de muestras que se quiera analizar. Además, esta técnica requiere de un mayor número de muestras para obtener resultados confiables y significativos. En general, este método proporciona información sobre patrones a largo plazo basados en la estructura poblacional y la historia evolutiva, pero no se pueden detectar patrones como cambios de rutas recientes.

CONCLUSIONES

En el mundo existen diferentes programas de monitoreo de aves migratorias en los que se emplean diferentes estrategias para obtener información sobre esos animales. Este tipo de monitoreos cobra importancia en el presente, ya que se ha reportado una notable disminución en el número de individuos que migran por temporada.

Este fenómeno se debe en gran medida a la destrucción del hábitat, a la construcción de obstáculos o barreras (como parques eólicos), a la sobreexplotación y al cambio climático. Saber si las especies están disminuyendo sus números poblacionales debido a cambios en los sitios reproductivos, en los sitios de invierno o en los sitios de descanso, es crucial para la conservación de las aves a escala global.

Cada uno de los métodos aquí abordados cuenta con diferentes ventajas que pueden ser aprovechadas con base en los objetivos del estudio y la

información que se desee obtener. Sin embargo, todos ellos aportan información valiosa sobre las dinámicas poblacionales de las aves migratorias en su ciclo anual. Estas técnicas son cada vez más accesibles, lo que podría tener un impacto positivo en el monitoreo y conocimiento futuro de las rutas de aves migratorias. Recordemos que uno de los principales objetivos de su uso es la conservación de las aves y de los hábitats que visitan durante su ciclo anual.

REFERENCIAS

- Albert S, Ruegg K and Siegel R (2018). El uso de marcadores intrínsecos y extrínsecos para enlazar poblaciones de aves a través de las Américas. *Zeledonia* 22(1):8-20.
- Baillie SR, Robinson RA, Clark JA and Redfern CP (2009). From individuals to flyways: the future of marking birds for conservation. *Ring-birding & Migration* 24(3):155-161.
- Egevang C, Stenhouse IJ, Phillips RA, Petersen A, Fox JW and Silk JR (2010). Tracking of Arctic terns *Sterna paradisaea* reveals longest animal migration. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 107(5):2078-2081.
- Hobson KA (2003). Making migratory connections with stable isotopes. In Berthold P, Gwinner E and Sonnenschein E (Ed.), *Avian migration* (pp. 379-391). Springer Berlin, Heidelberg.
- Kelly JF, Atudorei V, Sharp ZD and Finch DM (2002). Insights into Wilson's Warbler migration from analyses of hydrogen stable-isotope ratios. *Oecologia* 130:216-221.
- Reese J, Viverette C, Tonra CM *et al.* (2019). Using stable isotopes to estimate migratory connectivity for patchily distributed, wetland-associated Neotropical migrant. *The Condor* 121(4):1-15.
- Ruegg KC, Anderson EC, Paxton KL *et al.* (2014). Mapping migration in a songbird using high resolution genetic markers. *Molecular Ecology* 23(23):5726-5739.
- Ruegg KC, Harrigan RJ, Saracco JF, Smith TB and Taylor CM (2020). A genoscape-network model for conservation prioritization in a migratory bird. *Conservation Biology* 34(6):1482-1491.
- The Hummingbird Conservation Networks. <https://www.savehummingbirds.org/>.
- Williamson JL, Gyllenhaal EF, Bauernfeind SM *et al.* (2024). Extreme elevational migration spurred cryptic speciation in giant hummingbirds. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 121(21):e2313599121.

Luz E. Zamudio-Beltrán
Blanca E. Hernández-Baños
Facultad de Ciencias
Universidad Nacional Autónoma de México
zbluze@ciencias.unam.mx



© **Honorio Cruz.** *El guardián del Cosmo 2.* Cerámica de alta temperatura, 202 × 73 × 30 cm.

Depredadores de su propia especie: el canibalismo en los insectos

Ricardo **Ramírez Romero**

Se dice que la palabra caníbal se usó por primera vez cuando Cristóbal Colón la escuchó de los arahuacos, un pueblo del Caribe. Estos utilizaban el término *caniba* para referirse a un pueblo vecino que poseía barcos y que, en ocasiones, se llevaba a algunos arahuacos, quienes nunca más volvían a ser vistos ya que, presuntamente, eran comidos (Nathan, 2006). Aunque el término surgió en un contexto humano, el canibalismo también se presenta en el reino animal, incluyendo a los insectos, tema de este trabajo. No obstante, si pensamos en el fenómeno del canibalismo, es probable que nos vengan a la mente imágenes un poco fuertes de personas comiendo a otras personas. Las películas y series populares han contribuido significativamente a esta percepción. Por ejemplo, recientemente la película *La sociedad de la nieve* ganó notoriedad al narrar la historia de los deportistas cuyo avión se estrelló en los Andes y que, como parte del esfuerzo por su supervivencia, se vieron obligados a alimentarse de sus compañeros que habían fallecido. Una serie estadounidense de ciencia ficción, *The Walking Dead*, muestra un futuro apocalíptico en el que existen zombis que devoran personas, y también grupos de humanos que practican el canibalismo en ese mundo devastado.

Sin embargo, a lo largo de la historia de la humanidad, el canibalismo no siempre ha sido visto como algo prohibido o negativo. Dependiendo de la época y la región, el

canibalismo ha sido parte de rituales religiosos, de guerra o de castigo, e incluso ha formado parte de la cultura de algunos pueblos (Nathan, 2006). Aunque todos los aspectos antropológicos del canibalismo son ciertamente interesantes, en este trabajo nos enfocaremos en analizar este fenómeno en el reino animal, con énfasis en el grupo de los insectos. Examinaremos algunos aspectos del canibalismo que se consideran negativos desde el punto de vista biológico, otros que se estiman positivos y los factores que pueden regular este comportamiento. Además, describiremos algunos temas de investigación con gran potencial para comprender mejor el papel de este fenómeno en los procesos ecológicos y sus potenciales aplicaciones, destacando la importancia de realizar investigaciones futuras en esta área.

EL CANIBALISMO EN LOS INSECTOS

Para entender mejor los diferentes aspectos del canibalismo en los insectos, primero precisaremos el concepto que usamos en esta lectura. En 1975, Fox lo definió de manera sencilla como la depredación intraespecífica, es decir, la depredación entre individuos de una misma especie. Si consideramos la depredación como el acto en el que un depredador ataca a su presa para consumirla, el canibalismo se define como el caso en que un individuo ataca a otro de su misma especie para comerlo (total o parcialmente), lo que generalmente resulta en la muerte de la presa. Con esta definición en mente, lo que hicieron los sobrevivientes de los Andes no sería considerado canibalismo, ya que consumieron a sus compañeros después de que estos habían fallecido. En cambio, las personas que en la serie *The Walking Dead* atacan y devoran a otras personas hasta causarles la muerte, sí estarían incurriendo en canibalismo.

El canibalismo se ha observado en varios grupos del reino animal, incluidos insectos, caracoles, peces, anuros, aves e incluso mamíferos (Fox, 1975). Durante mucho tiempo se creyó que el canibalismo era una respuesta mal adaptativa (que perjudicaba su supervivencia o reproducción), resultado del

hacinamiento en condiciones artificiales de laboratorio. Sin embargo, se ha establecido que el canibalismo desempeña un papel importante en la biología y ecología de diferentes especies, y que ocurre de manera natural. Aunque puede surgir como respuesta a la escasez de alimentos, también puede deberse a la competencia por recursos o incluso actuar como un mecanismo de supervivencia y adaptación. En el mundo de los insectos, el canibalismo se asocia frecuentemente con los insectos carnívoros, es decir, aquellos que se alimentan de otros insectos. Sin embargo, se ha encontrado que el canibalismo es aún más común entre insectos no carnívoros, como los herbívoros o los detritívoros, quienes lo utilizan para complementar su dieta, que carece de proteínas (Santana *et al.*, 2012).

Se estima que el canibalismo en insectos no carnívoros ocurre en alrededor de 130 especies de órdenes como Ortóptera (chapulines), Blattodea (cucarachas), Hemíptera (chinches), Coleóptera (escarabajos), Hymenóptera (hormigas y avispas), Lepidóptera (palomillas y mariposas) y Díptera (moscas y mosquitos) (Richardson *et al.*, 2010).

Uno de los ejemplos más conocidos de canibalismo en los insectos es el de algunas hembras de mantis que devoran la cabeza del macho durante la cópula. También se sabe que algunos escarabajos del estiércol, como los del género *Sphaeridium* (Coleóptera), exhiben un comportamiento altamente canibal, ya que sus larvas compiten agresivamente por los recursos y llegan a devorar a sus propios congéneres para sobrevivir.

A primera vista, el canibalismo puede parecer negativo, ya que implica la muerte de individuos de la misma especie, a veces incluso inducida por sus propios padres o parejas (como en el caso de las mantis). También podría acelerar la selección de los individuos caníbales en entornos de alta competencia o recursos limitados, favoreciendo (o no) adaptaciones que mejoren su supervivencia y éxito reproductivo. Además, se ha sugerido que puede reducir la diversidad genética y aumentar la dispersión de enfermedades (Sadeh y Rosenheim, 2016).

Por una parte, la diversidad genética podría disminuir si el canibalismo reduce el tamaño efectivo

de las poblaciones y favorece que los individuos caníbales, con mayor éxito reproductivo, aporten una proporción mayor de genes a la siguiente generación en comparación con otros individuos. Esta reducción en la diversidad genética podría limitar la capacidad de las especies para adaptarse a cambios ambientales. Por otro lado, el canibalismo puede incrementar la propagación de enfermedades al facilitar la transmisión horizontal (transferencia de patógenos entre individuos) de infecciones desde los huéspedes canibalizados hacia los caníbales. Sin embargo, ¿existen aspectos menos negativos o incluso beneficiosos del canibalismo en los insectos? De hecho, sí los hay y los exploraremos a continuación.

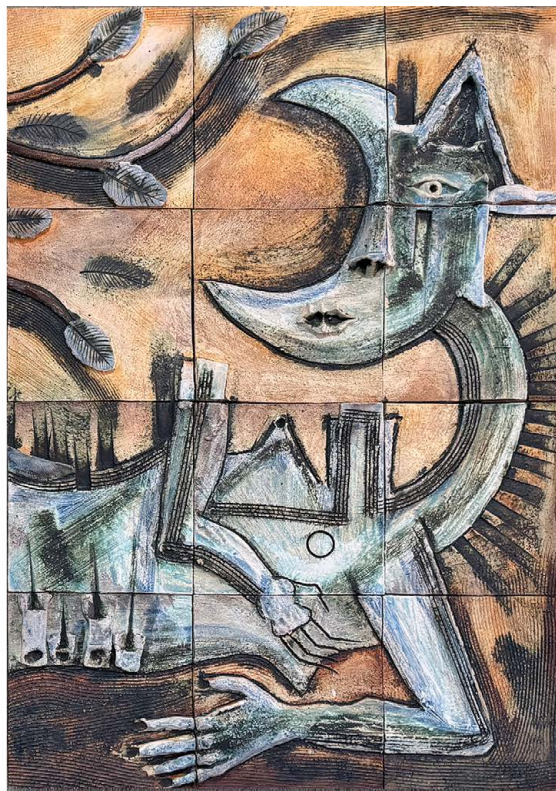
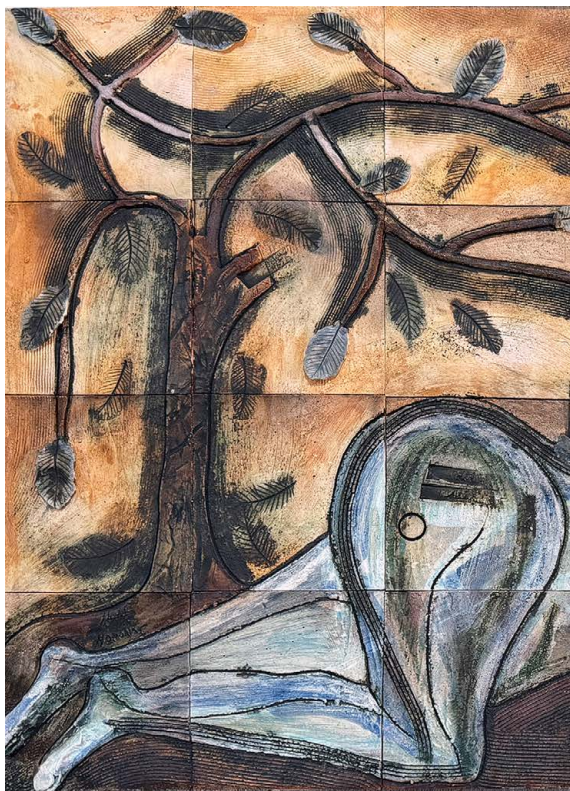
El canibalismo en los insectos puede tener efectos positivos e incluso ventajosos para la supervivencia

y reproducción de ese grupo animal. Al consumir a otros individuos de su misma especie, los insectos pueden obtener nutrientes esenciales que les permiten aumentar sus probabilidades de sobrevivir.

Esto es especialmente cierto para los estadios juveniles, como los huevos, que son ricos en energía y nutrientes, pero a la vez están desprotegidos, lo que los convierte en un blanco común para el canibalismo. Por ejemplo, en la especie de crisopa *Chrysoperla carnea* (Neuróptera), se ha observado que las larvas canibalizan los huevos cuando no tienen otras fuentes de alimento. Este comportamiento se intensifica en presencia de otras larvas debido probablemente al aumento de la competencia por los nutrientes. El canibalismo no solo aporta nutrientes, sino que también puede reducir la competencia por espacio, alimento o parejas sexuales.



© Honorio Cruz. Detalle de *El árbol de la vida 2*. Cerámica de alta temperatura, 121 x 191 cm.



© Honorio Cruz. *En descanso*. Mural en cerámica de alta temperatura, 112 × 160 cm.

En las hormigas león, por ejemplo, el canibalismo podría disminuir la competencia por el espacio al reducir la cantidad de individuos que compiten en una misma área.

Así mismo, en el escarabajo enterrador *Nicrophorus vespilloides* (Coleóptera) este comportamiento puede regular la competencia por alimento, ya que las larvas canibalizan a las crías recién nacidas, lo que asegura que los recursos disponibles se concentren en un menor número de individuos.

Además, el canibalismo puede ayudar al control del parasitismo dentro de una población de insectos. Las larvas de la plaga del trigo *Cephus cinctus* (Hymenóptera), por ejemplo, suelen canibalizar a crías recién nacidas parasitadas, lo cual reduce las tasas de parasitismo en la generación siguiente (Weaver *et al.*, 2005).

Un caso similar se observa en la polilla *Plodia interpunctella*, cuyas larvas canibalizan a sus congéneres parasitados por la avispa *Venturia canescens*.

FACTORES QUE PUEDEN INFLUIR EN EL CANIBALISMO

Existe bastante evidencia que sugiere que ciertos factores pueden influir en el canibalismo en los insectos, como la densidad poblacional, la disponibilidad y la calidad del alimento, la presencia de individuos vulnerables y las condiciones ambientales, como la temperatura y la humedad relativa. Examinemos estos factores con más en detalle.

1. *Densidad poblacional*: Se ha observado que cuando aumenta la densidad de individuos de la misma especie, también aumenta el canibalismo. Por ejemplo, en algunas libélulas como *Tramea carolina* (Odonata), un incremento en la densidad de larvas provoca un aumento en el canibalismo. Se cree que, en situaciones de alta densidad, el consumo de otros individuos de la misma especie proporciona un beneficio nutricional al canibal, además de eliminar posibles competidores.

2. *Disponibilidad y calidad del alimento*: Tanto la cantidad como la calidad del alimento pueden influir en el comportamiento canibal en los insectos.

Se ha documentado que, cuando el alimento escasea, insectos como las catarinas *Harmonia axyridis* y *Adalia bipunctata* (Coleóptera), que generalmente se alimentan de pulgones, aumentan sus tasas de canibalismo (Burgio *et al.*, 2002). De manera similar, cuando el alimento es de baja calidad y carece de nutrientes esenciales, las termitas tienden a consumir más individuos de su misma especie para cubrir sus necesidades nutricionales.

3. *Individuos en condición vulnerable*: Se ha observado que, incluso cuando hay suficiente alimento disponible, algunos insectos practican el canibalismo sobre individuos más vulnerables. Por ejemplo, en las abejas *Apis mellifera* y *Apis cerana*, las larvas macho diploides son canibalizadas. Esto podría deberse a que estas larvas son menos aptas para la reproducción en comparación con los machos haploides. Además, se cree que una feromona específica, conocida como la “feromona caníbal”, podría desencadenar este comportamiento.

4. *Temperatura y humedad relativa*: Las condiciones ambientales, como la temperatura y la humedad, afectan diversos parámetros fisiológicos y conductuales de los insectos, y el canibalismo no es una excepción. En crisopas (Neuróptera) y caballitos del diablo (Odonata), se ha observado que un aumento de la temperatura incrementa el canibalismo, posiblemente porque favorece la actividad y los encuentros entre individuos de la misma especie. Esto es particularmente interesante si consideramos que las temperaturas más altas, asociadas con el cambio climático, podrían estar provocando cambios conductuales en los organismos.

Aunque existe abundante evidencia que documenta cómo estos factores influyen en el canibalismo, aún quedan muchas preguntas sin respuesta, lo que es interesante porque se abren nuevos caminos y oportunidades.

Por un lado, aunque se ha documentado el efecto de ciertos factores en el canibalismo, en algunos casos hacen falta más estudios en condiciones de campo que ilustren estos efectos. Por otro lado, los mecanismos que explican estos efectos aún no están completamente claros y necesitan ser investigados. Además, investigaciones recientes sugieren

que el canibalismo es un fenómeno más complejo de lo que parece, regulado por relaciones más intrincadas que la simple influencia de un solo factor. Esto abre nuevas vías de investigación y desarrollo. Así, un fenómeno que a primera vista podría parecer simple (el hecho de que un individuo se coma a otro de su misma especie), en realidad oculta muchos aspectos desconocidos.

Descubrir estos aspectos podría ayudarnos a entender mejor su papel en la regulación de los organismos y sus comunidades, e incluso abrir la puerta a aplicaciones prácticas del conocimiento generado sobre este fenómeno. Imaginemos algunas posibilidades...

¿QUÉ SIGUE PARA EL FUTURO?

El canibalismo en insectos, lejos de ser un mero acto de supervivencia, podría ser la clave para entender cómo las especies interactúan y se adaptan a su entorno. Este campo, lleno de potencial, sin duda continuará siendo un tema de relevancia científica que invite a profundizar en sus misterios y aplicaciones futuras.

REFERENCIAS

- Burgio G, Santi F and Maini S (2002). On intra-guild predation and cannibalism in *Harmonia axyridis* (Pallas) and *Adalia bipunctata* L. (Coleoptera: Coccinellidae). *Biological Control* 24:110-116.
- Fox LR (1975). Cannibalism in Natural Populations. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics* 6:87-106.
- Lomeli-Flores JR y Ramírez-Romero R (2016). Insectos contra insectos: una alternativa para la protección de cultivos. *Elementos* 104:13-18.
- Nathan C (2006). *A History of Cannibalism from Ancient Cultures to Survival Stories and Modern Psychopaths*. Arcturus Pub. Lim. London.
- Orrock JL, Guiden PW, Pan VS and Karban R (2022). Plant induced defenses that promote cannibalism reduce herbivory as effectively as highly pathogenic herbivore pathogens. *Oecologia* 199:397-405.
- Richardson ML, Mitchell RF, Reagel PF and Hanks LM (2010). Causes and consequences of cannibalism in noncarnivorous insects. *Annual Review of Entomology* 55:39-53.
- Ryuda M, Nakayama H and Hayakawa Y (2008). A novel gene associated with intraspecific predation in *Spodoptera litura* larvae. *Applied Entomology and Zoology* 43:563-568.



© **Honorio Cruz**. *Sin título*. Cerámica de alta temperatura.

Sadeh A and Rosenheim JA (2016). Cannibalism amplifies the spread of vertically transmitted pathogens. *Ecology* 97:1994-2002.

Santana AFK, Roselino AC, Cappelari FA and Zucoloto S (2012). Cannibalism in Insects. In: Panizzi AR and Parra JRP (Eds). *Insect Bioecology and Nutrition for Integrated Pest Management*. CRC Press. Boca Ratón, Florida, USA.

Weaver DK, Nansen C, Runyon JB, Sing SE y Morrill WL (2005). Spatial distributions of *Cephus cinctus* Norton (Hymenoptera: Cephidae) and its braconid parasitoids in Montana wheat Wolds. *Biological Control* 34:1-11.

Ricardo Ramírez Romero
Departamento de Producción Agrícola, CUCBA
Universidad de Guadalajara
rramirez@cucba.udg.mx

Los mapas y la conservación de la biodiversidad

Diana Abilene **Ahuatzin Flores**
Susana **Maza-Villalobos**

La Tierra está habitada por una multiplicidad de formas de vida. Existen desde seres microscópicos que no podemos detectar a simple vista hasta grandes animales y plantas. Cada uno de estos organismos tiene características únicas que le permiten sobrevivir bajo diversas condiciones ambientales y, con esto, habitar diferentes ecosistemas. Esta gran variedad de organismos vivos recibe el nombre de biodiversidad o diversidad biológica, e incluye todas las especies de animales, plantas, hongos y microorganismos, así como los ecosistemas que habitan (selva, bosque, tundra, desierto, etc.) y los procesos ecológicos que resultan de la interacción de los organismos con su ambiente, como la polinización (Halfpeter, 1994).

México es uno de los países con mayor diversidad del planeta, junto con Brasil, Colombia, China e Indonesia. La topografía y el relieve, al originar una gran variedad de ecosistemas, podrían ser factores clave para facilitar la coexistencia de numerosas especies.

Por ejemplo, en el norte de México podemos observar grandes desiertos que son hábitat del famoso arbusto llamado gobernadora (*Larrea tridentata*) y de enormes osos negros (*Ursus americanus*); mientras que, en la región montañosa del sur de México, encontramos ecosistemas como el bosque mesófilo de montaña.



Figura 1. Mapoteca del Colegio de la Frontera Sur, Unidad San Cristóbal de Las Casas, Chiapas, México. Aquí se conservan mapas y planos con importantes registros históricos. En disciplinas como geografía, ecología y geología, los mapas se usan para analizar patrones, relaciones espaciales y procesos naturales. Fotografía: Diana Abilene Ahuatzin Flores.

Si bien la biodiversidad de México ha sido estudiada, todavía existen regiones de difícil acceso o subrepresentadas en los mapas, de las cuales se desconoce en gran medida qué especies las habitan, dónde se encuentran y qué funciones desempeñan en sus ecosistemas. Entonces, si no sabemos lo que hay en un lugar, ¿cómo podemos trabajar en su conservación?

LOS MAPAS EN LA CIENCIA

En general, un mapa es una representación visual a escala que ilustra un área geográfica o un espacio del mundo real. Un mapa contiene información como ubicaciones, características físicas, límites políticos, carreteras, ríos, montañas, ciudades y otros elementos.

Los mapas son almacenados y organizados en mapotecas, que son espacios para la conservación de documentos y registros históricos importantes (Figura 1).

Los primeros mapas surgieron como una respuesta a la necesidad humana de entender, explorar y representar el entorno y los aspectos de la realidad circundante. En muchos casos, los mapas representaban aspectos fantásticos e irreales de un mundo que recién comenzaba a ser explorado, como bestias monstruosas de los mares, seres míticos o tribus desconocidas de tierras lejanas.

A lo largo de la historia, los mapas han cambiado considerablemente y, actualmente, tienen diversas aplicaciones, pero sus orígenes están relacionados con la experiencia humana y con las primeras formas de comunicación y organización espacial (Membrado, 2015).

Utilizamos los mapas para navegar, planificar, educar, analizar y comunicar información relacionada con el espacio y la geografía.

Actualmente existen diversas aplicaciones en los celulares y otros dispositivos electrónicos que nos permiten ubicar lugares y crear rutas (Pérez-López y Maza-Villalobos, 2024).

Por lo tanto, los mapas son una herramienta esencial para la comprensión y visualización del mundo que nos rodea. Como ecólogos, uno de nuestros objetivos principales son delimitar procesos biológicos, como la polinización, y entender los espacios en que habitan las especies identificando aquellos que son cruciales para su desarrollo y supervivencia. En el campo de la ecología, los mapas se convierten en herramientas esenciales para visualizar, analizar y comprender datos relacionados con ecosistemas, especies y procesos ecológicos.

¿CÓMO PODEMOS SABER DÓNDE VIVE UNA ESPECIE?

Una manera efectiva es mediante la elaboración de mapas de distribución de especies o mapas de cobertura de suelo o tipos de vegetación. Este proceso consiste en recopilar datos sobre las ubicaciones de las especies y representarlos de manera visual. Estos mapas son herramientas esenciales para entender dónde se encuentran ciertas especies, cómo se distribuyen y qué factores son importantes para su distribución.

El primer paso, como científicos, es formular una pregunta de investigación que aborde un problema específico que deseamos resolver. En este caso, podemos centrarnos en cómo la biodiversidad responde a diferentes características del paisaje y factores ambientales, como la temperatura o la precipitación, utilizando una especie o grupo de especies (comunidad biológica) como modelo.

Por ejemplo, si quisiéramos investigar cómo afecta la deforestación de la selva a las especies que la habitan, podríamos seleccionar una especie bioindicadora para nuestro estudio. Las hormigas serían una excelente opción, ya que son abundantes y altamente sensibles a los cambios ambientales (Ahuatzin *et al.*, 2019).

Una vez que tenemos la pregunta de investigación y el grupo de estudio, es necesario definir el propósito del mapa. Si nuestro objetivo es entender cómo la deforestación de la selva afecta la distribución de las hormigas, debemos recopilar datos sobre la presencia de las especies en distintas áreas. Para ello, iremos a la selva a recolectar hormigas y determinar qué especies habitan en los sitios de interés.

Después de un proceso de identificación y observación detallada bajo el microscopio, podremos comenzar a elaborar el mapa de distribución (Ahuatzin *et al.*, 2019).

Existen diversos programas especializados en sistemas de información geográfica (SIG) que permiten cargar datos y crear mapas con distintos niveles de detalle y características observables en el mundo real (Membrado, 2015; Pérez-López y Maza-Villalobos, 2024).

En estos mapas, podemos aplicar capas de uso de suelo, características geográficas o áreas naturales protegidas, e incluir la información de los puntos donde encontramos las hormigas, es decir, las coordenadas geográficas. Además, utilizamos diferentes colores y símbolos para diferenciar patrones en el espacio o diversos tipos de ambientes (Ahuatzin *et al.*, 2019).

Finalmente, podemos analizar el mapa para identificar en qué lugares hay menos hormigas debido a la deforestación. Este análisis es sumamente relevante, ya que no solo nos permite conocer dónde habitan las hormigas, sino que también nos brinda la oportunidad de proponer medidas de conservación para la selva, destacando que existe una importante pérdida de especies de hormigas en lugares con poca selva.

Estos mapas se publican posteriormente en revistas especializadas para que otros científicos puedan revisarlos (Figura 2) (CONABIO, 2024). Esta labor es fundamental para comprender dónde viven las especies, su rango de distribución y los cambios en los patrones espaciales a largo plazo (Pérez-López y Maza-Villalobos, 2024).

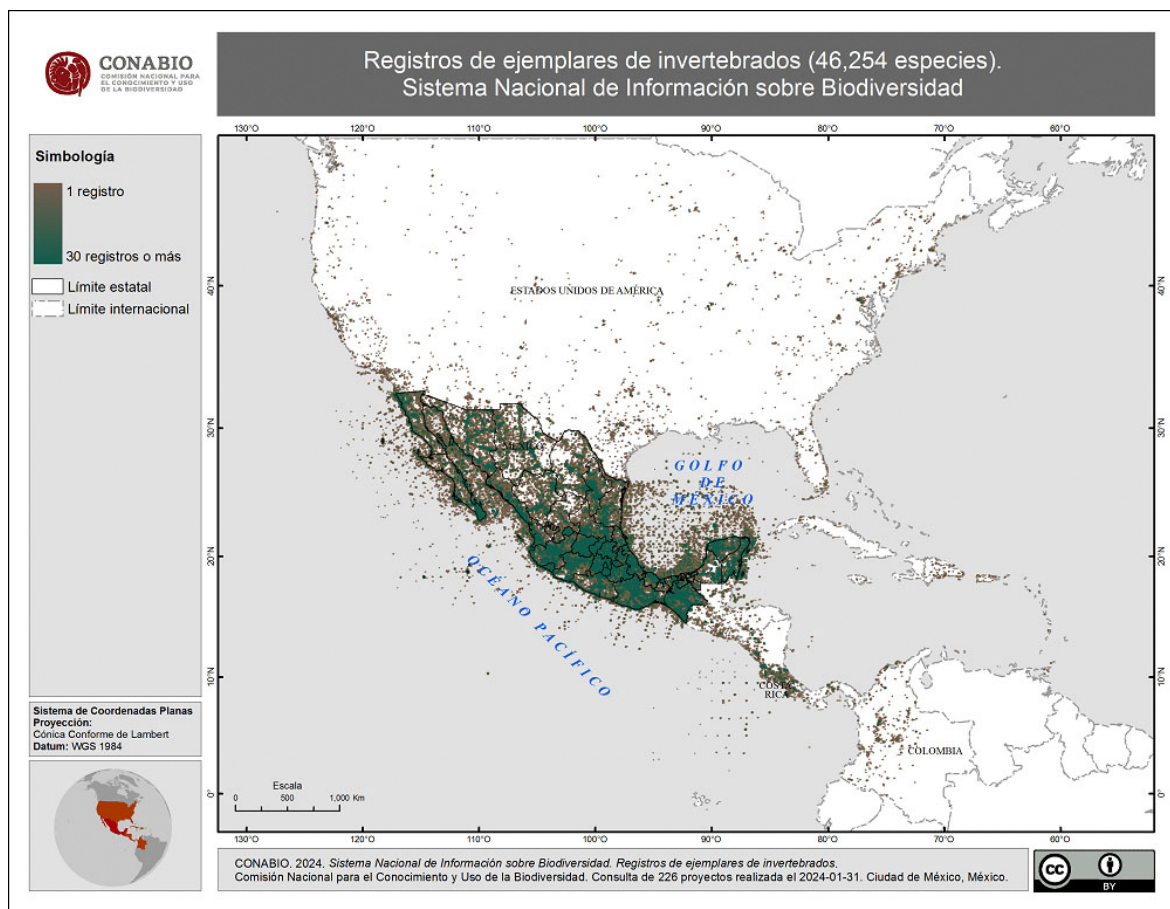


Figura 2. Mapa de distribución de invertebrados en México y zonas adyacentes. Este tipo de herramientas de análisis espacial nos permite no solo conocer la distribución actual de las especies, sino también predecir escenarios de riesgo como la pérdida de hábitats o extinciones masivas (Fuente: CONABIO, 2024).

¿PODEMOS PREDECIR DÓNDE VIVE UNA ESPECIE?

La respuesta es... ¡sí! Gracias a los avances en ciencia y tecnología se han desarrollado múltiples herramientas de análisis espacial que nos permiten predecir dónde podría vivir una especie. Sin embargo, esto requiere comprender una gran cantidad de factores ambientales que influyen en la distribución y el hábitat de la especie en cuestión. Los científicos han estudiado los patrones de distribución de las especies durante décadas, lo que ha permitido recopilar datos sobre la presencia y abundancia de la biodiversidad global (Illoldi-Rangel y Escalante, 2008). Esta información proviene de diversas fuentes, como datos históricos y recientes, observaciones de campo y bases de datos científicas (Lobo, 2000).

Al conocer los factores ambientales que afectan a una especie, tales como temperatura, precipitación, tipo de suelo, vegetación, altitud y disponibilidad de recursos como agua y alimento, los científicos han desarrollado modelos matemáticos que permiten generar mapas que predicen la distribución de la especie a nivel mundial. Estos modelos pueden incluso predecir su presencia en áreas aún no exploradas o simular escenarios de extinción de especies (Illoldi-Rangel y Escalante, 2008). Gracias a estas herramientas de análisis espacial, es posible predecir cómo podría cambiar la distribución de una especie debido a procesos como el cambio climático, la fragmentación del hábitat o la introducción de especies invasoras (González *et al.*, 2003; Santos y Tellería, 2006).

A pesar de que los modelos predictivos de distribución de especies están ganando mucho interés,

su implementación y uso enfrentan diversos desafíos. Es importante mencionar que varios de estos modelos también se generan con información de bases de datos disponibles en repositorios de Internet o de museos de historia natural. Los datos podrían estar limitados a áreas donde se han realizado estudios o donde hay mayor accesibilidad. Esto genera un sesgo espacial que puede distorsionar los modelos.

Así, también tenemos que considerar que los modelos suelen basarse en una “fotografía estática” de las condiciones en las que fueron obtenidos los datos, pero los factores ambientales y los hábitats cambian con el tiempo, especialmente bajo el cambio climático y la acción humana. Es por ello por lo que tenemos que hacer una correcta interpretación de los mapas, tomando en cuenta sus diferentes limitaciones.

Aunque aún queda un largo camino por recorrer, estas tecnologías son herramientas poderosas para el manejo y la conservación de la biodiversidad.

CONCLUSIONES

Un mapa es una representación visual a escala de un área geográfica o un espacio real. Los mapas contienen diversos tipos de información, según su propósito, y han evolucionado a lo largo del tiempo. Hoy en día son herramientas con diversas aplicaciones tanto en la vida cotidiana como en la ciencia y la tecnología.

Existen diversos tipos de mapas en ecología y, gracias a ellos, los científicos podemos identificar áreas de riesgo para la biodiversidad, como zonas de deforestación, contaminación o especies invasoras. Los mapas también muestran patrones climáticos que ayudan a los ecólogos a entender cómo las condiciones climáticas futuras podrían influir en la distribución de especies y ecosistemas. Es necesario mejorar la calidad y accesibilidad de datos, y asimismo, crear una colaboración interdisciplinaria con expertos en ecología, estadística, modelado y manejo ambiental para mejorar la robustez y aplicabilidad de los modelos.

AGRADECIMIENTOS

Al proyecto “Moderación del paisaje sobre patrones de biodiversidad: contribución a la teoría ecológica del paisaje” (320718) financiado por Ciencia Básica y/o Ciencia de Frontera: Paradigmas y Controversias de la Ciencia 2024, CONAHCYT. Beca posdoctoral (I1200/311/2023) del programa: Estancias Posdoctorales por México Convocatoria 2023(1).

REFERENCIAS

- Ahuatzin DA, Corro EJ, Jaimes AA *et al.* (2019). Forest cover drives leaf litter ant diversity in primary rainforest remnants within human-modified tropical landscapes. *Biodiversity and Conservation* 28:1091-1107. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10531-019-01712-z>.
- CONABIO (2024). Sistema Nacional de Información sobre Biodiversidad. Registros de ejemplares de invertebrados. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. Recuperado de: <http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/>.
- González Elizondo M, Jurado Ybarra E, González Elizondo MS *et al.* (2003). Cambio climático mundial: origen y consecuencias. *Ciencia UANL* 6(3).
- Halffter G (1995). ¿Qué es la biodiversidad? *Butlletí de la Institució Catalana d'Història Natural* 5-14.
- Illoldi-Rangel P y Escalante T (2008). De los modelos de nicho ecológico a las áreas de distribución geográfica. *Biogeografía* 3:7-12.
- Lobo JM (2000). ¿Es posible predecir la distribución geográfica de las especies basándonos en variables ambientales? *Proyecto Iberoamericano de Biogeografía y Entomología Sistemática: PriBES*, 200:55-68.
- Membrado JC (2015). El lenguaje cartográfico en los mapas temáticos. *Estudios Geográficos* 76(278):177-201.
- Morrone JJ (2019). Regionalización biogeográfica y evolución biótica de México: encrucijada de la biodiversidad del Nuevo Mundo. *Revista Mexicana de Biodiversidad* 90:e902980.
- Pérez LJJ y Maza-Villalobos MS (2024). De lo local al más allá: herramientas satelitales. *Elementos*. Recuperado de: <https://elementos.buap.mx/directus/storage/uploads/00000009825.pdf>.
- Santos T y Tellería JL (2006). Pérdida y fragmentación del hábitat: efecto sobre la conservación de las especies. *Ecosistemas* 15(2).

Diana Abilene Ahuatzin Flores
Susana Maza-Villalobos
El Colegio de la Frontera Sur
San Cristóbal de Las Casas
abline542@gmail.com

© **Honorio Cruz.** *El reparo del bravío.* Cerámica de alta temperatura.



El impacto de la contaminación en los diálogos de la naturaleza

Mónica **González-Domínguez**
David **Alavez-Rosas**

Las plantas y los insectos juegan un papel importante en nuestro planeta, ya que ofrecen beneficios para los ecosistemas como la polinización, el reciclaje de nutrientes o el control de plagas. Adicionalmente, tienen una influencia enorme en la economía, la salud humana y los recursos naturales. Tanto los insectos como las plantas se comunican mediante un lenguaje invisible que utiliza sustancias químicas para transmitir información. A estas moléculas se les conoce como semioquímicos, entre las que se encuentran las feromonas y los aleloquímicos (Alavez-Rosas *et al.*, 2023). Las feromonas modifican el comportamiento en organismos de la misma especie, son intraespecíficas. Pueden clasificarse de acuerdo a la función que tienen; por ejemplo, feromonas sexuales, de agregación, de alarma, etcétera. Por otra parte, los aleloquímicos tienen efecto entre especies, son interespecíficos. Existen aquellos que benefician al emisor y al receptor (sinomonas), los que solo benefician al emisor (alomonas), y los que solo benefician al receptor (kairomonas).

Esta hermosa sinfonía química puede ser apreciada cuando vemos cómo las hormigas siguen el rastro de sus compañeras, ya que utilizan una feromona que les ayuda a no perder la pista de regreso al nido. Las plantas también se comunican, incluso con otras especies, utilizando aleloquímicos. Por ejemplo, cuando el gusano

cogollero del maíz ataca a una planta, esta libera ciertas moléculas que atraen a una avispa, la cual parasita al gusano, disminuyendo así el daño a la planta (Roque-Romero *et al.*, 2020). A esto se le conoce como una interacción tritrófica, ya que se refiere a la relación entre tres niveles tróficos que involucran a un productor (la planta de maíz), un herbívoro (el gusano) y un depredador (la avispa). Las interacciones tritróficas son esenciales para regular poblaciones, transferir energía, fomentar la biodiversidad, reciclar nutrientes y aumentar la resiliencia de los ecosistemas.

Muchos de los semioquímicos que permiten la comunicación química en la naturaleza son compuestos orgánicos volátiles (COVs) y se transmiten por el aire. Los COVs pueden recorrer cientos de metros desde su fuente y ser detectables en concentraciones de solo unas pocas partes por mil millones por las plantas e insectos. Estas señales desempeñan un papel crucial en las interacciones ecológicas, pero son susceptibles a las perturbaciones provocadas por la contaminación del aire. En masas de aire contaminadas, su capacidad de viaje se reduce, ya que las señales pueden descomponerse rápidamente debido a reacciones químicas con los contaminantes, lo que les hace perder su especificidad (McFrederick *et al.*, 2009). Las actividades humanas relacionadas con la producción de energía, transporte, agricultura e industria, han resultado en la emisión de numerosas sustancias químicas a la atmósfera, muchas de las cuales son tóxicas o producen compuestos nocivos al quedar expuestas a la radiación ultravioleta. Los contaminantes más comunes son ozono (O_3), dióxido de carbono (CO_2), radicales nitrato (NO_3) y otros aerosoles orgánicos. En el ambiente, estos compuestos reaccionan con los semioquímicos, formando nuevas sustancias que alteran la comunicación e interacción de insectos y plantas, lo cual representa un grave peligro ambiental debido a su impacto en los organismos y en el ecosistema. Los contaminantes del aire como el ozono (O_3) y los radicales nitrato (NO_3), son oxidantes que degradan

los dobles enlaces carbono-carbono presentes en los COVs responsables de los aromas florales, y en feromonas de muchas especies, haciendo que las moléculas se descompongan (Jiang *et al.*, 2023). Esto ocasiona que la señal química específica deje de funcionar, lo cual causa un impacto negativo en las redes tróficas y en la aptitud de la planta o insecto (Chan *et al.*, 2024).

EL OZONO DESTRUYE LOS MENSAJES QUÍMICOS

El ozono es un componente natural de la atmósfera, que forma una capa protectora que limita el ingreso de radiación ultravioleta proveniente del Sol. Sin embargo, a nivel de la superficie, el ozono se convierte en un contaminante del aire. Las actividades humanas, como el uso de combustibles fósiles en la industria y en el transporte, generan concentraciones elevadas de ozono. Esta molécula actúa como un oxidante para los compuestos volátiles. La adición de O_3 a los dobles enlaces carbono-carbono, presentes en muchos semioquímicos, resulta en la formación de moléculas inestables que se descomponen muy rápidamente (Madronich *et al.*, 2023). Esta reacción química se conoce como ozonólisis, y cuando ocurre, el O_3 ataca los dobles enlaces provocando una ruptura de la cadena de carbono que resulta en la formación de productos oxigenados, como aldehídos, cetonas y ácidos carboxílicos. En otras palabras, el ozono rompe los enlaces dobles y transforma la molécula en nuevos compuestos, cada uno con sus propias características químicas, diferentes a la molécula original.

Generalmente, las feromonas de insectos contienen dobles enlaces en su estructura química, lo cual las hace susceptibles al ozono. Si una feromona se descompone debido al ozono, genera cambios negativos en la comunicación y el éxito reproductivo de muchos insectos. Por ejemplo, las palomillas hembras que emiten una feromona sexual para atraer a los machos; o los machos de las mariposas monarca que emiten una feromona para atraer a las hembras (Figura 1). Además, se ha reportado que los terpenos y terpenoides (semioquímicos de las plantas) también sufren cambios



Figura 1. Representación ilustrativa de cómo afectan las moléculas contaminantes a la comunicación en insectos. La mariposa monarca (*Danaus plexippus*) macho emite su feromona sexual para atraer a la hembra, sin embargo, en el medio ambiente la feromona interactúa con O_3 y el radical NO_3 , por lo que ocurre la ruptura de la estructura química de la feromona y da como resultado otros compuestos químicos que alteran el lenguaje de los insectos. Ilustración de Carlos Dafunk.

en su estructura química al entrar en contacto con el O_3 , lo cual genera un impacto negativo en la comunicación de las plantas con otras plantas o con insectos. Adicionalmente, el O_3 tiene la capacidad de bloquear las neuronas receptoras olfativas que se encuentran en las antenas de los insectos (Mc-Frederick *et al.*, 2009), lo cual complica la detección de los semioquímicos por el propio insecto e interfiere en la localización de alimento, pareja, sitios de oviposición, refugio, etcétera. En resumen, el ozono, al destruir los semioquímicos, produce la alteración de las interacciones entre plantas y polinizadores, herbívoros y sus enemigos naturales (interrumpiendo las cadenas tróficas), causa perturbaciones en el sistema planta-insecto y amenaza funciones clave en los ecosistemas. Por ejemplo, la disminución en la polinización puede llevar a una menor producción de semillas y frutos, lo que afectaría la disponibilidad de alimento para otros organismos, como aves y mamíferos.

EL CO_2 AFECTA LA PRODUCCIÓN, EMISIÓN Y PERCEPCIÓN DE LOS SEMIOQUÍMICOS

De forma natural, el CO_2 es un gas presente en el ambiente, aunque también se libera por la quema de compuestos que contienen carbono (petróleo, carbón, gas natural, entre otros). Debido a diversas actividades humanas, la cantidad de

este compuesto en la atmósfera ha aumentado a niveles que la naturaleza no puede procesar, lo que ha llevado a su acumulación. Las concentraciones elevadas de CO_2 , afectan la producción, emisión y percepción de los semioquímicos y, como consecuencia, alteran las interacciones dinámicas entre plantas e insectos, perjudicando el desarrollo de las plantas y modificando la distribución espacial de los insectos.

El CO_2 tiene una estrecha relación con las plantas, ya que estas lo utilizan para llevar a cabo la fotosíntesis. Sin embargo, a altas concentraciones, este compuesto disminuye las defensas químicas de las plantas. Un aumento en los niveles de CO_2 estimula la síntesis de ciertos metabolitos secundarios en las plantas, incrementando su producción de compuestos defensivos como flavonoides y terpenos; también altera la composición y concentración de los aleloquímicos, lo que modifica su efectividad contra herbívoros (Zavala *et al.*, 2008).

Para los insectos, el CO_2 actúa como una señal sensorial que les ayuda a orientarse en muchos comportamientos biológicos. Se sabe que el CO_2 es percibido bioquímicamente en receptores especializados, llamados receptores olfativos, ubicados en las antenas de los insectos. Los receptores olfativos son proteínas cuya función es detectar moléculas

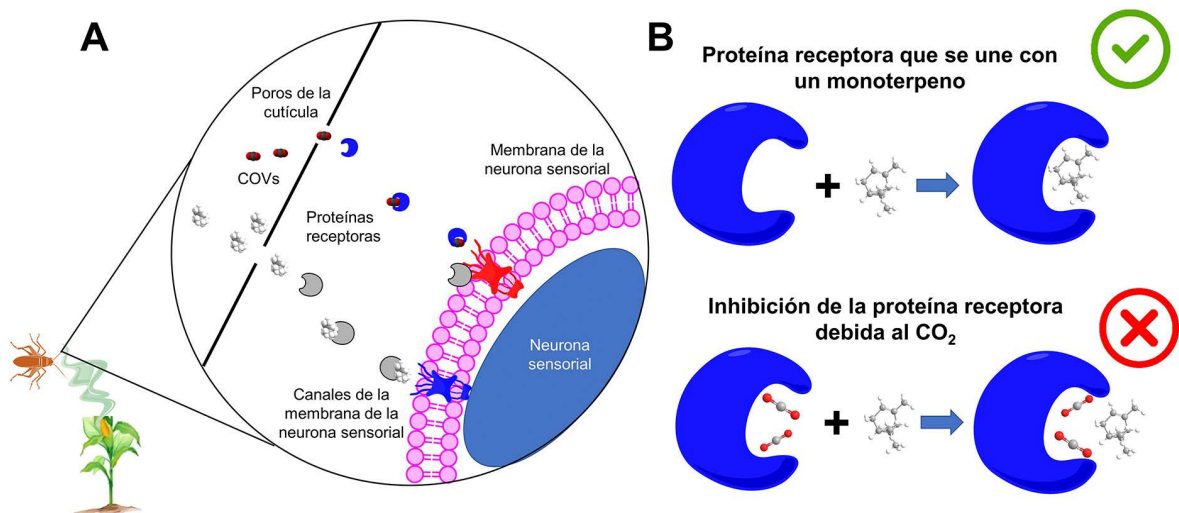


Figura 2. A) Representación esquemática de la percepción de los COVs en las antenas de los insectos; B) Una proteína receptora que se une al monoterpeno α -pineno, y cuando se encuentra bloqueada por moléculas de CO_2 , no se puede unir al compuesto. Imagen de creación propia.

presentes en el aire y llevarlas hacia las neuronas sensoriales dentro de las antenas; en el proceso se generan señales eléctricas que se envían al cerebro, donde se procesan para identificar el olor y desencadenar respuestas conductuales (Figura 2A). Los receptores olfativos tienen un sitio activo, que es la región donde se unen los semioquímicos (Schmidt y Benton, 2020). Ante concentraciones elevadas del CO_2 , estos sitios activos de las proteínas receptoras pueden bloquearse (Figura 2B), afectando así todas las interacciones de los insectos guiadas por semioquímicos, lo que puede provocar deficiencias en la búsqueda de alimento o en la oviposición, así como comportamientos erráticos en la búsqueda de pareja (Karthik *et al.*, 2021).

Se han realizado experimentos en los que se expuso a plantas y a insectos a cantidades elevadas de CO_2 , y se ha comprobado que los polinizadores o dispersores de semillas se confunden con las fragancias emitidas por las flores, lo cual reduce la reproducción y aptitud de las plantas. Por otro lado, los insectos plaga han desarrollado cierta adaptabilidad y han aumentado su tasa de supervivencia y potencial de daño, intensificando así el impacto en los cultivos de importancia económica (Johnson *et al.*, 2020).

LOS RADICALES NITRATO DEGRADAN LOS MENSAJES QUÍMICOS DE LAS PLANTAS

Estos contaminantes se forman debido a la oxidación del nitrógeno atmosférico (principal componente del aire) como resultado de procesos de combustión en el tráfico vehicular, la aplicación de fertilizantes y la quema de materia orgánica.

Los radicales nitrato son oxidantes muy fuertes que reaccionan rápidamente con los COVs emitidos por las flores, comúnmente con terpenos. Usualmente, los terpenos tienen en su estructura química enlaces dobles carbono-carbono, lo cual los hace susceptibles a ser oxidados por radicales NO_3 .

En este proceso, los radicales nitrato atacan a los enlaces dobles carbono-carbono de los terpenos, lo que da lugar a una serie de reacciones que conducen a la ruptura de enlaces y a la formación de nuevos compuestos. Este tipo de reacción es característica de los procesos de oxidación vía radicales libres, los cuales son altamente reactivos y generan una amplia variedad de productos químicos como aldehídos, cetonas o ácidos carboxílicos. Esto hace que los polinizadores pierdan el rastro de las plantas e interrumpa la polinización.

Asimismo, los radicales NO_3 destruyen los semioquímicos que muchas especies de plantas utilizan para comunicarse con otras plantas, lo que causa



Figura 3. Gusanos de las harinas (*Tenebrio molitor*) expuestos a diferentes concentraciones de CO_2 : A) estado de pupa del insecto; B) estado larval; C) estado adulto. Fotos de Dayana Galván (UATx).

un desequilibrio en las interacciones químicas entre plantas. Esto genera una pérdida de biodiversidad que modifica la dinámica de la comunidad y provoca la ruptura de los diferentes niveles tróficos presentes en los ecosistemas (Chan *et al.*, 2024).

En nuestro grupo de trabajo hemos comenzado a investigar cómo los niveles elevados de ozono y dióxido de carbono afectan la producción y la emisión de las feromonas sexuales del gusano de la harina (*Tenebrio molitor*). Este insecto, es considerado una plaga de los granos almacenados y de las harinas (Figura 3).

Es importante prever los escenarios en los que estos insectos podrían encontrarse en el futuro, para predecir el comportamiento de las plagas en un mundo con niveles elevados de O_3 , CO_2 y radicales NO_3 . Con estos datos podremos tomar medidas para el manejo de plagas y el aprovechamiento de especies benéficas, ya que se estima que, para el año 2050, la producción de contaminantes se duplicará.

CONCLUSIÓN Y PERSPECTIVAS

El planeta está experimentando cambios significativos en los niveles de contaminantes debido a la urbanización, la agricultura y la agroindustrialización. Como resultado de estas actividades humanas se han alterado aspectos fundamentales en insectos y plantas.

La contaminación del aire altera las funciones de los ecosistemas al interferir con los COVs que median las interacciones ecológicas y conductuales de los organismos.

En aire contaminado, estas señales recorren distancias más cortas ya que son destruidas por reacciones químicas con gases como O_3 y NO_3 . Estas reacciones afectan interacciones clave donde son cruciales las señales de larga distancia, como la polinización, la atracción de enemigos naturales de plagas, y feromonas que atraigan parejas.

Es necesario comprender los efectos que tienen los contaminantes sobre las interacciones entre los organismos para tomar medidas y evitar impactos ecológicos catastróficos.

Las condiciones climáticas futuras pueden fortalecer o debilitar el desempeño de ciertos insectos y las emisiones de compuestos por las plantas. Se espera un aumento en los niveles de O_3 , CO_2 y NO_3 y, por tanto, grandes impactos en las interacciones entre organismos.

Hacemos un llamado a hacer conciencia con respecto a esta situación, ya que las actividades humanas siempre tienen un efecto sobre los ecosistemas. Para intentar minimizar la huella humana en el lenguaje químico de los organismos, proponemos hacer estudios de impacto ambiental que

combinen herramientas de la ciencia atmosférica, la biología evolutiva y la ecología.

Con esto, podremos entender y minimizar las implicaciones del cambio que la contaminación provocada por los seres humanos genera en los ecosistemas modernos.

REFERENCIAS

Alavez-Rosas D, Córdoba-Aguilar A y Cruz-López L (2023). Semioquímicos, ¿compuestos clave para monitorear y controlar a las chinches chagásicas? *Elementos* 130:57-62. <https://elementos.buap.mx/post.php?id=787>.

Chan J, Parasumara S, Atlas R, Xu R, Jongleboed U, Alexander B, Langenhan J, Thorton J and Riffel A (2024). Olfaction in the Anthropocene: NO₃ negatively affects floral scent and nocturnal pollination. *Science* 383:607-611. <https://doi.org/10.1126/science.adi0858>.

Jiang N, Chang H, Weißflog J, Eberl F, Veit D, Weniger K, Hansson B and Knaden M (2023). Ozone exposure disrupts insect sexual communication. *Nat Commun* 14:1186. <https://doi.org/10.1038/s41467-023-36534-9>.

Johnson S, Waterman J and Hall C (2020). Increased insect herbivore performance under elevated CO₂ is associated with lower plant defence signalling and minimal declines in nutritional quality. *Sci Rep* 10:14553. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-70823-3>.

Karthik S, Sai M and Yashaswini G (2022). Climate Change and Its Potential Impacts on Insect-Plant Interactions. *IntechOpen*. <http://dx.doi.org/10.5772/intechopen.98203>.

Madronich S, Sulzberger B, Longstreth J, Schikowski T, Andersen M, Solomon K and Wilson S (2023). Changes in tropospheric air quality related to the protection of stratospheric ozone in a changing climate. *Photochem Photobiol Sci* 22:1129-1176. <https://doi.org/10.1007/s43630-023-00369-6>.

McFrederick Q, Fuentes J, Roulston T, Kathilankal J and Lerdau M (2009). Effects of air pollution on biogenic volatiles and ecological interactions. *Oecologia* 160:411-420. <https://doi.org/10.1007/s00442-009-1318-9>.

Roque-Romero L, Cisneros J, Rojas J, Ortiz-Carreón F and Malo E (2020). Attraction of *Chelonus insularis* to host and host habitat volatiles during the search of *Spodoptera frugiperda* eggs. *Biol Control* 140:1-10. <https://doi.org/10.1016/j.biocontrol.2019.104100>.

Schmidt H and Benton R (2020). Molecular mechanisms of olfactory detection in insects: beyond receptors. *Open Biol*. 10:200252. <http://doi.org/10.1098/rsob.200252>.

Zavala J, Casteel C, DeLucia E and Berenbaum M (2008). Anthropogenic increase in carbon dioxide compromises plant defense against invasive insects. *PNAS* 105(13):5129-5133. <https://doi.org/10.1073/pnas.0800568105>.



© Honorio Cruz. *El guardián del Cosmo 1*. Cerámica de alta temperatura, 201 × 82 × 31 cm, base: 15 × 70 × 40 cm.

Mónica González-Domínguez
Departamento de Ecología de Artrópodos
y Manejo de Plagas
El Colegio de la Frontera Sur unidad Tapachula
David Alavez-Rosas
Instituto de Ecología
Universidad Nacional Autónoma de México
alavezd@yahoo.com

Traspacios:

refugios para la biodiversidad

Susana Maza-Villalobos
José Armando Alayón Gamboa

Desde muy temprano, justo antes del amanecer, los ruidos de la selva y la casa empiezan a sentirse: el cantar de los gallos, el gruñir de los cerdos y los hermosos sonidos de aves cantoras que, posadas en los árboles, anuncian un nuevo día. En la cocina se oye el ir y venir de la familia; desde temprano ellos han acarreado la leña, encendido el fogón, puesto los frijoles y elaborado las tortillas.

El desayuno está servido: huevos con chaya, frijoles con manteca de cerdo, agua de limón, tortillas hechas a mano, y por si uno se queda con un hueco en el estómago, plátanos recién cortados. Todo proveniente del traspatio de esta familia maya.

Los traspacios, también conocidos como solares o huer-tos tradicionales, son pequeñas superficies de terreno, por lo regular menores a media hectárea, aledañas a la vivienda, organizadas y manejadas principalmente por las mujeres de la casa, quienes toman las principales decisiones sobre qué plantas y animales tener, así como sus cuidados y usos.

Los traspacios son agroecosistemas ampliamente distribuidos en el mundo, en donde se manejan plantas y animales; el tamaño de los traspacios y las especies que ahí se mantienen son diferentes, lo cual hace a cada traspatio único (Figura 1). De manera general, los animales y plantas que se crían en los traspacios pueden emplearse como alimento, medicina, combustible, adorno, etcétera.



Figura 1. Diversidad de plantas en un traspatio maya. Foto: Traspatio Maya.

Los traspacios incluso proporcionan servicios intangibles, como un espacio de tranquilidad o de reunión familiar (Ordóñez-Díaz, 2018).

En México, los traspacios combinan vegetación original del bosque o la selva con plantas cultivadas y animales domésticos o silvestres. Algunas especies datan de la época prehispánica, pero con el tiempo los traspacios se han enriquecido con la incorporación de plantas y animales provenientes de Asia, África y Europa.

Los traspacios son también espacios de selección y domesticación de especies vegetales y animales. En la región sureste y en la península de Yucatán no es raro que al mismo tiempo que se crían patos domésticos (*Cairina moschata*) se mantengan pijijis (*Dendrocygna autumnalis*); ni que los pavos domésticos (*Meleagris gallopavo*) convivan con algún pavo ocelado (*Meleagris ocellata*).

En el traspatio se reconstruyen las condiciones de los ecosistemas naturales con la finalidad de aprovechar los recursos sin destruirlos. Se trata de auténticos agroecosistemas donde los seres humanos interactúan con plantas y animales en ambientes hasta cierto punto controlados.

En México, los censos agrícolas no consideran los traspacios, por lo que no se tiene información certera sobre la superficie territorial que ocupan. Sin embargo, es posible hacer una estimación partiendo de datos del censo agrícola 2007 del INEGI y de información de la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). La FAO estima que el 12 % de las tierras cultivadas del mundo corresponden a traspacios, mientras que el INEGI afirma que en nuestro país existen 29,554 ejidos y 2,359 comunidades agrarias que abarcan 167.7 millones de hectáreas, de las 198.5 millones de hectáreas del campo mexicano. Si tomamos el porcentaje señalado por la FAO estaríamos diciendo que, en México, entre 20.1 y 23.8 millones de hectáreas estarían destinadas a traspacios.

EL TRASPATIO COMO RESERVA DE BIODIVERSIDAD

Por lo antes dicho, es innegable la importancia económica y cultural del traspatio como parte de las estrategias de vida familiares. Los traspacios representan fundamentalmente un espacio de selección y conservación de la biodiversidad regional resultantes del manejo humano.

La cercanía a las habitaciones humanas permite un tratamiento casi personalizado de plantas y animales y posibilita, por ejemplo, la selección de las mejores semillas provenientes del árbol que dio los frutos más grandes, o la protección de las gallinas (*Gallus gallus*) más ponedoras o cluecas y de los cerdos criollos (*Sus scrofa domestica*; Figura 2) más resistentes a las enfermedades o con mejores habilidades para el cuidado de sus crías.

Los animales del traspatio juegan un importante papel ecológico, social y cultural en las familias. Además de ser una fuente de proteína y energía para la dieta familiar, los animales juegan un papel fundamental como “ahorro vivo” para los tiempos de crisis,



Figura 2. Cerdo criollo, *Sus scrofa domestica*, con su cría. Foto: Armando Alayón Gamboa.

por ser un potencial recurso económico (Fraire-Cordero, 2019). Son parte también de las costumbres y rituales familiares (cumpleaños, ceremonias religiosas, rituales tradicionales como la acción de gracias por la cosecha) y fuente de medicina tradicional para el tratamiento de algunas enfermedades de filiación cultural, por ejemplo, los diagnósticos y “limpias” espirituales con uso de huevo.

Entre las especies animales más abundantes en los traspatios están las llamadas aves de corral, gallinas, patos, pavos, gansos (*Anser anser*), además de loros (*Amazona sp.*), palomas (*Columba livia*), cerdos, caballos (*Equus ferus caballus*), borregos (*Ovis ovis*), cabras (*Capra hircus*), tortugas (*Kinosternon sp.*), perros (*Canis lupus familiaris*) y gatos (*Felis silvestris catus*). Así pues, en el traspatio se puede encontrar un gran número de especies dependiendo del lugar y condiciones de manejo.

En Campeche, por ejemplo, se han reportado 311 especies de plantas y 19 especies de animales que se cultivan y crían en superficies de 2,500 metros cuadrados.

Los traspatios tienen también un papel muy importante como reservorio de germoplasma (es decir, material genético), pues es probable que en ellos encontremos especies endémicas, escasas o ausentes de sus territorios originales, o que se encuentren amenazadas; ejemplos de esto son el ciricote o cupapé (*Cordia dodecandra*), el cual ha encontrado

refugio en los traspatios de la península de Yucatán; o el aguacate criollo, llamado tzitzí (*Persea americana*), desplazado en las áreas templadas por las variedades comerciales de aguacate, pero presente en los traspatios; o los pavos ocelados y hocofaisanes (*Crax rubra*), que han encontrado en el traspatio un refugio. Las dinámicas ecológicas que se presentan en los traspatios son, en consecuencia, muy importantes.

EL TRASPATIO, SU ARREGLO Y BIODIVERSIDAD

En el traspatio, la ubicación y el arreglo de las especies se realizan con criterios de accesibilidad, manejo y “gusto”, no solamente de aprovechamiento del espacio. La impresión caótica que un traspatio puede dar al visitante desaparece completamente con la explicación de su propietaria. Los arreglos geométricos del huerto europeo son sustituidos por asociaciones de especies que las protegen contra adversidades del clima, favorecen el aprovechamiento de la humedad o proporcionan resguardo para los animales domésticos.

De esta forma, los traspatios son construcciones humanas, generacionales, donde cada especie de planta o animal está en el sitio donde mejor desempeña su función ecológica y productiva, identificada empíricamente por generaciones de amas

de casa. La biodiversidad de los traspacios no se limita entonces al número de especies presentes, sino también a las funciones que desarrollan y a los servicios que ofrecen (García-Flores *et al.*, 2019).

Muchas de estas funciones y relaciones van más allá de lo visible para nuestros ojos, pero se aprecian y valoran por sus resultados en la obtención de beneficios. Por ejemplo, las plantas, a través de sus raíces, funcionan como retenedoras de suelo y mantienen una relación con microorganismos que viven ahí mismo; también son capaces de fijar carbono, fósforo y nitrógeno. Los animales contribuyen a su vez con estas interacciones: el excremento de los animales ayuda en la nutrición de los microorganismos del suelo que facilitan la absorción de nutrientes por las plantas.

LOS TRASPATIOS Y SUS SERVICIOS ECOSISTÉMICOS

Los servicios ecosistémicos son todos los beneficios que la naturaleza aporta al mantenimiento de la vida en nuestro planeta y se dividen en cuatro categorías: abastecimiento, regulación, soporte y culturales. Los traspacios aportan servicios en estas cuatro categorías. La más evidente es la de abastecimiento: del traspacio se obtiene alimento (para nosotros, nuestros animales y la fauna que lo habita o visita), medicinas, madera para construcción, combustible y fibras.

Los traspacios también otorgan servicios de regulación que muchas veces son difíciles de percibir; por ejemplo, la polinización que realiza una buena cantidad de animales como insectos, aves y murciélagos y que se ve beneficiada por la diversidad de colores y formas de flores presentes en las plantas del traspacio, y es un proceso crucial para la obtención de frutos.

Otro servicio del traspacio es la regulación climática. A escala global, mediante la fotosíntesis, las plantas emiten oxígeno como resultado de la captura de dióxido de carbono, lo cual reduce la presencia de este gas de efecto invernadero en la atmósfera. Este servicio se potencializa porque las plantas, además de capturar dióxido de carbono, almacenan carbono

en sus tejidos (hojas, tallos, raíces), lo que ayuda a regular la temperatura del clima local. La presencia de plantas también contribuye a crear sitios frescos con sombra donde animales se resguardan de la acción directa de los rayos solares o se protegen de depredadores durante las horas nocturnas.

Los traspacios son espacios naturales cuyas funciones rebasan los objetivos de abastecimiento de sus propietarios. Las plantas atraen a muchas otras especies que los visitan regularmente en busca de alimento o zona de descanso. Aunque en ocasiones algunos de estos visitantes pueden ser dañinos, se les tolera ya sea por la baja frecuencia de sus visitas o debido a que prestan algún servicio; es el caso, por ejemplo, de las aves que pueden comer los frutos tiernos. Los traspacios son también sitios de cortejo, apareamiento y anidación debido a que constituyen ambientes agradables (García-Flores, 2019). Estos servicios de soporte ecosistémico hacen que los traspacios contribuyan al mantenimiento de una gran diversidad de especies que son fundamentales para llevar a cabo los procesos de importancia económica familiar como, por ejemplo, el control de plagas de insectos.

En términos culturales, los traspacios nos aportan servicios de belleza escénica. Para muchas personas, el traspacio representa un espacio de inspiración donde afloran sentimientos de paz y armonía, lo cual favorece la salud y el bienestar emocional. Incluso, en algunas partes de México, se siguen practicando rituales de origen prehispánico como las “limpias” con hojas y flores obtenidas del traspacio, para “barrer” males que a veces se manifiestan en malestares físicos.

SITUACIÓN ACTUAL DE LOS TRASPATIOS

Los traspacios enfrentan cambios socioeconómicos y culturales que han promovido su transformación o abandono. La migración y el crecimiento familiar reducen el área de cultivo y el conocimiento sobre su manejo; y los programas gubernamentales y no gubernamentales se han centrado en la producción de alimentos y la seguridad alimentaria, simplificando los arreglos y reduciendo la biodiversidad. No

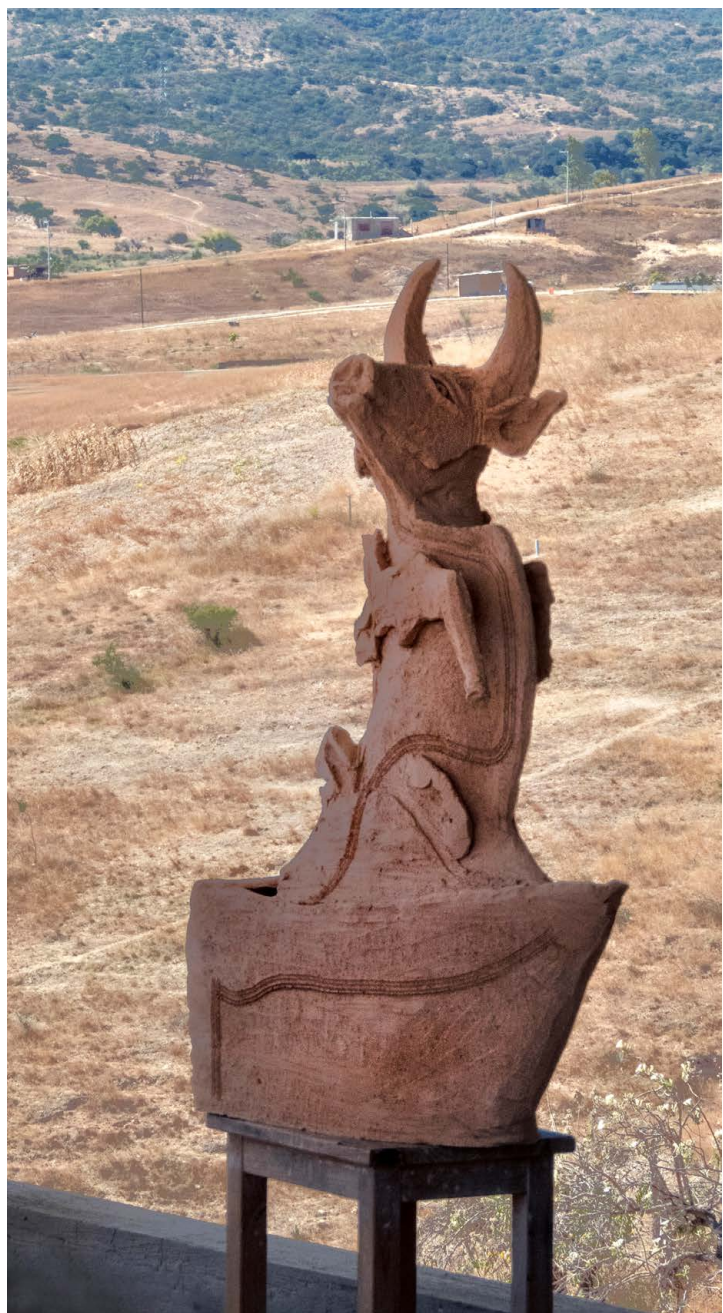
obstante, los traspatios siguen siendo sitios de conservación *in situ* importantes para la transmisión de saberes tradicionales.

CONCLUSIONES

Los traspatios resguardan una gran biodiversidad que es esencial mantener y promover por sus contribuciones ecológicas, sociales y culturales. Aportan servicios ecosistémicos, mejoran la economía familiar, la salud y la seguridad alimentaria local, y son un ejemplo de sistemas productivos sustentables de pequeña escala.

REFERENCIAS

- Alayón-Gamboa JA y Morón Ríos A (2014). *El huerto familiar. Un sistema socioecológico y biocultural*. El Colegio de la Frontera Sur. México.
- Bautista-García G y Sol-Sánchez A (2016). Composición florística e importancia socioeconómica de los huertos familiares del Ejido La Encrucijada, Cárdenas, Tabasco. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* 17(14): https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-09342016001002725.
- Duché-García TTA y Bernal-Mendoza H (2017). Agricultura de traspatio y agroecología en el proyecto estratégico de seguridad alimentaria (PESA-FAO) del estado de Puebla. *Agricultura, Sociedad y Desarrollo* 14(2): https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1870-54722017000200263.
- Fraire-Cordero S (2019). Importancia socioeconómica de los huertos familiares en tres comunidades rurales de Campeche. *Agro Productividad* 12(2): <https://doi.org/10.32854/agrop.v12i2.1358>.
- García-Flores JC, Gutiérrez-Cedillo JG y Araújo-Santana MR (2019). Factores sociales explicativos de la riqueza vegetal en huertos familiares: análisis de una estrategia de vida. *Sociedad y Ambiente* 9: 241-264: <https://www.redalyc.org/journal/4557/455759501010/html/>.
- Macías-Madero A (2023). Economía ecológica: Los huertos ribereños una tradición sustentable. *Revista Digital FILHA* 28: <http://www.filha.com.mx/publicaciones/edicion/2023-01/economia-ecologica-los-huertos-riberenos-una-tradicion-sustentable-por-adriana-macias-madero>.
- Mariaca-Méndez R (2012). *El huerto familiar del sureste de México*. Secretaría de Recursos Naturales y Protección al Ambiente del Estado de Tabasco, El Colegio de la Frontera Sur, México.
- Muñoz O. El huerto tradicional, en Educación Ambiental. CONAFE. <http://bibliotecadigital.ilce.edu.mx/Colecciones/index.php?clave=huerto&pag=3>.
- Ordóñez-Díaz MJ (2018). *Atlas biocultural de huertos familiares en México: Chiapas, Hidalgo, Oaxaca, Veracruz y Península de Yucatán*. UNAM, México: <https://www.somas.org.mx/wp-content/uploads/2019/01/Atlas-biocultural-de-huertos-familiares-en-México.pdf>.



© Honorio Cruz. Sin título. Cerámica de alta temperatura.

Santillán ML (2023). El huerto familiar, una tradición milenaria de los mexicanos. *Ciencia*: <https://ciencia.unam.mx/leer/1448/el-huerto-familiar-una-medida-contra-la-inseguridad-alimentaria>.

Susana Maza-Villalobos
El Colegio de la Frontera Sur
Unidad San Cristóbal de Las Casas
sumaza@ecosur.mx

José Armando Alayón Gamboa
El Colegio de la Frontera Sur
Unidad Campeche



© **Honorio Cruz**. *Sin título*. Cerámica de alta temperatura.

Biorremediación en agroecosistemas

Gobinath **Chandrakasan**

La contaminación del suelo representa una seria amenaza a la agricultura, los ecosistemas y la salud humana. Habitualmente la remediación es costosa y dañina para el medio ambiente, mientras que la biorremediación aprovecha los microorganismos y las plantas para desintoxicar los suelos de manera eficiente y sostenible, promoviendo prácticas más ecológicas y ecosistemas más saludables (Chahal *et al.*, 2023).

La biorremediación es un proceso que utiliza entidades biológicas para degradar o transformar desechos peligrosos en formas menos tóxicas bajo condiciones controladas. Este enfoque multidisciplinario está ganando prominencia como una tecnología alternativa para la limpieza efectiva de sitios contaminados, ya que proporciona una solución sostenible al utilizar microorganismos y plantas para desintoxicar y restaurar la salud del suelo, asegurando así su resiliencia para las generaciones futuras (Gonzalez-Gonzalez y Bashan, 2023).

Este proceso utiliza la capacidad innata de los microorganismos y las plantas para descomponer, absorber o transformar los contaminantes del suelo, y por tanto, para restaurar eficazmente su estructura física, equilibrio químico y vitalidad biológica. Las estrategias de biorremediación microbiana juegan un papel vital en los consorcios de organismos nativos de sitios contaminados, ya que aprovechan su gran potencial metabólico para reducir los contaminantes (Sharma *et al.*, 2022). Si bien el uso de pesticidas es esencial en la agricultura moderna para controlar

plagas, malezas y enfermedades, las bioestimulaciones son una solución prometedora por el aporte de nutrientes clave (carbono, nitrógeno y fósforo), además de que potencian la actividad microbiana local estimulando la producción de enzimas capaces de transformar moléculas tóxicas en otras menos dañinas (Juárez-Maldonado *et al.*, 2021).

MICROORGANISMOS EN LA BIORREMEDIACIÓN

Las comunidades microbianas son fundamentales en la biorremediación del suelo. Las bacterias, los hongos y las arqueas presentan diversas vías metabólicas que les permiten descomponerse en diversos contaminantes orgánicos e inorgánicos, incluidos hidrocarburos, metales pesados y pesticidas. En particular, las bacterias demuestran una eficiencia potencial en sus efectos sobre el metabolismo de contaminantes orgánicos, transformándolos en compuestos menos dañinos o completamente benignos.

Algunos géneros bacterianos, como *Pseudomonas*, *Bacillus* y *Deinococcus*, han sido ampliamente estudiados por su papel en la biorremediación. Las especies del género *Pseudomonas* son reconocidas por su capacidad para degradar hidrocarburos y otros solventes industriales, mientras que las especies de *Bacillus* son eficaces en la descomposición de pesticidas y contaminantes orgánicos. Además, el género *Deinococcus* se destaca por su resistencia en ambientes extremos, lo que contribuye a su habilidad para metabolizar contaminantes industriales.

Al aprovechar la diversidad metabólica de estos microorganismos, las estrategias de biorremediación pueden optimizarse para abordar numerosas formas de contaminación del suelo, promoviendo así la restauración ambiental y la sostenibilidad.

Los hongos desempeñan un papel esencial en la biorremediación gracias a su capacidad para degradar contaminantes ambientales complejos. Destacan los hongos filamentosos *Phanerochaete chrysosporium* y *Trametes versicolor*, reconocidos por su habilidad para descomponer hidrocarburos

aromáticos policíclicos (HAP) y clorofenoles. Este talento único se debe principalmente a la producción de enzimas extracelulares como lacasas y peroxidasas, que les permiten oxidar y descomponer eficazmente compuestos altamente resistentes, lo cual contribuye de manera decisiva a la restauración ambiental. Por otro lado, los hongos micorrízicos promueven la absorción de nutrientes y la descomposición de materia orgánica, mejorando la estructura del suelo y aumentando su capacidad de retención de agua (Andrade-Hoyos *et al.*, 2023).

MECANISMOS DE BIORREMEDIACIÓN

POR MICROORGANISMOS

La biorremediación incluye varios mecanismos mediante los cuales los microorganismos contribuyen a la degradación de contaminantes en el medio ambiente. Uno de los más destacados es la biodegradación, un proceso en el que los microorganismos transforman moléculas complejas en compuestos más simples y menos dañinos bajo condiciones aeróbicas o anaeróbicas.

En la biodegradación aeróbica, los microorganismos utilizan oxígeno como aceptor de electrones para oxidar los contaminantes, mientras que en la biodegradación anaeróbica se emplean aceptores alternativos como nitratos, sulfatos o dióxido de carbono para completar el proceso.

Otro mecanismo clave es la biosorción, en la que los contaminantes son adsorbidos en las paredes celulares de los microorganismos que actúan como una barrera inicial.

Además, la bioacumulación permite la absorción activa de contaminantes dentro de las células microbianas a través de sus membranas, donde pueden transformarse o almacenarse temporalmente, contribuyendo a su eliminación del entorno. Por ejemplo, las bacterias reductoras de sulfato utilizan enzimas reductasas para reducir compuestos de azufre en ambientes anaeróbicos, mientras que las peroxidasas y oxidasas fúngicas pueden descomponer compuestos orgánicos persistentes, como los bifenilos policlorados (PCBs) (Alvarez Acuña *et al.*, 2017).

PLANTAS EN LA BIORREMEDIACIÓN

La fitorremediación es una técnica sostenible que emplea plantas para descontaminar y recuperar suelos afectados. Algunas especies poseen la capacidad de absorber contaminantes a través de sus raíces y almacenarlos en sus tejidos, mientras que otras son capaces de transformarlos en compuestos menos dañinos. Además de eliminar contaminantes, las plantas contribuyen a estabilizar el suelo, prevenir la erosión y fomentar la biodiversidad del ecosistema. Entre los casos más recientes de fitorremediación destacan el uso de girasoles (*Helianthus annuus*) para la extracción de metales pesados, alfalfa (*Medicago sativa*) para mejorar la salud del suelo (Tussipkan y Manabayeva, 2022), y ciertas especies de plantas herbáceas para la degradación de hidrocarburos.

MECANISMOS DE FITORREMEDIACIÓN

Existen diversos mecanismos de fitorremediación, entre los que destacan los siguientes:

- **Fitoextracción.** Este mecanismo consiste en la absorción de contaminantes presentes en el suelo por medio de las raíces de las plantas y su posterior acumulación en partes aéreas, como tallos y hojas. Las especies conocidas como hiperacumuladoras tienen la capacidad de tolerar y concentrar altos niveles de metales pesados y otros contaminantes sin sufrir efectos negativos significativos. Este método es particularmente eficaz para remediar suelos contaminados con metales como zinc, cadmio y plomo (Asare *et al.*, 2023).
- **Fitodegradación.** Este proceso implica la degradación de contaminantes orgánicos absorbidos por las plantas mediante la acción de enzimas específicas, como peroxidasas, oxidasas y deshalogenasas. Es especialmente útil para remediar compuestos orgánicos como pesticidas, herbicidas e hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP).
- **Fitorrizofiltración.** Las raíces de las plantas actúan como filtros capaces de absorber, concentrar y precipitar contaminantes presentes en el agua. Las plantas acuáticas, como el jacinto de agua (*Eichhornia crassipes*) y la juncia (*Scirpus* spp.) destacan por su capacidad para reducir contaminantes,



© Honorio Cruz. Sin título. Cerámica de alta temperatura.

especialmente metales pesados y nutrientes excesivos en aguas residuales o subterráneas.

- **Fitovolatilización.** Este mecanismo se aplica a contaminantes que pueden transformarse en formas volátiles.

- **Fitorrecuperación.** Este enfoque está orientado a restaurar la estructura y las funciones ecológicas del suelo.

CONSOLIDACIÓN DE MICROBIOS Y PLANTAS EN EL AGROSISTEMA

Esta integración ofrece numerosas ventajas y mejora la eficacia de la eliminación de contaminantes, acelera su descomposición y ayuda a restaurar la salud y la fertilidad del suelo. Por ejemplo, los hongos micorrízicos pueden asociarse con las raíces de ciertas plantas para aumentar su capacidad de absorber metales pesados y otros contaminantes del suelo (Camarena-Gutiérrez, 2012). La integración de microorganismos promotores del crecimiento vegetal (PGPR, por sus siglas en inglés) desempeña un



© Honorio Cruz. Sin título. Mural en cerámica de alta temperatura.

papel clave al estimular el crecimiento de las plantas y fortalecer su resistencia frente a condiciones de estrés. Las algas y las plantas destacan por su alta capacidad para absorber nitrógeno, fósforo, azufre, minerales y metales del entorno, contribuyendo significativamente a la remediación y mejora de la calidad ambiental (Farid et al., 2023).

La biorremediación es una alternativa efectiva y sostenible. Es fundamental investigar continuamente sus mecanismos biológicos para mejorar su eficiencia y adaptabilidad a diferentes contextos.

REFERENCIAS

- Alvarez Acuña JV (2017). Cultivo de los Microorganismos Nativos en la reducción del contenido de Bifenilos Policlorados (PCBS) en el suelo de la subestación eléctrica de Puente Piedra. S.I.: Universidad César Vallejo. Disponible en: <http://repositorio.ucv.edu.pe/handle/UCV/3482?locale-attribute=es>.
- Andrade-Hoyos P, Rivera-Jiménez MN, Landero-Valenzuela N et al. (2023). Beneficios ecológicos y biológicos del hongo cosmopolita *Trichoderma spp.* en la agricultura: una perspectiva en el campo mexicano. *Revista Argentina de Microbiología* 55(4):366-377.
- Asare MO, Száková J and Tlustoš P (2023). Mechanisms of As, Cd, Pb, and Zn hyperaccumulation by plants and their effects on soil microbiome in the rhizosphere. *Frontiers in Environmental Science* 11:1157415.
- Camarena-Gutiérrez G (2012). Interacción planta-hongos micorrízicos arbusculares. *Revista Chapingo serie ciencias forestales y del ambiente* 18(3):409-421.
- Chahal S, Wang P, Bueno V et al. (2023). Effect of emerging contaminants on soil microbial community composition, soil enzyme activity, and strawberry plant growth in polyethylene microplastic-containing soils. *Environmental Science: Advances* 2(4):629-44.
- Farid N, Ullah A, Khan S et al. (2023). Algae and Hydrophytes as Potential Plants for Bioremediation of Heavy Metals from Industrial Wastewater. *Water* 15(12):2142.
- Gonzalez-Gonzalez LM and de-Bashan LE. The Potential of Microalgae-Bacteria Consortia to Restore Degraded Soils. *Biology* 12(5):693.
- Juárez-Maldonado A, Tortella G, Rubilar O et al. (2021). Biostimulation and toxicity: The magnitude of the impact of nanomaterials in microorganisms and plants. *Journal of Advanced Research* 31:113-26.

Gobinath Chandrakasan
Universidad Autónoma de Querétaro
Facultad de Ingeniería
gobi.marine@gmail.com

El papel de la luz en la producción de aceites esenciales de plantas aromáticas

Humberto Raúl **Pacheco-Sánchez**
Carlos Eligio **Hernández-Navarrete**

Los aceites esenciales (AEs) han generado interés en las industrias farmacéutica, cosmética y alimentaria debido a su amplia gama de compuestos bioactivos. Estos aceites son extraídos de plantas aromáticas como la albahaca, el romero, la menta, la hierbabuena y el orégano, entre otras, y se emplean para la elaboración de productos relajantes, medicamentos y alimentos funcionales. Se sabe que las plantas aromáticas, al igual que las no aromáticas, requieren para desarrollarse un suelo rico en nutrientes y condiciones ambientales adecuadas como agua, temperatura, humedad relativa y luz. La luz es un elemento indispensable para la vida en el planeta y es la fuente de energía para el desarrollo primario de las plantas. Pero, ¿sabemos cómo la luz puede ayudar o perjudicar la producción de los AEs?

LA LUZ

La luz es la zona del espectro electromagnético visible para el ojo humano; dicha zona va desde el rojo (700 nm) hasta el violeta (420 nm), pasando por el naranja (600 nm), el amarillo (570 nm), el verde (520 nm) y el azul (480 nm). A la derecha de esta zona visible, con una mayor cantidad de energía, se encuentra la radiación ultravioleta (UV)

(100-400 nm), y a la izquierda la radiación infrarroja (700 nm-1 mm).

La radiación fotosintéticamente activa (PAR), aproximadamente en el mismo rango que la luz visible, forma parte fundamental del metabolismo primario de las plantas, ya que interactúa con la clorofila y otros pigmentos antena en la fotosíntesis. En este proceso se crean moléculas de glucosa y otros azúcares a partir de agua y dióxido de carbono. Las moléculas de azúcar resultantes entran en otras rutas bioquímicas para generar biomasa y compuestos bioactivos, entre ellos, los AEs.

Las plantas responden a diferentes longitudes de onda de luz a través de moléculas llamadas fotorreceptores, de las que existen cinco grupos: fitocromos, criptocromos, fototropinas, UVR8 y zeaxinas. Estos fotorreceptores están relacionados con procesos como el ciclo circadiano (reloj interno), la defensa ante niveles excesivos de radiación UV, el fototropismo (inclinación de la planta hacia la fuente de luz), entre otros. En este sentido, la luz proporciona energía vital para el desarrollo y crecimiento de las plantas, pero también actúa como una señal externa para activar respuestas de defensa que desencadenan la producción de compuestos bioactivos. La luz roja y la azul interactúan con la planta para la producción de fenoles, flavonoides y AEs. Al someter a la planta a diferentes longitudes de onda, la composición de los AEs puede cambiar. Por ejemplo, la albahaca, bajo una longitud de onda entre 400 nm y 660 nm (azul y rojo), y según la cantidad (tiempo e intensidad) de luz que recibe durante el día, produce mayor cantidad de AEs, entre los cuales se encuentran el eugenol, linalol, estragol, timol y cineol (Chu *et al.*, 2020).

La luz blanca está constituida por todas las radiaciones luminosas de distinto color: violeta, azul, amarillo, verde, naranja y rojo. Los objetos absorben la luz del color complementario al del color que muestran; es decir, que los objetos son del color de la luz no absorbida. En el proceso de la fotosíntesis, los cloroplastos utilizan principalmente la energía correspondiente al color rojo y azul (extremos de la

luz visible), y reflejan el color verde característico de las plantas (De las Rivas, 2000). Cabe mencionar que hay plantas que tienen otros pigmentos antena, como los carotenoides, que producen otro tipo de colores.

PLANTAS AROMÁTICAS

Las plantas aromáticas son parte fundamental de la cultura en la mayoría de los países latinoamericanos por su valor gastronómico y medicinal. En México, se han reportado más de 3,100 especies de plantas aromáticas, las cuales tienen en común una elevada cantidad de compuestos o principios activos. Dichos compuestos cuentan con propiedades bioquímicas muy específicas. Los principios activos son sintetizados por las plantas como metabolitos secundarios y se pueden clasificar en tres grandes grupos: terpenos, fenoles y alcaloides. Las plantas aromáticas se dividen en tres familias botánicas. La primera familia es Alliaceae, cuyos integrantes normalmente cuentan con bulbo y se pueden encontrar en zonas templadas y cálidas; como ejemplos: cebolla, ajo, cebolleta, entre otras. La segunda es Apiaceae, poco frecuente en zonas tropicales y desérticas; ejemplos: zanahoria, perejil, eneldo, entre otros. Por último, la familia de las Lamiaceae, en la cual se encuentran la albahaca, el orégano, la mejorana, entre otras (Leos *et al.*, 2020).

ACEITES ESENCIALES

Los AEs están formados por diversos compuestos que incluyen terpenos y compuestos aromáticos como fenoles, alcoholes, aldehídos entre otros. Estos compuestos bioactivos pueden exhibir actividades biológicas, como propiedades antibacterianas y antifúngicas. Los grupos fenólicos los hacen adecuados para su uso como compuestos con interés farmacológico, aromatizantes y conservadores (Paucarchuco *et al.*, 2023).

Los AEs son los principales productos que se aíslan de hojas, corteza, tallo, flores, semillas, raíces y frutos de diferentes plantas aromáticas. El nombre de aceite esencial se originó a partir de “esencia”, es decir, la presencia de fragancias y sabores. Los compuestos bioactivos que se encuentran en los

AEs son volátiles por naturaleza y tienen un papel beneficioso para la defensa de las plantas ante el estrés ambiental (Maurya *et al.*, 2021).

EFFECTO DE LA LUZ EN LA PRODUCCIÓN DE ACEITES ESENCIALES

La luz ha sido considerada como uno de los factores externos que más afectan a la producción de metabolitos secundarios en las plantas (Tohidi *et al.*, 2020). La cantidad y la calidad de la luz juegan un papel importante en la producción de AEs en las plantas, y se ha demostrado que afecta a los compuestos volátiles de las hierbas. El contenido de AEs en las plantas varía de acuerdo con el espectro de luz presente durante el cultivo (Milenković *et al.*, 2021).

La combinación de luz roja, azul y radiación UV, o cada una por separado, puede modificar la síntesis

de metabolitos secundarios; esto se debe a la modulación de las enzimas en las vías de síntesis de metabolitos secundarios relacionados con la fotosíntesis; dichas vías de síntesis se activan o inactivan en función de la longitud de onda a la que se exponga la planta. Se ha demostrado que la intensidad luminosa promueve la producción de carotenoides y clorofila b por la estimulación de la actividad enzimática en respuesta a un estrés luminoso (Morales, 2021).

La luz afecta a las plantas en todas sus etapas de crecimiento. La variación de las longitudes de onda influye en el metabolismo de las plantas en forma compleja. Una sobreexposición puede desencadenar un proceso oxidativo que es perjudicial y causa la muerte de la planta si no se detecta a tiempo. En la actualidad, los diodos emisores de luz (LED) permiten controlar las longitudes de onda a las que se expone la planta para aumentar su producción de aceite esencial. Se cuenta ya con estudios



© Honorio Cruz. *Los pescadores*.
Cerámica de alta temperatura, 57 x 72 cm.

El papel de la luz en la producción de aceites esenciales...



© Honorio Cruz. De la serie *Navegando juntos*. Cerámica de alta temperatura, 43 x 73 x 15 cm.

del efecto de la luz LED en la producción de aceite esencial en plantas de orégano, albahaca blanca, mejorana, menta, entre otras. Se ha realizado investigación para innovar en sistemas de iluminación que proporcionen las longitudes de onda específicas para incrementar el metabolismo secundario y, por ende, incrementar la producción de los AEs en diferentes plantas aromáticas (Sarfaraz *et al.*, 2023).

CONCLUSIÓN

La luz forma parte fundamental del proceso de fotosíntesis mediante el cual las plantas generan los metabolitos primarios, fundamentales para la vida de la planta, y los metabolitos secundarios, entre los cuales se encuentran los AEs. En la actualidad, se busca generar tecnología para controlar la intensidad, calidad y fotoperiodo de la luz con el objetivo de obtener un mejor rendimiento en la producción de AEs en plantas aromáticas.

AGRADECIMIENTOS

Al CONAHCYT por las becas 1262185 y 1277469 proporcionadas para la realización de estudios de posgrado. A la Universidad Autónoma de Querétaro por los recursos otorgados a través de la convocatoria FONFIVE-2024.

REFERENCIAS

Chu Chu HT, Vu, TN, Dinh, TT, Do PT, Chu HH, Tien TQ and Setzer WN (2022). Effects of Supplemental Light Spectra on the Composition,

Production and Antimicrobial Activity of *Ocimum basilicum* L. Essential Oil. *Molecules* 27(17):5599. DOI: <https://doi.org/10.3390/molecules27175599>.

De la Rivas J (2000). La luz y el aparato fotosintético. En Azcón-Bieto J y Talón M (Eds.) *Fundamentos de Fisiología Vegetal* (pp. 131-153). McGraw-Hill, España.

Leos AS, Saavedra RD y Viveros E (2020). Plantas aromáticas posiblemente útiles contra el SARS-CoV-2 (Covid-19). *Archivos Venezolanos de Farmacología y Terapéutica* 39(6): 744-752. DOI: <https://www.redalyc.org/journal/559/55965387014>.

Maurya A, Prasad J, Das S and Dwivedy AK (2021). Essential Oils and Their Application in Food Safety. *Frontiers* 5:653420. DOI: <https://doi.org/10.3389/fsufs.2021.653420>.

Milenković L, Ilić ZS, Šunić L, Tmušić N, Stanojević L, Stanojević J and Cvetković D (2021). Modification of light intensity influence essential oils content, composition and antioxidant activity of thyme, marjoram and oregano. *Saudi Journal of Biological Sciences* 28(11):6532-6543. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2021.07.018>.

Morales Becerril CDJ (2021). La calidad de la luz y la relación con el crecimiento y metabolismo secundario en *Thymus vulgaris*. Tesis de maestría. Recuperada de: <https://repositorio.chapingo.edu.mx/items/68947941-0ee3-40a8-a9da-2ddcf1ae4c88>.

Paucarchuco J, Torres ER, Javier HJ y Vilchez JE (2023). Aceites esenciales: Interés agroindustrial por los compuestos bioactivos y capacidad antioxidante de plantas aromáticas. *Advances in Science and Innovation* 2(2):10-19. DOI: <https://doi.org/10.61210/asi.v2i2.65>.

Sarfaraz D, Rahimmalek M, Sabzalian MR, Gharibi S, Matkowski A and Szumny A (2023). Essential Oil Composition and Antioxidant Activity of Oregano and Marjoram as Affected by Different Light-Emitting Diodes. *Molecules*. 28(9):3714. DOI: <https://doi.org/10.3390/molecules28093714>.

Tohidi B, Rahimmalek M, Arzani A and Sabzalian MR (2020). Thymol, carvacrol, and antioxidant accumulation in *Thymus* species in response to different light spectra emitted by light-emitting diodes. *Food chemistry* 307:125521. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2019.125521>.

Humberto Raúl Pacheco-Sánchez
Carlos Eligio Hernández-Navarrete
Facultad de Ingeniería
Universidad Autónoma de Querétaro
hernandez.navarrete.carlos@gmail.com

Quitosano, la alternativa más sustentable para la agricultura

Adrián Arroyo Galván

Actualmente, la agricultura se enfrenta a desafíos como el cambio climático, la urbanización, la disminución de la tierra cultivable y el agotamiento de los recursos naturales. Para satisfacer la creciente demanda global de alimentación es fundamental potenciar la producción agrícola; no obstante, las plagas, hongos, virus y bacterias representan un problema a resolver. Consecuentemente, la investigación científica se ha enfocado en estudiar diversos materiales biodegradables y biocompatibles para aplicaciones en los cultivos agrícolas.

El quitosano es un polímero natural que ha ganado interés gracias a su versatilidad funcional: ya sea como biopesticida o biofertilizante, puede incrementar la producción de alimentos a través de la estimulación del crecimiento, el aporte de nutrientes y su efecto sobre la eficiencia en la absorción del agua en las plantas. Las amplias capacidades del quitosano radican en sus propiedades físicas, químicas y biológicas, y por ser apto para funcionar como un revestimiento para semillas con la finalidad de protegerlas de ataques microbianos antes de su germinación (Boamah *et al* 2023).

¿QUÉ ES Y CÓMO OBTENER EL QUITOSANO?

El quitosano se obtiene a partir de la quitina, el segundo polímero más abundante en el planeta (después de la celulosa) y está constituido por moléculas de N-acetil-D-

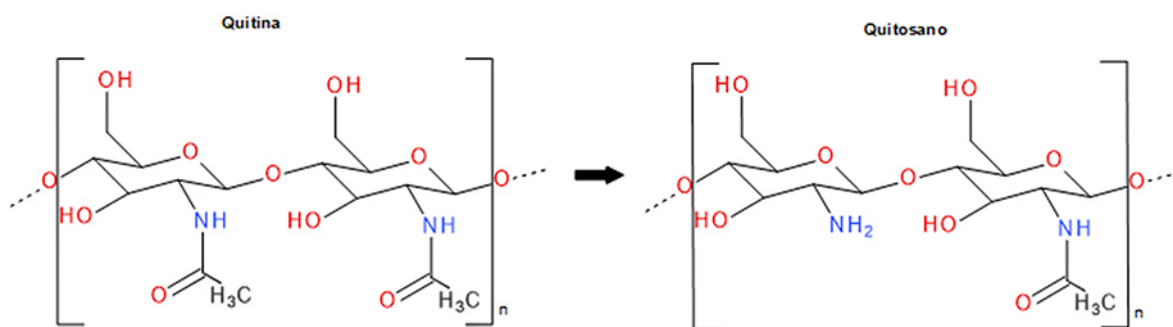


Figura 1. Monómero de quitina y monómero de quitosano.

glucosamina (moléculas acetiladas) y de β -1,4-D-glucosamina (moléculas desacetiladas); la proporción de estas dependerá del grado de desacetilación que se haya obtenido (Figura 1).

Existen diversas fuentes de obtención de la quitina; del reino animal es posible extraerla del exoesqueleto de crustáceos (Kou *et al.*, 2021), de moluscos, de algas y de insectos (Hisham *et al.*, 2024). Por otro lado, en el reino Fungi, la segunda comunidad de organismos más grande, también está presente la quitina. Algunas divisiones como Ascomycetos, Basidiomicetos y Ficomicetos son ejemplo de ello (Pellis *et al.*, 2022). En términos generales, la proporción de quitina presente en los mencionados organismos varía del 20 % al 30 % en los exoesqueletos de crustáceos, del 5 % al 25 % en las cutículas de insectos, y del 2 % al 44 % en las paredes celulares de los hongos (Alimi *et al.*, 2023).

El quitosano puede ser extraído mediante distintos métodos. El principal es el tratamiento químico que consiste en la desproteínización, desmineralización, decolorización y desacetilación del exoesqueleto de los organismos que lo contienen. En dichos procesos son comúnmente utilizados agentes básicos y ácidos, así como solventes orgánicos a temperaturas de hasta 160 °C. (Issahaku *et al.*, 2023).

A pesar de que la vía química es el método más utilizado, existen alternativas orientadas a una mayor sustentabilidad. Por ejemplo, mediante fermentación y degradación enzimática. En el caso de la fermentación, los microorganismos pueden desarrollarse en la fuente de quitosano o pueden ser cultivados.

La desproteínización es conducida por enzimas proteolíticas y la desmineralización a través de los ácidos orgánicos de los microorganismos. Estas enzimas hidrolizan los enlaces beta glucosídicos de las moléculas acetiladas de D-glucosamina y pueden ser obtenidas mediante aislamiento de bacterias, cianobacterias, hongos y plantas (Islam *et al.*, 2023).

EL QUITOSANO COMO REVESTIMIENTO PARA SEMILLAS Y SU MECANISMO DE ACCIÓN

Actualmente, el quitosano ha llamado la atención en el sector agrícola debido a sus capacidades de potenciar los mecanismos de defensa de las plantas, de estimular el crecimiento y de funcionar como agente antimicrobiano con la producción de fitoalexinas, inhibidores de proteínas, quitinasas y especies reactivas de oxígeno; todos estos, compuestos generados por la planta para su protección contra organismos patógenos. En el caso del revestimiento de semillas, el quitosano contribuye al incremento de porcentaje de germinados, a la reducción del tiempo para germinar y al aumento del tamaño de tallo y la raíz (Riseh *et al.*, 2023).

La capacidad antimicrobiana del quitosano radica principalmente en su grado de desacetilación, que indica el número de grupos acetilo presentes en la cadena polimérica. Si la quitina tiene un grado de desacetilación superior al 50 %, entonces es considerada quitosano (Sánchez-Machado *et al.*, 2024). La remoción de los grupos acetilos en la molécula implica la formación de grupos N-glucosamina, los cuales, a través de sus cargas eléctricas positivas, provocan la ruptura de la membrana celular microbiana e impiden

el transporte molecular inter y extracelular, lo que afecta negativamente a su metabolismo (como la degradación de proteínas y componentes celulares), y resulta en la inhibición del crecimiento microbiano (Chen *et al.*, 2023). Así mismo, se ha demostrado que los revestimientos de semillas a base de quitosano son capaces de lograr más del 80 % de inhibición de ataque de áfidos (insectos) en cultivos, debido al estímulo de producción de anticuerpos por parte de la planta. Además, el rendimiento de la planta puede aumentar un 20 % debido a la permeabilidad selectiva del revestimiento en función del consumo de agua y la retención de dióxido de carbono, ambos compuestos fundamentales para el desarrollo vegetal (Zeng *et al.*, 2012).

CONCLUSIÓN

El origen biológico del quitosano implica que su producción es posible de forma masiva o, incluso, como aprovechamiento de los subproductos de la industria pesquera (exoesqueletos de crustáceos y moluscos); esta condición convierte al quitosano en un recurso renovable para sus diferentes aplicaciones. En el caso del revestimiento de semillas, el quitosano confiere propiedades antimicrobianas contra posibles patógenos que afecten la germinación o que conduzcan a su deterioro; así mismo, resulta interesante cómo este polímero natural fomenta el crecimiento de las plantas una vez germinadas, con respecto a aquellas que no cuentan con este estímulo.

Es prioritario continuar con las líneas de investigación sobre el quitosano y los posibles agentes adicionales que interaccionen en un solo sistema (revestimiento) para potenciar la protección a la semilla, el crecimiento de la plántula y el incremento de la productividad de la planta. Finalmente, con el objetivo de que la producción de quitosano sea más sustentable, los métodos de extracción o síntesis de quitosano deben ser de bajo costo, estar basados en solventes económicos y de bajo impacto ambiental, y en tratamientos energéticos (por ejemplo, la aplicación de ultrasonido para la desacetilación de la quitina). De esta forma, la aplicación de revestimientos de semilla a base de quitosano puede ser un método

importante para países que tengan la necesidad de proteger sus cultivos y mejorar su producción agrícola.

REFERENCIAS

- Alimi BA, Pathania S, Wilson J, Duffy B and Frias JMC (2023). Extraction, quantification, characterization, and application in food packaging of chitin and chitosan from mushrooms: A review. *International Journal of Biological Macromolecules* 237:124195. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2023.124195>.
- Chen Y, Liu Y, Dong Q, Xu C, Deng S, Kang Y, Fan M and Li L (2023). Application of functionalized chitosan in food: A review. *International Journal of Biological Macromolecules* 235:123716. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2023.123716>.
- Hisham F, Maziati Akmal MH, Ahmad F, Ahmad K and Samat N (2024). Biopolymer chitosan: Potential sources, extraction methods, and emerging applications. *Ain Shams Engineering Journal* 15(2):102424. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.asej.2023.102424>.
- Islam N, Hoque M and Taharat SF (2023). Recent advances in extraction of chitin and chitosan. *World Journal of Microbiology and Biotechnology* 39,28: DOI: <https://doi.org/10.1007/s11274-022-03468-1>.
- Issahaku I, Tetteh IK and Tetteh AY (2023). Chitosan and chitosan derivatives: Recent advancements in production and applications in environmental remediation. *Environmental Advances* 11: 100351. <https://doi.org/10.1016/j.envadv.2023.100351>.
- Kou S (Gabriel), Peters LM and Mucalo MR (2021). Chitosan: A review of sources and preparation methods. *International Journal of Biological Macromolecules* 169:85-94. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2020.12.005>.
- Pellis A, Guebitz GM and Nyanhongo GS (2022). Chitosan: Sources, Processing and Modification Techniques. *Gels* 8(7), 393. DOI: <https://doi.org/10.3390/gels8070393>.
- Riseh RS, Vazvani MG and Kennedy JF (2023). The application of chitosan as a carrier for fertilizer: A review. *International Journal of Biological Macromolecules* 252:126483. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2023.126483>.
- Sánchez-Machado DI, López-Cervantes J, Escárcega-Galaz AA, Campas-Baypoli ON, Martínez-Ibarra DM and Rascón-León S (2024). Measurement of the degree of deacetylation in chitosan films by FTIR, ¹H NMR and UV spectrophotometry. *MethodsX* 12:102583. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mex.2024.102583>.
- Zeng D, Luo X and Tu R (2012). Application of Bioactive Coatings Based on Chitosan for Soybean Seed Protection. *International Journal of Carbohydrate Chemistry* 2012:104565. DOI: <https://doi.org/10.1155/2012/104565>.

Adrián Arroyo Galván
Centro de Investigación en Ciencia Aplicada
y Tecnología Avanzada, Unidad Altamira
Instituto Politécnico Nacional
adrian.arroyo.g7@hotmail.com



© **Honorio Cruz**. Detalle de *La vasija del gallo 1*. Cerámica de alta temperatura, 150 x 50 x 52 cm.

Acerca de las compuertas lógicas cuánticas más rápidas y precisas

Giselle N. **Morales Rosales**
Manuel **Ávila Aoki**

La computación cuántica es una disciplina emergente que promete revolucionar la forma en que se procesa la información. Las computadoras cuánticas tienen la capacidad de llevar a cabo determinadas tareas computacionales a una velocidad mucho más rápida que las computadoras clásicas (Wang *et al.*, 2022). En el ámbito de la computación cuántica, las escalas de tiempo pueden ser extremadamente pequeñas: desde milisegundos y microsegundos, hasta nanosegundos y zeptosegundos. Este último es el tiempo más pequeño registrado experimentalmente (Grundmann *et al.*, 2020).

Un elemento clave de la revolución de la computación cuántica son las compuertas cuánticas rápidas o *fast quantum gates*. Estas representan un avance crucial para la construcción de computadoras cuánticas prácticas, debido a que permiten ejecutar algoritmos cuánticos de forma confiable a pesar del ruido y la fragilidad de los qubits (Sarma y Hartmann, 2023), por lo que su desarrollo se ha vuelto cada vez más importante para el futuro desarrollo de computadoras cuánticas tolerantes a fallos (Nielsen y Chuang, 2010).

COMPUERTAS CUÁNTICAS RÁPIDAS

Las compuertas cuánticas rápidas son los bloques esenciales para ejecutar algoritmos cuánticos (Cáceres *et al.*,

2023), ya que permiten reducir significativamente el tiempo total de ejecución (Werninghaus *et al.*, 2021). Estas compuertas están relacionadas con operaciones que manipulan el estado de los qubits. Tales operaciones producen una salida definida (National Academies of Sciences, Engineering and Medicine, 2018), es decir, se recibe un conjunto de qubits en un estado determinado, se realiza una operación sobre ellos y se obtiene la salida correspondiente.

Las compuertas cuánticas se caracterizan por el hecho de que realizan las operaciones en tiempos significativamente cortos. Estas operaciones pueden ocurrir en escalas de tiempo tan pequeñas como los zeptosegundos (zs), equivalentes a 10^{-21} segundos o a una billonésima de billonésima parte de un segundo, y por tanto permiten procesar una cantidad enorme de información en fracciones de segundo. Sin embargo, además de ser rápidas también deben tener una alta fidelidad (Sarma y Hartmann, 2023), es decir, una baja tasa de errores. Cuanto más rápidas y precisas sean las operaciones, menor será el tiempo disponible para que los errores se acumulen. Esto es crucial, dado que los qubits son extremadamente sensibles a su entorno y pueden perder su estado cuántico debido a un fenómeno llamado decoherencia (ver el glosario) (Nielsen y Chuang, 2010). Es importante mantener el estado cuántico de superposición en los qubits, dado que este estado es el que hace posible que se exploren múltiples soluciones de forma simultánea y, por lo tanto, que la computación cuántica tenga un enorme potencial de procesamiento.

AVANCES

Se han logrado diversos avances en el diseño y desarrollo de compuertas cuánticas, entre los cuales se incluye utilizar átomos neutros (Jaksch *et al.*, 2000), que se manipulan para aumentar la rapidez y fidelidad de las operaciones cuánticas.

También se ha propuesto utilizar iones atrapados, partículas cargadas confinadas por campos eléctricos o magnéticos para su control y estudio preciso.

De acuerdo con Schäfer y colaboradores (2017), es posible obtener una compuerta de 1.6 microsegundos, 10^{-6} segundos o 1.6 milésimas de un segundo con una fidelidad del 99.8 %, lo que indica una operación cuántica extremadamente precisa con un margen de error mínimo.

Según el teorema de no clonación, no es posible alcanzar el 100 %, ya que este teorema impide crear copias exactas de estados cuánticos desconocidos y limita la precisión de las operaciones. Por lo que el 99.8 % de fidelidad representa un gran logro tecnológico. Para ello, se utilizaron pulsos de láser moldeados en escalas de tiempo muy cortas 10 nanosegundos, equivalentes a 10^{-8} segundos o diez mil millonésimas de un segundo con el fin de dirigir el movimiento de los iones a lo largo de trayectorias diseñadas de tal manera que la operación de la compuerta fuera insensible a la fase inicial del campo óptico (Schäfer *et al.*, 2017), evitando errores por fluctuaciones o desajustes y mejorando su precisión y resistencia ante pequeñas variaciones.

Además, se ha realizado un análisis sobre cómo las compuertas cuánticas rápidas podrían permitir que los procesadores cuánticos basados en iones atrapados alcancen la escalabilidad necesaria para superar a las computadoras clásicas, incluso si no se usaran los mecanismos de corrección de errores (Taylor *et al.*, 2017), que normalmente se consideran necesarios para el funcionamiento cuántico. También se estudiaron los límites de las configuraciones experimentales para llevar a cabo con éxito operaciones de alta fidelidad utilizando compuertas cuánticas rápidas (Taylor *et al.*, 2017).

Otro avance significativo es la utilización de qubits superconductores. Esta alternativa tiene un gran potencial a causa de su escalabilidad, tiempos de coherencia largos y su capacidad para realizar operaciones rápidas y de alta fidelidad (Cáceres *et al.*, 2023).

Por otro lado, aunque se han implementado técnicas como el desacoplamiento dinámico, los pulsos compuestos y el control óptimo (ver el glosario), con las que ha sido posible mejorar la fidelidad, la velocidad de la compuerta aún es limitada (Cáceres *et al.*, 2023), ya que estas técnicas, aunque seguras,

son lentas, por lo que las escalas de tiempo necesarias para realizar las operaciones entran en conflicto con las escalas de tiempo en las que ocurre la decoherencia. Tomando en cuenta esto, un grupo de investigadores propuso utilizar el protocolo denominado Landau-Zener-Stückelberg-Majorana (LSZM), que ha tenido una implementación exitosa. Este protocolo de conducción consiste en aplicar al cubit una señal con una amplitud significativa o una señal que no esté en resonancia exacta con el cubit (Cáceres *et al.*, 2023), lo que permite cambiar rápidamente entre estados cuánticos cuando estos se acercan mucho pero no se cruzan. Su principal ventaja es que opera más rápido que las técnicas convencionales, ya que no requiere mantener el control del sistema por mucho tiempo, aunque requiere ajustes muy precisos para evitar errores.

Finalmente, se ha propuesto utilizar el aprendizaje por refuerzo (*reinforcement learning*) en cubits superconductores para diseñar compuertas cuánticas rápidas de dos cubits, con un tiempo de compuerta de 11 nanosegundos y una tasa de error baja de aproximadamente 4×10^{-3} (Sarma y Hartmann, 2023); esto implica que solo el 0.4 % de las operaciones puede fallar, lo que representa un margen de error mínimo y una mejora significativa en la velocidad en comparación con las implementaciones actuales. Aunque esta técnica es flexible y permite aprender mediante interacción y retroalimentación, requiere mucho tiempo y experiencia, lo que consume recursos. Además, debe equilibrar entre explorar nuevas acciones y aprovechar las conocidas para mejorar los resultados.

CONCLUSIÓN

Las compuertas cuánticas rápidas representan un avance significativo en el desarrollo de la computación cuántica. Su implementación abarca tecnologías como el uso de átomos neutros, iones atrapados y cubits superconductores. Además, se emplean técnicas modernas como el protocolo LSZM y el aprendizaje por refuerzo. Sin embargo, tanto las tecnologías como las técnicas aún están en etapas de investigación y enfrentan desafíos importantes.

Aunque la investigación y el control de procesos en la escala de zeptosegundos impulsaría este avance al permitir realizar cálculos extremadamente rápidos, reduciendo la decoherencia y asegurando la fidelidad de los algoritmos cuánticos, las fluctuaciones inestables en los parámetros de control y las interacciones no deseadas entre los cubits siguen siendo obstáculos en la implementación de compuertas cuánticas en sistemas complejos.

A pesar de los desafíos, avances como la supremacía cuántica demostrada por los procesadores Sycamore y Willow, que mejoran la estabilidad de los cubits, evidencian el gran potencial de la computación cuántica. Aunque estos logros se limitan a tareas específicas, demuestran que se está avanzando en la dirección correcta.

En resumen, es de suma importancia continuar invirtiendo en investigación y desarrollo, para superar estos obstáculos y avanzar hacia computadoras cuánticas escalables, capaces de superar las limitaciones de las computadoras clásicas.

GLOSARIO

Control óptimo: técnica que consiste en encontrar el conjunto de controles externos como campos electromagnéticos o pulsos láser, que optimicen el comportamiento de un sistema cuántico para llevarlo a un estado deseado y minimizar los errores o costos en el proceso.

Cubit: unidad básica de información cuántica que puede estar en el estado $|0\rangle$, en el estado $|1\rangle$, o en una superposición, es decir, en ambos estados al mismo tiempo, pero con diferentes probabilidades.

Decoherencia: pérdida de información cuántica debida a la interacción de los cubits con su entorno.

Desacoplamiento dinámico: técnica que consiste en aplicar pulsos de control (señales externas manipuladoras) sobre el sistema cuántico para generar cambios periódicos en el estado del sistema y suprimir así la interacción no deseada con el entorno.

Fase inicial del campo óptico: valor de la fase de una onda electromagnética antes de interactuar con otros sistemas.

Fidelidad: precisión con la que una operación cuántica se ejecuta.

Pulsos compuestos: técnica que consiste en aplicar una serie de pulsos de control que colectivamente corrigen imperfecciones en el sistema, mitigando errores y minimizando la influencia de perturbaciones externas.



NOTA

Para la elaboración de este trabajo se emplearon herramientas de inteligencia artificial. Se utilizó ChatGPT para realizar una búsqueda preliminar de artículos recientes relacionados con el tema. Además, se empleó para realizar las conversiones de tiempo. Por otro lado, se utilizó Meta para validar y verificar las conversiones realizadas por ChatGPT, con el objetivo de garantizar la exactitud y coherencia de la información presentada.

REFERENCIAS

- Cáceres J, Domínguez D and Sánchez M (2023). Fast quantum gates based on Landau-Zener-Stückelberg-Majorana transitions. *Physical Review A* 108(5):052619.
- Grundmann S, Trabert D, Fehre K *et al.* (2020). Zeptosecond birth time delay in molecular photoionization. *Science* 370(6514):339-341.
- Jaksch D, Cirac J, Zoller P *et al.* (2000). Fast quantum gates for neutral atoms. *Physical Review Letters* 85(10): 2208.
- National Academies of Sciences, Engineering and Medicine. (2018). *Quantum computing: progress and prospects*. The National Academies Press.

Nielsen M and Chuang I (2010). *Quantum Computation and Quantum Information: 10th Anniversary Edition*. Cambridge University Press.

Sarma B and Hartmann M (2023). Designing Fast Quantum Gates with Tunable Couplers: A Reinforcement Learning Approach. *arXiv preprint arXiv:2312.16358*.

Schäfer V, Ballance C, Thirumalai K *et al.* (2017). Fast quantum logic gates with trapped-ion qubits. *arXiv preprint arXiv:1709.06952*.

Taylor R, Bentley C, Pedernales J *et al.* (2017). A study on fast gates for large-scale quantum simulation with trapped ions. *Scientific Reports* 7(1):46197.

Wang C Li X, Xu H *et al.* (2022). Towards practical quantum computers: Transmon qubit with a lifetime approaching 0.5 milliseconds. *npj Quantum Information* 8(1):3.

Werninghaus M, Egger D, Roy F *et al.* (2021). Leakage reduction in fast superconducting qubit gates via optimal control. *npj Quantum Information* 7(1):14.

Giselle N. Morales Rosales
Tecnológico de Estudios Superiores de Chalco
(TESCHA), Tecnológico Nacional de México
giselle_mr@tesch.edu.mx

Manuel Ávila Aoki
Centro Universitario UAEM Valle de Chalco
Universidad Autónoma del Estado de México

Avances de la electrónica orgánica en sensores

José Antonio **Ávila Niño**

El desarrollo de nuevos materiales para su uso en nuestra vida cotidiana ha marcado la pauta en el avance de nuevas tecnologías, las cuales han tenido un impacto significativo al mejorar la calidad de vida de nuestras sociedades. Asimismo, el progreso tecnológico, la productividad y el crecimiento económico de nuestra especie han estado estrechamente ligados al descubrimiento e implementación de nuevos materiales. La fabricación en el laboratorio de macromoléculas, compuestas por cadenas de unidades químicas repetitivas llamadas monómeros, denominadas polímeros sintéticos (para diferenciarlos de los polímeros naturales, tales como el caucho o la celulosa) ha representado un avance en múltiples áreas de investigación, lo que ha permitido su aplicación en diversas tecnologías.

Los polímeros son materiales que han modificado radicalmente nuestra vida; su síntesis en laboratorios viene desde el siglo XIX, cuando Charles Goodyear modificó el caucho, que es un polímero natural, para obtener uno sintético. Al calentar el caucho en presencia de azufre obtuvo el llamado caucho vulcanizado, que hasta el día de hoy se usa en los neumáticos de los automóviles. El primer material termoplástico patentado fue el celuloide, que es un polímero obtenido de la nitrocelulosa mezclada con alcanfor, patentado en 1870. Este material fue descubierto años antes por John Wesley Hyatt, quien buscaba reemplazar el marfil para fabricar bolas de billar.

No fue hasta 1903 cuando se creó el primer polímero verdaderamente sintético, es decir, uno que no dependía

de un producto natural modificado. Este fue la resina fenólica o baquelita, llamada así en honor a su inventor, el químico belga Leo Baekeland. Desde entonces, muchos polímeros se han sintetizado y han pasado a formar parte fundamental de nuestra vida cotidiana, por ejemplo, el tereftalato de polietileno (PET), el cloruro de polivinilo (PVC), el poliestireno, el nailon, entre muchos otros. Estos polímeros son conocidos por su flexibilidad, término que se refiere a la capacidad de doblarse sin romperse, adaptándose a diferentes condiciones.

Por esta razón se les conoce comúnmente como plásticos. Actualmente, los polímeros se emplean para fabricar bolsas y botellas, y para aislar cables conductores de electricidad, ya que son materiales eléctricamente aislantes. En la década de 1970, los estadounidenses Alan Heeger y Alan MacDiarmid, junto con el japonés Hideki Shirakawa, descubrieron que ciertos polímeros podían adquirir conductividad eléctrica tras ser modificados.

En particular, encontraron que un polímero, el poliacetileno, podía conducir electricidad mediante ciertas modificaciones, aunque inicialmente su conductividad era muy baja en comparación con la de los polímeros actuales. La modificación que permite este cambio es la oxidación (remoción de electrones) del poliacetileno al ser “dopado” con fluoruro de arsénico o con iones halógenos. Esto provoca que las cadenas del poliacetileno queden cargadas positivamente, y estas cargas generan una corriente eléctrica cuando se polarizan con una fuente externa. A pesar de que este material pudo conducir una cantidad de electrones que hoy parece pequeña, este descubrimiento representó un nuevo horizonte para el uso de los polímeros sintéticos. Además, abrió una línea de investigación que hoy se conoce como electrónica orgánica, ya que los polímeros están compuestos principalmente por carbono, es decir, forman parte de la materia orgánica (Chiang *et al.*, 1977).

Hideki Shirakawa, Alan Heeger y Alan MacDiarmid fueron galardonados con el Premio Nobel de Química en 2000

[...] por su revolucionario descubrimiento de que los plásticos pueden ser eléctricamente conductivos tras ciertas modificaciones [...]” (NobelPrize.org, 2024).

Estos científicos demostraron que los polímeros, para poder ser conductores, deben presentar en su estructura una disposición alternada de enlaces dobles y simples entre átomos de carbono, conocida como conjugación π , lo que permite el flujo de cargas eléctricas a través de las cadenas del polímero.

Para aumentar la conductividad eléctrica de los polímeros semiconductores es necesario realizar un dopaje, ya sea por medios químicos o electroquímicos. En general, en un sólido, el dopaje consiste en procesos de oxidación (extracción de electrones de la banda de valencia) o reducción (adición de electrones a la banda de conducción), lo que produce materiales con dopaje tipo p (con cargas positivas) y dopaje tipo n (con cargas negativas), respectivamente. Estos procesos se logran mediante la interacción con agentes oxidantes o reductores. Esto significa que al polímero se le puede cargar eléctricamente, permitiendo su dopaje con cargas negativas (electrones) o positivas (huecos) a través de las cadenas del polímero, lo que genera una corriente eléctrica. Sin embargo, lo que ocurre en los polímeros orgánicos es algo diferente a lo que sucede en los inorgánicos, que tienen bandas de valencia y conducción bien definidas.

En los polímeros, los átomos vecinos forman bandas de energía continuas debido al traslape de sus orbitales moleculares. Los orbitales ocupados (con cargas eléctricas) se encuentran en un nivel energético menor, y los desocupados, en uno mayor, separados por una banda energética prohibida. La conducción eléctrica de los polímeros depende del llenado de estos orbitales.

El proceso de dopaje antes explicado provoca la creación de cuasipartículas llamadas polarones, que son esencialmente cargas eléctricas acompañadas de un campo de polarización que genera una distorsión estructural en los orbitales moleculares del polímero orgánico. Estas deformaciones estructurales pueden moverse a lo largo de las

cadenas del polímero y actuar como portadores de carga, completándose así el proceso de conducción eléctrica.

Por otra parte, debido a que los materiales orgánicos presentan un cierto grado de desorden, el proceso de transporte de carga también puede realizarse mediante tunelamiento electrónico o mediante el salto electrónico entre diferentes cadenas poliméricas. A pesar de tener una movilidad electrónica mil veces menor (por ahora) que la de la electrónica convencional principalmente basada en el semiconductor inorgánico silicio, se ha podido encontrar una gran variedad de aplicaciones para la electrónica orgánica.

Los polímeros conductores muestran, por el momento, movilidades eléctricas comparables a las del silicio amorfo. Para tener una idea, el silicio amorfo, que tiene una menor cristalinidad (lo que reduce su conductividad eléctrica) en comparación con el silicio policristalino, y por lo tanto es más barato, se utiliza en paneles fotovoltaicos, pantallas de diodos emisores de luz orgánicos (OLEDs), dispositivos de radiofrecuencia, entre otras aplicaciones.

APLICACIONES

La fabricación de dispositivos electrónicos orgánicos sigue en desarrollo, a pesar de que aún no pueden competir con los materiales inorgánicos utilizados para fabricar dispositivos electrónicos que operan a altas frecuencias, como los microprocesadores. Esto se debe a que la estructura amorfa de los polímeros no permite alcanzar una alta conductividad eléctrica comparada con la de los materiales inorgánicos, que tienen una naturaleza cristalina, entendiéndose esto último como el grado de orden estructural de un sólido. Así, mientras que el polímero amorfo no tiene un principio ordenador en sus cadenas, también existen polímeros semicristalinos en los que algunas de sus cadenas presentan una cierta regularidad estructural a pesar de que nunca llegan a considerarse completamente cristalinas.

Sin embargo, el nicho de estos polímeros conductores es diferente, y las ventajas con respecto a los inorgánicos son tales que, ahora mismo, hay

muchos investigadores e industrias desarrollando estos materiales para la fabricación de dispositivos. En comparación con la electrónica convencional, las ventajas de los dispositivos que usan la electrónica orgánica son su flexibilidad (se pueden doblar), su ligereza, su costo de producción más bajo, su biocompatibilidad, el hecho de que se pueden modificar químicamente de una manera relativamente fácil, y una ventaja principal: muchos de ellos se pueden depositar mediante técnicas de impresión.

Así, han sido utilizados ya en distintas aplicaciones, tales como condensadores, transistores u OLEDs. Por otro lado, las desventajas de la electrónica orgánica actual son su baja conductividad y la degradación ambiental que producen los materiales, aunque últimamente se estén haciendo muchos esfuerzos para mejorar estas características.

EL COPOLÍMERO PEDOT:PSS

Una de las principales aplicaciones de los polímeros conductores es su uso como sensores. Un copolímero está compuesto de dos o más monómeros diferentes. El poli(3,4-etilendioxitiofeno), mejor conocido como PEDOT, es un polímero de la familia de los politiofenos, y tiene una conductividad eléctrica con valores muy cercanos a los de algunos metales, como el cobre. Sin embargo, este polímero es muy inestable y es difícil de solubilizar.

Para solucionar esto, se le agrega otro polímero llamado poli (estireno sulfonato) o PSS, el cual es un oxidante (le quita electrones al polímero PEDOT) y, por tanto, lo carga positivamente; estas cargas eléctricas son las responsables de la conductividad eléctrica del copolímero PEDOT:PSS.

Debido a que es fácil de procesar, es ópticamente transparente, altamente soluble en agua, y biocompatible, este polímero semiconductor es considerado hasta ahora uno de los principales materiales para la fabricación de dispositivos electrónicos orgánicos como capacitores, transistores, celdas solares orgánicas, pantallas táctiles, sensores, entre otros (Crispin *et al.*, 2006).

SENSORES BIOLÓGICOS QUE USAN POLÍMEROS CONDUCTORES

Una de las propiedades de los polímeros conductores es que, a través de sus cadenas, también transportan iones, que son átomos o moléculas cargadas eléctricamente, por lo que se les considera materiales de conductividad mixta (conducen iones y electrones). Esta propiedad particular de los polímeros los ha hecho ideales para llevar a cabo la transducción entre señales iónicas y señales eléctricas, entendiéndose por transducción el proceso de convertir un tipo de energía en otra (Owens y Malliaras, 2010).

La propiedad de conductividad mixta hace que el polímero pueda cambiar su conductividad eléctrica cuando entra en contacto con distintas especies o analitos, debido a reacciones de oxidación y reducción en el copolímero, y por ello estos polímeros son considerados sensores electroquímicos, ya que el copolímero en cuestión es sensible a la presencia de un determinado analito, por lo general en estado líquido, cuya presencia puede detectarse por el nivel de cambio en las propiedades eléctricas del copolímero. Ello ha llevado al uso del copolímero PEDOT:PSS, pero también de otros polímeros, como sensores iónicos y enzimáticos para la detección de metabolitos (biomoléculas producto del metabolismo humano) tales como urea, creatinina, glucosa, entre otros. La detección de niveles inadecuados de estos metabolitos en líquidos corporales como la sangre, el sudor, la orina o la saliva, podría facilitar el diagnóstico temprano de ciertas enfermedades y reducir el costo de los tratamientos (Marks *et al.*, 2022).

Dentro de los sensores electroquímicos, los más utilizados son aquellos que requieren receptores específicos como enzimas o anticuerpos, dependiendo de la sustancia que se desee detectar (Bernards *et al.*, 2008). Un ejemplo destacado son los sensores de glucosa, donde la enzima glucosa oxidasa oxida la glucosa. Durante esta reacción electroquímica, el polímero utilizado en el sensor altera su conductividad eléctrica, pudiendo así monitorear el nivel de glucosa en la muestra (Khan *et al.*, 2020).

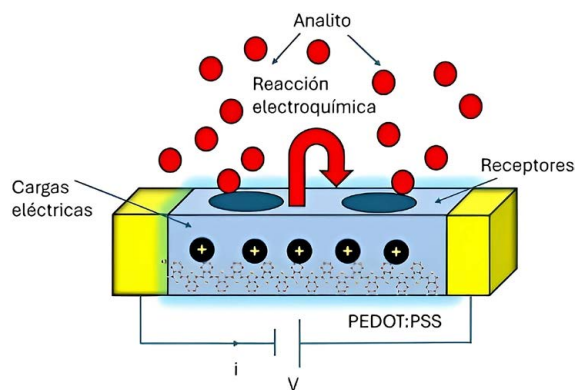


Figura 1. Esquema del principio sensor del copolímero PEDOT:PSS mediante una reacción electroquímica entre el receptor (que puede estar inmovilizado en el polímero, en otro electrodo o en solución junto al analito) y el analito. Una fuente de voltaje (V) genera una corriente (i) a través del copolímero, la cual se ve modificada por efecto de la reacción electroquímica.

Otro caso relevante son los sensores diseñados para detectar biomarcadores como el ácido úrico, cuyo monitoreo en el suero sanguíneo es crucial, ya que niveles elevados pueden provocar problemas renales y la formación de cálculos (Galliani *et al.*, 2020).

La Figura 1 presenta el esquema principal de un sensor electroquímico que utiliza una película del polímero PEDOT:PSS. Los analitos (círculos rojos) entran en contacto con el polímero a través de los receptores. Los receptores reaccionan electroquímicamente con el analito a través de reacciones de oxidación y reducción.

Este proceso genera un cambio en la estructura electrónica del polímero, modificando su capacidad de conducción eléctrica, que se manifiesta en el polímero como la concentración de cargas positivas o huecos que conforman la conductividad del polímero, siendo el cambio de esta última el indicador de la presencia de determinadas reacciones electroquímicas del analito.

CONCLUSIONES

El bajo costo y la rapidez en la fabricación de dispositivos electrónicos basados en materiales orgánicos apuntan, en un futuro cercano, al desarrollo de sistemas mucho más económicos que los actuales y con mayor flexibilidad.



© Honorio Cruz. Profundidad 4. Cerámica de alta temperatura, 127 x 237 cm.

Aunque la brecha en conductividad eléctrica respecto a la electrónica basada en silicio sigue siendo amplia, la electrónica orgánica se considera una tecnología en proceso de maduración. Además, la naturaleza mixta de los polímeros que combinan conductividad iónica y eléctrica, permite transformar magnitudes químicas y biológicas en señales eléctricas medibles. Por ello, estos materiales tienen un futuro prometedor como biosensores. Sin embargo, aún falta un esfuerzo para optimizar las condiciones de conductividad eléctrica de los polímeros orgánicos, así como para mejorar el tiempo de vida de estos materiales, evitando su degradación.

REFERENCIAS

- Bernards DA, Macaya DJ, Nikolou M, DeFranco JA, Takamatsu S and Malliaras GG (2008). Enzymatic sensing with organic electrochemical transistors. *Journal of Materials Chemistry* 18:116-120.
- Chiang CK, Fincher Jr CR, Park YW, Heeger AJ, Shirakawa H, Louis EJ, Gao SC and MacDiarmid AG (1977). Electrical conductivity in doped polyacetylene. *Physical Review Letters* 39:1098.
- Crispin X, Jakobsson FLE, Crispin A Grim PCM, Andersson P, Volodin AV, van Haesendock C, van der Auweraer M, Salaneck WR and

Berggren M (2006). The origin of the high conductivity of poly (3, 4-ethylenedioxythiophene)-poly (styrenesulfonate) (PEDOT-PSS) plastic electrodes. *Chemistry of Materials* 18:4354-4360.

Galliani M, Diacci C, Berto M, Sensi M, Beni V, Berggren M, Borsari M, Simon DT, Biscarini F and Bortolotti CA (2020). Flexible printed organic electrochemical transistors for the detection of uric acid in artificial wound exudate. *Advanced Materials Interfaces* 7:2001218.

Khan S, Ali S, Khan A, Wang B and Bermak A (2020). Printing sensors on biocompatible substrates for selective detection of glucose. *IEEE Sensors Journal* 21:4167-4175.

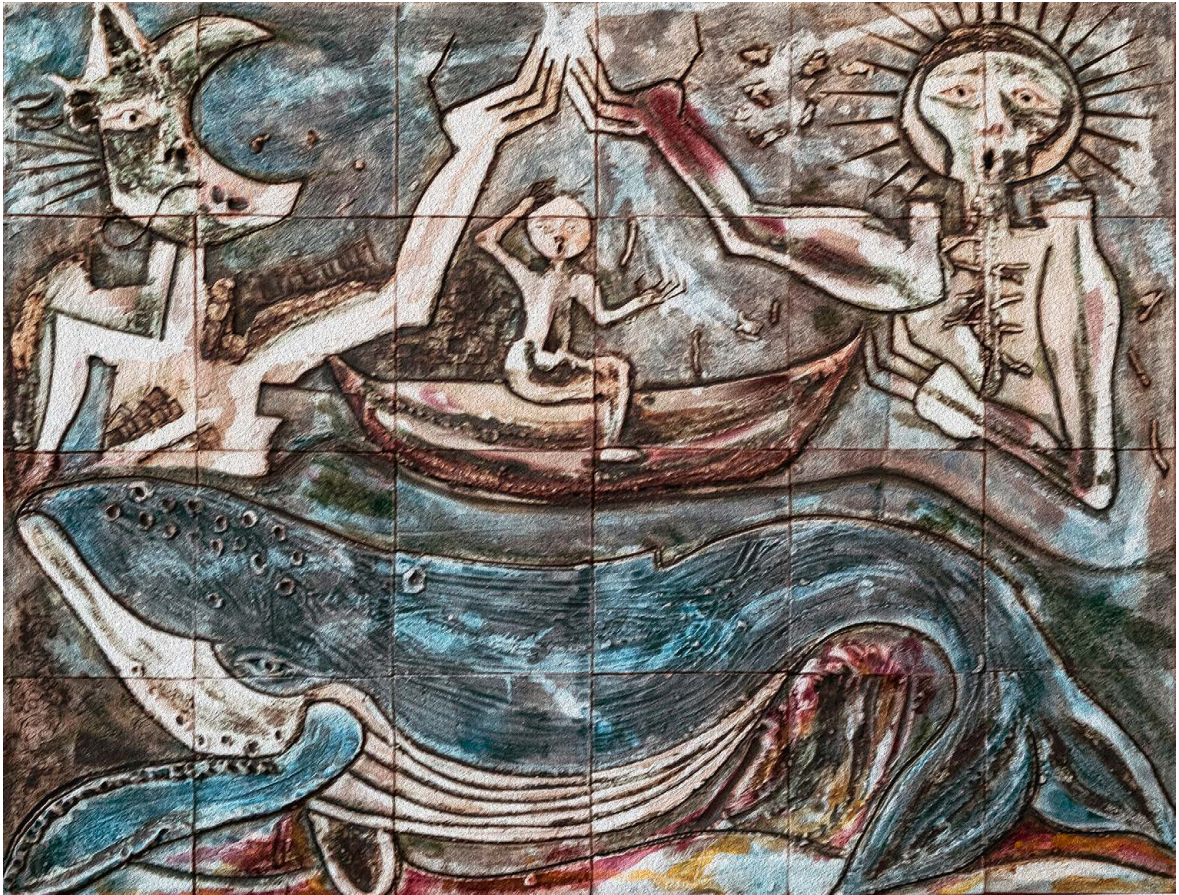
Marks A, Griggs S, Gasparini N and Moser M (2022). Organic electrochemical transistors: an emerging technology for biosensing. *Advanced Materials Interfaces* 9:2102039.

NobelPrize.org (2024). The Nobel Prize in Chemistry 2000. *Nobel Prize Outreach AB* 2024. www.nobelprize.org/prizes/chemistry/2000/summary/.

Owens RM and Malliaras GG (2010). Organic electronics at the interface with biology. *MRS Bulletin* 35:449-456.

José Antonio Ávila Niño
CONAHCYT-CIATEQ AC
Centro de Tecnología Avanzada
Unidad Jalisco
jose.avila@ciateq.mx

© **Honorio Cruz**. *Los guardianes de la mar III*. Cerámica de alta temperatura, 116 × 152 cm.



Diagnóstico del trastorno del espectro autista con perspectiva de género

Giovanna **Ferman García**
Magali **Huerta Reyes**

Aunque el trastorno del espectro autista (TEA) se ha investigado y descrito desde hace décadas, no ha sido estudiado lo suficiente desde una perspectiva de género. En México no existe un censo oficial que muestre una comparación exacta entre hombres y mujeres: en una revisión sistemática de 2017, por cada tres hombres diagnosticados hay una mujer (Loomes *et al.*, 2017, citado por Pérez, 2023), y en el caso del autismo de alto funcionamiento la relación aumenta a 10 hombres por una mujer (Dworzynski *et al.*, 2012, citado por Pérez, 2023). Si bien la cantidad de niños y niñas con TEA se puede relacionar con una mayor prevalencia en el sector masculino, las diferencias antes mencionadas pueden sugerir un camuflaje en el caso de las mujeres con autismo de alto funcionamiento.

Es importante recordar que la detección y atención temprana contribuyen a una mejora significativa en el desarrollo de habilidades y la calidad de vida de personas con TEA. Para aquellas mujeres que reciben diagnósticos tardíos, esto se dificulta y provoca consecuencias negativas en diversos ámbitos, especialmente en el bienestar emocional.

El diagnóstico tardío de TEA en mujeres se puede deber a diferentes factores, González (2024) refiere que se han descubierto 70 genes en el cromosoma X que se relacionan con el TEA, y dos con el cromosoma Y, lo que sugiere que, en el caso de las mujeres, si un cromosoma X tiene

estos genes mutados, el otro podría compensar estas funciones, lo que no ocurriría en los hombres, haciendo más evidentes las características. Por otra parte, la evidencia ha mostrado que los errores en el diagnóstico del autismo en mujeres se asocian con el incremento de la incidencia de comorbilidades con problemas psiquiátricos (Hervás, 2022).

Por lo anterior, resulta una necesidad detectar cuáles son las deficiencias que influyen en el diagnóstico del autismo para que sea posible implementar estrategias que contribuyan a solucionar esta problemática que impacta negativamente la vida de muchas personas.

Para ello, es imprescindible cuestionar: ¿existen diferencias en las manifestaciones clínicas entre hombres y mujeres con TEA? Si existen, ¿estas han sido lo suficientemente investigadas?, ¿los manuales e instrumentos empleados para la detección consideran las características clínicas de hombres y mujeres?, ¿qué papel juegan las expectativas de género en la infradetección del sector femenino con TEA?

En primer lugar, se debe comprender en qué consiste el TEA e indicar las diferencias sintomáticas que se presentan entre hombres y mujeres. Lo anterior, con el fin de analizar la influencia del género en el proceso diagnóstico y detectar aquellos factores en los que existe un sesgo a causa de este.

TRASTORNO DEL ESPECTRO AUTISTA

El TEA es una alteración en el neurodesarrollo que se presenta en las primeras fases del desarrollo e influye en las habilidades de comunicación y en la conducta, al igual que en la interacción social. Las personas afectadas tienden a tener dificultades en la flexibilidad cognitiva, la cual es una función ejecutiva que permite moldear los pensamientos y comportamientos a situaciones cambiantes, así como problemas en la comunicación verbal y no verbal, intereses restringidos y comportamientos repetitivos y restrictivos (Adiego, 2021).

Al ser un espectro, cada caso es diferente y no hay una sola forma de exhibir los síntomas; dicha

heterogeneidad en la manifestación de síntomas se debe a muchos factores, como el nivel de gravedad en relación con la ayuda que se requiere, el contexto social, la dinámica familiar, etcétera. Por tal motivo, el diagnóstico debe ser realizado por un profesional capacitado mediante el uso de herramientas adecuadas (Ariza, 2021).

DIFERENCIA EN LAS MANIFESTACIONES CLÍNICAS ENTRE HOMBRES Y MUJERES

Un aspecto que influye en la variabilidad del espectro es el sexo/género. Independientemente de las causas neurobiológicas y sociales, hay estudios que dejan en evidencia que ciertos rasgos se presentan de manera diferente (Hernández *et al.*, 2022).

Durante la infancia, las niñas generalmente muestran los síntomas de manera más sutil que los niños. Esto se debe principalmente a las habilidades más desarrolladas de adaptación al entorno social, lo que las lleva a la imitación de la interacción social que observan de familiares, compañeros de escuela e incluso películas y series. Lo anterior provoca que realicen un “camuflaje” de las manifestaciones clínicas (Hervás, 2022).

Las capacidades limitadas para relacionarse de las niñas con TEA dejan de ser suficientes a medida que crecen, ya que los vínculos de amistad se vuelven más complejos, lo que provoca que los rasgos de TEA sean más notorios. Estas complicaciones se enfatizan durante la adolescencia debido a la necesidad de apoyo emocional y reciprocidad, mientras que los hombres en esta etapa se centran en las acciones y no en comunicarse (Hervás, 2022).

La manifestación de la actividad de los sistemas regulatorios, como la evitación o la supresión ante situaciones que generan malestar emocional, y conductas compensatorias involucradas en el camuflaje de los síntomas, ocurren con mayor frecuencia en mujeres con TEA que en hombres. Hay una tendencia de las niñas con este trastorno a imitar la interacción social que observan, ya sea de personajes del contenido de entretenimiento que consumen, de familiares, compañeros o cualquier persona de su entorno. Esto se vuelve un obstáculo para los

Manifestaciones clínicas en hombres	Manifestaciones clínicas en mujeres
Menor fluidez verbal.	Menor coordinación visomotora.
Mejor capacidad de integración en actividades estructuradas.	Funciones ejecutivas avanzadas más desarrolladas.
Motivación social inferior.	Mayor deseo de socialización.
Conductas repetitivas e intereses restringidos notables.	Nivel de empatía superior.
Intereses restringidos enfocados a objetos, hechos y aficiones.	Implementación de sistemas de regulación y conductas compensatorias.
La minoría emplea comportamientos de camuflaje de los síntomas.	Observación e imitación de las interacciones sociales.
Comorbilidad con alteraciones de la conducta, hiperactividad y dificultades en el lenguaje.	Intereses restringidos enfocados a la información de personas y acordes a los estereotipos de género.
Generalmente los síntomas son notorios desde la infancia.	La mayoría emplea comportamientos de camuflaje de los síntomas.
	Comorbilidad con depresión, ansiedad y trastornos de la conducta alimentaria.
	Generalmente los síntomas son notorios hasta la adolescencia.

Tabla 1. Diferencias en las manifestaciones clínicas entre hombres y mujeres con trastorno del espectro autista.

evaluadores, ya que disimula los síntomas, lo que influye en el diagnóstico (Pérez, 2023).

Otro aspecto que difiere por género es el objeto de su interés restringido. Mientras a los niños con TEA les atrae aquello relacionado con hechos, cosas o aficiones, las mujeres se enfocan en aspectos relacionados con la información de las personas y temas acordes a los estereotipos de género (Pérez, 2023).

Ariza (2021) señala las siguientes diferencias por sexo/género de acuerdo con su edad y etapa:

- *Niños y niñas de 0 a 3 años.* Las niñas tienen un mejor desempeño en la comunicación e inferior en la motricidad en comparación con los niños.

- *Edad escolar.* Las niñas “camuflan” los síntomas principalmente mediante la imitación de los comportamientos que observan en los demás, situación menos común en niños. También tienen mayor capacidad de usar comportamientos compensatorios para socializar, disimulando los desafíos sociales que enfrentan. Los niños generalmente prefieren jugar solos y las niñas buscan más la plática con sus compañeros y compañeras, aunque hay ocasiones

en las que no logran integrarse. En la atención audiovisual, las niñas muestran un mayor nivel.

- *Adolescencia.* Las mujeres optan por grupos de amistades reducidos dando especial atención al apoyo, no se interesan por amigos secundarios y tienen problemas para manejar los conflictos con sus amistades. Por otro lado, los hombres tienen una concepción más práctica de la amistad y enfocada a hacer actividades en conjunto, restando importancia a los conflictos y priorizando los intereses en común.
- *Población adulta.* Los hombres con TEA tienen mayores intereses circunscritos y menor gravedad en la sintomatología sensomotora que las mujeres con TEA. También las mujeres se muestran con mayores habilidades estratégicas y capacidad de camuflaje, y menor en la memoria de trabajo.

A manera de resumen, en la Tabla 1 se pueden observar, de forma global, algunas diferencias entre hombres y mujeres con respecto a las manifestaciones clínicas del trastorno del espectro autista.

DETECCIÓN DEL TEA Y SESGO DE GÉNERO

El primer paso para que las niñas y los niños con TEA sean diagnosticados correctamente ocurre cuando los adultos alrededor se dan cuenta de que tienen dificultades en las áreas de comunicación, conducta e interacción social. Esto se dificulta en el caso de las mujeres al interpretar los síntomas como conductas esperadas e incluso deseadas por el entorno social (por ejemplo, que sean calladas, tranquilas y tímidas). Caso contrario en los hombres, de quienes se espera mayor dinamismo y extroversión.

Si bien hay diferencias en la manera en que se presentan los síntomas, incluyendo la sutileza de los síntomas en las niñas, no menos cierto es que estos son minimizados y aceptados socialmente como algo típico y adecuado (Carvajal *et al.*, 2021).

Las expectativas de género no solo afectan la percepción de los adultos hacia el infante retrasando la búsqueda de una atención adecuada, también implican una mayor presión y exigencia a las niñas para que socialicen mediante la conversación, y los niños, mediante el juego. Esto influye en gran medida en el camuflaje mayormente empleado por mujeres, pues es a ellas a quienes se les demanda tener actos de cordialidad como el contacto visual, sonreír, entablar conversaciones, etcétera (Carvajal *et al.*, 2021).

Los profesionales encargados de detectar el TEA también pueden estar influidos por lo que se espera de cada género. Esto, aunado a una formación sobre cómo debe ser una persona con TEA, basada principalmente en las características clínicas de los hombres, aumenta las probabilidades de caer en interpretaciones incorrectas de los comportamientos de las mujeres. Durante la infancia es común que el sector femenino reciba diagnósticos incorrectos debido a la confusión que generan las diferencias en las manifestaciones clínicas. Además, el camuflaje puede provocar mayor confusión y contribuir a diagnósticos incorrectos, como ansiedad, trastornos del lenguaje, etcétera (Hernández *et al.*, 2022).

La concepción general del perfil de una persona con TEA es afectada significativamente por el sesgo de género en investigaciones y las herramientas empleadas para el diagnóstico. Aunque en la actualidad es sabido que los síntomas se presentan de manera diferente en hombres y mujeres, con respecto a las características particulares del sector femenino no se ha estudiado lo suficiente y la información que existe al respecto es insuficiente para la adaptación de procesos diagnósticos y métodos de evaluación, así como para la formación de los profesionales encargados (Hernández *et al.*, 2022).

La mayoría de los estudios tienden a considerar únicamente a la población masculina con TEA o una cantidad mínima de mujeres, englobando a toda la población en un mismo rubro sin realizar estudios con muestras equitativas ni mostrar las particularidades o comparaciones en los resultados de cada sexo/género. Ejemplo de esto es el estudio llevado a cabo en Colombia por Zuluaga y colaboradores (2023), donde los participantes son 15.4 % de género femenino y 84.6 % de género masculino. Los resultados obtenidos coinciden en gran medida con el perfil tradicional del TEA sin considerar las diferencias de sexo/género, lo que contribuye a la invisibilización de las necesidades de las niñas y mujeres con TEA.

Respecto a los instrumentos utilizados para la detección, los más populares son ADOS-2 y ADI-R. Ambos carecen de perspectiva de género; con el ADOS-2, por ejemplo, el evaluador puede confundir fácilmente los déficits sociales y de comunicación con rasgos de la personalidad, como la timidez. Por otro lado, empleando el ADI-R puede que no se detecten los síntomas al hacer énfasis en la infancia, etapa en la cual son más sutiles en las niñas con TEA (García, 2023) (Figura 1)

CONSECUENCIAS DEL DIAGNÓSTICO TARDÍO EN MUJERES

La infradetección y el diagnóstico tardío son problemas que afectan en gran medida la vida de las mujeres con TEA. En primer lugar, por el desgaste emocional, económico e incluso familiar que esto

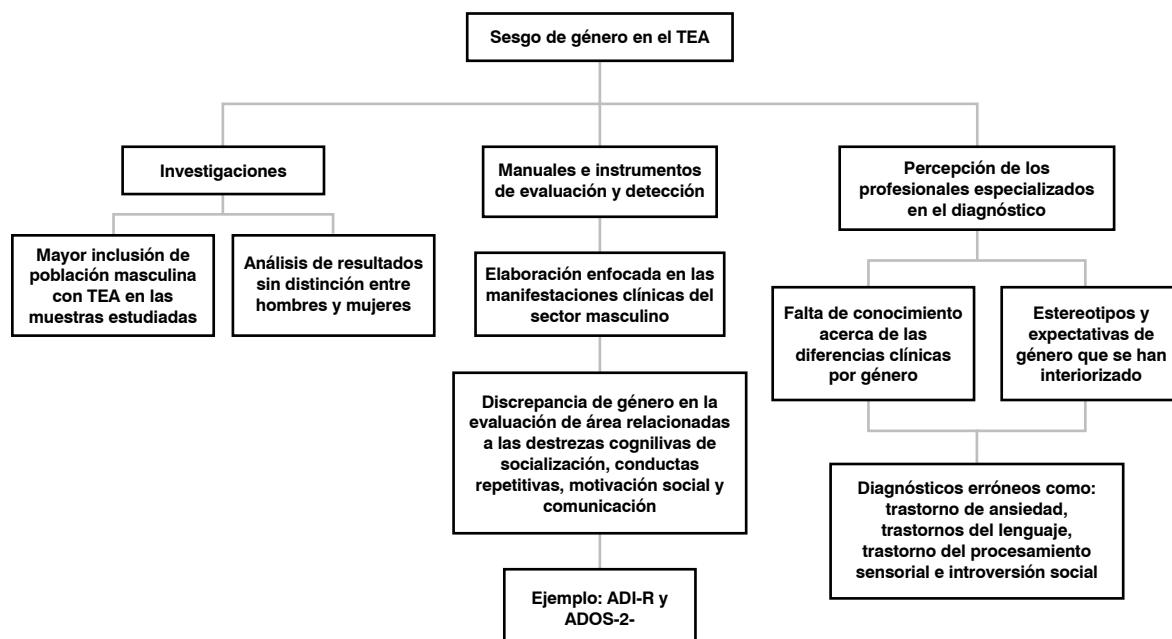


Figura 1. El sesgo de género en el trastorno del espectro autista. Elaboración propia.

puede representar, ya que generalmente el diagnóstico correcto llega después de varios fallidos. Cada evaluación para llegar a un nuevo diagnóstico, la intervención y reiniciar el proceso al no ver los resultados esperados significa la inversión de una cantidad de dinero significativa. Además, cada que una intervención no da los resultados deseados, tanto la familia como la mujer diagnosticada pasan por frustración y malestar emocional (Leiva, 2022).

Los cuidadores, al no conocer y comprender su condición, no cuentan con la capacitación necesaria para atender a una niña con TEA. Esto puede provocar una crianza e infancia traumática. De igual manera, que las mujeres con TEA no puedan entender sus síntomas propicia problemas emocionales como la frustración, el estrés, la ansiedad y la depresión (Leiva, 2022).

CONCLUSIONES

El sesgo de género en el diagnóstico del TEA se encuentra presente desde las investigaciones que se realizan alrededor de este trastorno. En gran número de estudios se han ignorado las particularidades sintomatológicas y contextuales de las mujeres. Las muestras de estudio tienden a excluir a las mujeres

o incluirlas en una cantidad significativamente menor. Además, comúnmente no se hace distinción entre los resultados de hombres y mujeres, sino que son valorados como una población general. Al ser predominantemente varones, la información obtenida se inclina a sus características clínicas.

Los conocimientos sobre la diferente manifestación del TEA en niñas y mujeres no se han trasladado en el diseño de manuales e instrumentos para la evaluación y el diagnóstico. Es necesaria la creación de herramientas que se basen en la perspectiva de género adaptadas a la población mexicana a fin de aminorar la infradetección y los diagnósticos tardíos en las mujeres.

Un factor determinante para que las niñas con TEA reciban el diagnóstico adecuado y de forma atinente es la formación y percepción del especialista encargado de la detección. Todas las personas nos encontramos sumergidas en un contexto cultural y social que trae consigo expectativas y estereotipos de género, lo que no excluye a quien cumple el papel de evaluador. Sin embargo, es importante que esto no afecte su percepción al hacer las observaciones clínicas y calificar las pruebas aplicadas.



© Honorio Cruz. *Máscara*. Cerámica de alta temperatura.

Para ello, se debe implementar una perspectiva de género que contribuya al fácil acceso a un diagnóstico correcto a las niñas con TEA y permita que reciban la atención terapéutica pertinente para el favorecimiento de su desarrollo. Esto implica que se capaciten respecto a las particularidades del sector femenino con esta condición. Además, es necesario que los evaluadores se cuestionen a sí mismos respecto de las atribuciones que le dan a cada género, de manera que no asuman que algún rasgo es propio de una mujer en lugar de considerarlo como un síntoma de autismo.

La atención temprana mejora el desarrollo de habilidades, aminora el malestar emocional, evita el desgaste económico en procesos e intervenciones que no brindan resultados positivos y mejora la calidad de crianza por parte de los padres o cuidadores al poder acceder a la información para hacerlo de manera adecuada a su condición y necesidades. Esto no es posible para las mujeres que reciben diagnósticos tardíos, además de provocar comorbilidades con ansiedad, depresión, entre otros problemas psicológicos.

El sesgo de género respecto al TEA es un problema que requiere ser solucionado para mejorar la calidad de vida de las niñas y mujeres con este trastorno del neurodesarrollo. Para ello, se requiere implementar una perspectiva de género en las investigaciones, la elaboración de manuales, guías e instrumentos para la evaluación y detección y en la formación de los profesionales especializados en TEA. De esta manera, se podrá reducir la falibilidad del proceso diagnóstico, brindando la atención adecuada de manera temprana y mejorando el desarrollo de las niñas y mujeres con el diagnóstico.

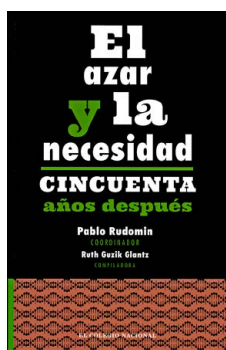
REFERENCIAS

- Adiego A (2021). El trastorno del espectro autista: revisión bibliográfica del concepto de autismo y vinculación con el mundo de las emociones. Recuperado de: <https://zaguan.unizar.es/record/106419/files/TAZ-TFG-2021-2062.pdf>.
- Ariza M (2021). Diferencias clínicas del trastorno del espectro autista por género. Recuperado de: <https://zaguan.unizar.es/record/111300/files/TAZ-TFG-2021-578.pdf>.
- Carvajal J, Riveros C, Robinson S y Farías V (2021). Influencia de las expectativas de género en las dificultades diagnósticas en mujeres con Trastorno del Espectro Autista. *Revista de Estudiantes de Terapia Ocupacional* 8(1):64-82.
- García M (2023). Discrepancias de género en los procesos diagnósticos del Trastorno del Espectro Autismo: una revisión de literatura sistemática acerca de las niñas silenciadas. *Ciencias de la Conducta* 38(1):4-25.
- González A (2024). Las diferencias entre los sexos en el autismo. Recuperado de <https://www.gaceta.unam.mx/las-diferencias-entre-los-sexos-en-el-autismo/>.
- Hernández C, Verde M, Vidriales R, Plaza M y Gutiérrez C (2022). Recomendaciones para la detección y el diagnóstico del trastorno del espectro del autismo en niñas y mujeres. Recuperado de: https://www.observatoriodelainfancia.es/oia/esp/documentos_ficha.aspx?id=7935.
- Hervás A (2022). Género femenino y autismo: infra detección y diagnósticos. *Medicina (Buenos Aires)* 82:37-42.
- Leiva M (2022). Mujeres autistas chilenas diagnosticadas en edad adulta: Consecuencias y dificultades durante el proceso. *Psiquiatría y Salud Mental* 3/4:96-101.
- Pérez K (2023). Perspectivas únicas: el espectro autista en mujeres. *Revista Digital Universitaria* 24(6):1-11.
- Zuluaga T, Delgado A, Zuluaga J, Aguirre L, Sánchez J, Salamanca L, Restrepo F, Naranjo C, Orrego M y Giraldo L (2023). Perfil cognitivo y social en niños y niñas con Trastorno del Espectro Autista. *Quaderns de Psicologia* 25(1):1-23.

Giovanna Ferman García
Magali Huerta Reyes
Facultad de Psicología
Universidad Veracruzana
maghuerta@uv.mx

El azar y la necesidad cincuenta años después

Francisco **Pellicer Graham**



EL AZAR Y LA NECESIDAD
CINCUENTA AÑOS DESPUÉS
PABLO RUDOMÍN (COORDINADOR)
RUTH GUZIK GLANTZ (COMPILADORA)
El Colegio Nacional
Primera edición; Ciudad de México, 2024

¿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 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, convocados y reunidos por otro experto, Pablo Rudomín, 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.



A continuación, haré una diminuta glosa, simplemente a manera de ejemplo, de tres coautores “al azar” de esta obra magnífica.

Susana Lizano nos llevará al punto de partida: *Origen y evolución del universo*, el origen de los *loci* que propiciaron y dieron inicio al universo y a la vida, poniendo en perspectiva al azar en estos procesos y, como menciona Lizano de la obra de Monod:

[...] los objetos y los seres vivos en el universo se pueden explicar a partir de los principios básicos, pero no se pueden predecir objetos particulares [...].

Azar y determinismo es el título que propone Enrique Hernández Lemus, el cual pone el punto sobre las íes; inicia definiendo el azar desde el punto de vista de la teoría de la probabilidad, una visión matemática y por ende acotada y mesurable pero que tiene como consecuencia de su complejidad el llevarlo a decir cuando le preguntan:

¿qué es el azar? Que él responda categórico, ¡No sé! Y es así como plantea organizar con el principio de incertidumbre este dilema fundamental que plantea Monod.

La última visita de este *tour* es a la sala del *Azar*, *necesidad, imaginación*; a cargo de Liliana Weinberg; en su recorrido nos ofrece la hermenéutica de lo social: el lenguaje, el arte, valores como la ética y los procesos mentales que dan lugar a la presencia de cosas, ideas, lugares y personas incorpóreas físicamente inexistentes pero posibles gracias a la imaginación, al azar y a la necesidad. Una narración que puentea personajes y sus ideas con la construcción de cultura, esencia absoluta de la sociedad humana.

Esto es una pequeña probada de lo que el lector puede encontrar en los restantes catorce ensayos que conforman este compendio imperdible.

Francisco Pellicer Graham
Laboratorio de Fisiología Integrativa
Instituto Nacional de Psiquiatría
Ramón de la Fuente Muñiz, México D.F.
pellicer@imp.edu.mx



