

ciencia

Revista de la Academia Mexicana de Ciencias

Programación fetal: salud y enfermedad

El lenguaje secreto del tejido
adiposo materno y la
programación fetal

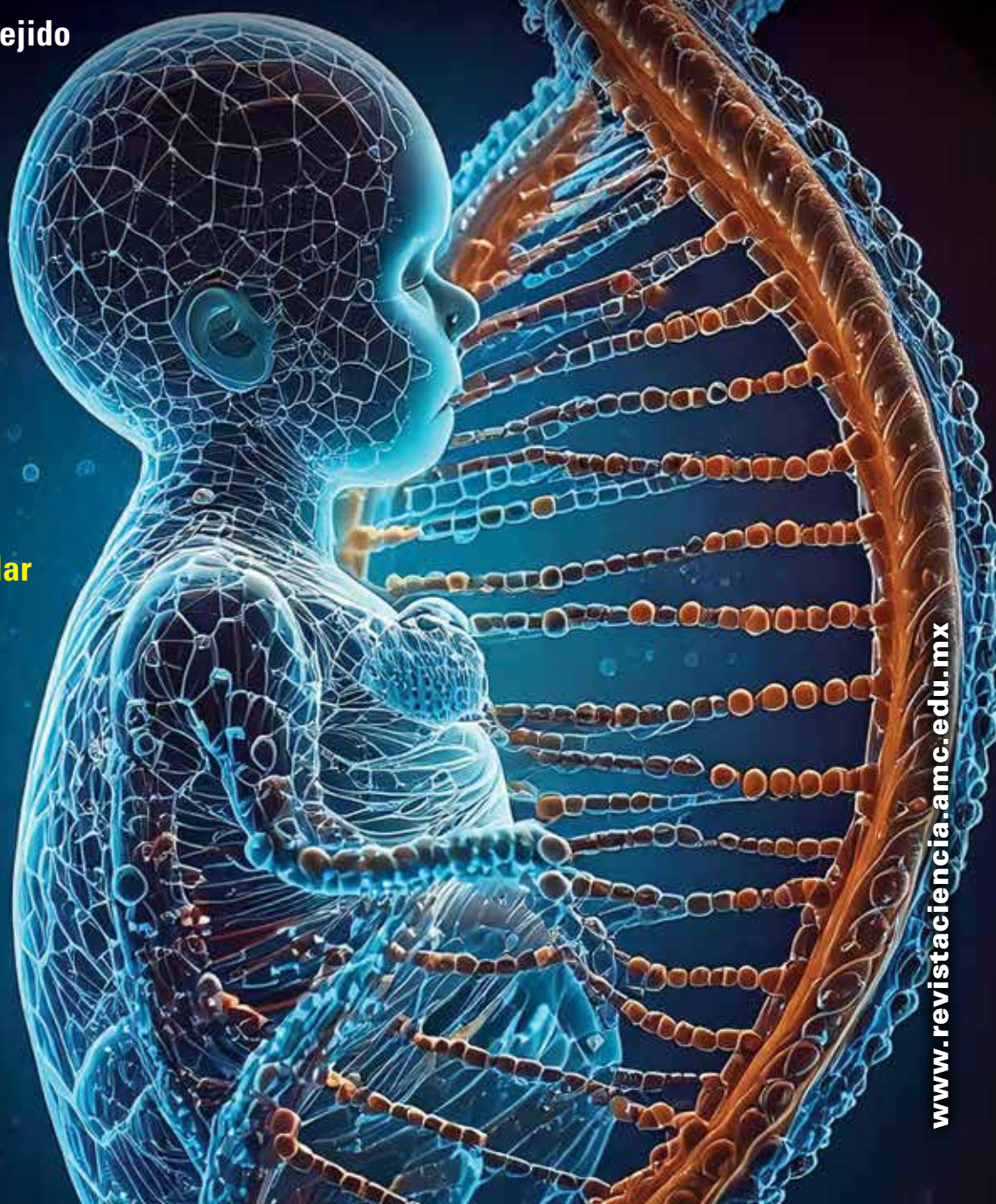
¿Están nuestras
enfermedades
programadas
antes de nacer?

Lactancia, un sendero
para la inmunidad y el
desarrollo del cerebro

El papel de la placenta
en la salud cardiovascular

Los musgos:
bioindicadores de la
salud del ecosistema

Impulsando nuestra
comprensión del
universo con
inteligencia artificial



www.revistaciencia.amc.edu.mx



CONSEJO DIRECTIVO

agosto 2023 – agosto 2026

Presidente

José Antonio Seade Kuri

Vicepresidenta

Telma Gloria Castro Romero

Tesorera

Gloria Soberón Chávez

Secretarios

Elva Guadalupe Escobar Briones

Sergio López Ayllón

Presidentes de las Secciones Regionales de la AMC

Sección Noreste: Gloria María González González

Sección Noroeste: María Teresa Viana Castrillón

Sección Centro-Occidente: Alejandro De las Peñas Nava

Sección Centro-Sur: José Ramón Eguibar Cuenca

Sección Sur-Sureste: Dalila Aldana Aranda

Desde el Comité Editorial	3
<i>Alonso Fernández Guasti</i>	

Programación fetal: salud y enfermedad	
Presentación. La importancia de los primeros 1 000 días de vida	6
<i>Guadalupe Estrada-Gutiérrez e Ignacio Camacho-Arroyo</i>	
¿Están nuestras enfermedades programadas antes de nacer?	8
<i>Guadalupe Estrada-Gutiérrez e Ignacio Camacho-Arroyo</i>	
El papel de la placenta en la salud cardiovascular	14
<i>Salvador Espino y Sosa y Johnatan Torres-Torres</i>	
El lenguaje secreto del tejido adiposo materno y la programación fetal	20
<i>Jorge Valencia-Ortega, Miranda Molerés-Orduña y Juan Mario Solís-Paredes</i>	
Las vitaminas y minerales durante el embarazo: beneficios para una nueva vida	26
<i>Ameyalli M. Rodríguez-Cano y Otilia Perichart Perera</i>	
Ovarios poliquísticos: una batalla hormonal desde la vida intrauterina	32
<i>Enrique Reyes-Muñoz, Lidia Arce-Sánchez y Nayeli Martínez-Cruz</i>	
La salud mental perinatal y el desarrollo del cerebro infantil	38
<i>Arturo Alejandro Canul Euan, Sandra Martínez Medina y Blanca Vianey Suárez Rico</i>	
Lactancia, un sendero para la inmunidad y el desarrollo del cerebro	46
<i>Ismael Mancilla Herrera y Gabriela González Pérez</i>	
El uso de la inteligencia artificial en la programación fetal	52
<i>Héctor Borboa-Olivares y Omar Piña-Ramírez</i>	

Novedades científicas	
Los musgos: bioindicadores de la salud del ecosistema	60
<i>María Isabel Agustín Jiménez, Carmen Zepeda Gómez y Javier Manjarrez</i>	
Las neuronas artificiales y su papel central en la inteligencia artificial	68
<i>Tzolkín Garduño Alvarado, Feliú Sagols Troncoso y Gunnar Wolf</i>	
Celdas solares orgánicas: una tecnología viable para México	76
<i>Ian Carlos Flores Contreras, Yenny L. Casallas-Moreno y Luis Martín Reséndiz Mendoza</i>	

De actualidad	
Impulsando nuestra comprensión del universo con inteligencia artificial	83
<i>Elizabeth Martínez Gómez</i>	

Desde las redes	
Endosimbiosis artificial	89
Evo, la inteligencia artificial en el genoma	90
¿Deberíamos buscar nuevos fármacos contra la malaria?	92
<i>José Eduardo González Reyes</i>	

Noticias de la AMC	
	93



Portada: Firefly.



Separador: Firefly.

ciencia, revista de la Academia Mexicana de Ciencias, volumen 76, número 1, correspondiente a enero-marzo de 2025, es una publicación electrónica trimestral, editada y distribuida por la Academia Mexicana de Ciencias, A. C., con domicilio en Casa Tlalpan, km 23.5 de la Carretera Federal México-Cuernavaca, Av. Cipreses S/N, Col. San Andrés Totoltepec, Alcaldía Tlalpan, C. P. 14400, Ciudad de México, tel. 55 5849 4905, www.revistaciencia.amc.edu.mx, rciencia@unam.mx.

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

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

ciencia

Revista de la Academia Mexicana de Ciencias
enero-abril 2025 volumen 76 número 1

Director fundador

Ignacio Bolívar Urrutia (1850-1944)

Director

Alonso Fernández Guasti

Comité editorial

Raúl Antonio Aguilar Roblero
Dalila Aldana Aranda
Raymundo Cea Olivares
Gabriela Dutrénit Bielous
Gerardo Gamba Ayala
Adolfo Guzmán Arenas
Juan Pedro Laclette San Román
Miguel Ángel Pérez de la Mora
Carlos Prieto de Castro
Sergio Sánchez Esquivel
Alicia Ziccardi Contigiani

Editora

Rosanela Álvarez

Corrección y enlace con autores

Leticia García Urriza

Social Media

José Eduardo González Reyes

Diseño y formación

Intidrinero, S.A. de C.V.

Ilustradora

Ana Viniegra, pp. 15, 21, 39, 65, 69
Pixabay: pp. 12, 16, 17, 24, 47, 49, 50, 61, 64, 73, 74, 77, 78, 82
Shutterstock: pp. 3, 4, 11, 27, 29, 30, 36
Firefly (IA generativa de Adobe): pp. 9, 33, 44, 53, 57, 59

Red

Walter Galván Tejada

Academia Mexicana de Ciencias, A.C.

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

www.revistaciencia.amc.edu.mx



@CienciaAMC

 **ÍNDICE DE REVISTAS MEXICANAS**
DE DIVULGACIÓN CIENTÍFICA Y TECNOLÓGICA

Este número de la revista *Ciencia* ha sido posible gracias al patrocinio del
INSTITUTO NACIONAL DE PERINATOLOGÍA

Desde el Comité Editorial

Estimados lectores:

Muy bienvenidos al primer número de la revista *Ciencia* de este 2025. Tenemos el gusto de presentarles este número dedicado a “Programación fetal: salud y enfermedad. La importancia de los primeros 1 000 días de vida”. Se trata de una serie de artículos, escritos por expertos del Instituto Nacional de Perinatología (al que agradezco el financiamiento del número) y coordinado por los doctores Ignacio Camacho Arroyo y Guadalupe Estrada Gutiérrez. Los textos de esta sección temática muestran el papel esencial que tienen los factores internos y medioambientales durante el embarazo y los primeros años de vida sobre la salud futura de los individuos. En esta parte hay respuestas a las siguientes preguntas: ¿afecta el neurodesarrollo la salud mental?, ¿es un mito o una realidad que la maternidad es un momento naturalmente feliz, lo mejor que le puede pasar a una mujer?, ¿qué efecto tiene la obesidad materna y la diabetes durante el embarazo en la salud de la descendencia?, ¿qué tan importante es la alimentación materna y durante los primeros 1 000 días de vida para el desarrollo del bebé? Además, descubran cómo errores en la placenta pueden favorecer la aparición de alteraciones cardiovasculares y lean sobre la idea de que el síndrome de ovario poliquístico –la forma más común de infertilidad– puede tener su origen durante el desarrollo intrauterino. Entérense de que la lactancia materna es fundamental para la inmunidad del recién nacido, estimula su desarrollo neurológico e impacta



sobre sus habilidades cognitivas. Por último, pero no menos importante, sorpréndanse de saber que se empieza a trabajar en el manejo y análisis de datos mediante inteligencia artificial para explorar, predecir y prevenir posibles efectos de la programación fetal.

Pero si ya están nuestras enfermedades programadas antes de nacer, ¿se pueden prevenir?, ¿qué beneficio nos otorga saberlo?, ¿hay algo que podamos hacer para alterar ese determinismo?

En seguida de la sección temática, encuentren tres Novedades científicas de temas muy diversos. En la primera descubran que los musgos son un gru-

po de plantas que ofrecen grandes servicios ambientales; por ejemplo, reducen la erosión, participan en la regulación del ciclo hidrológico y ayudan a monitorear la salud del ecosistema. Por ello es importante cuidarlos y evitar comprarlos en época navideña.

En otro artículo lean sobre el aprovechamiento de la energía solar para generar electricidad. Se trata de una alternativa para el desarrollo de energía renovable. Descubran qué son las celdas solares orgánicas, cómo funcionan y cuáles son sus características fisicoquímicas. Además, el artículo reporta la investigación que se está desarrollando en México y



los retos que representa la industrialización de estos dispositivos.

Otro texto de esta sección estudia el concepto de neuronas artificiales (denominadas perceptrones) y redes neuronales (los perceptrones multicapa), así como su papel en modelos matemáticos básicos en el desarrollo de la inteligencia artificial. No les temen a las matemáticas, se trata de fórmulas simples que nos explican que los perceptrones son bloques sencillos de construcción que, al ordenarse en redes neuronales multicapa, se convierten en el fundamento de las técnicas de inteligencia artificial.

Siguiendo en el tema, encuentren el artículo De actualidad que nos explica cómo la inteligencia artificial está revolucionando la astronomía al facilitar el análisis de grandes volúmenes de datos y al abordar desafíos como el ruido y las escalas de tiempo. Además, la inteligencia artificial nos está permitiendo mejorar la identificación y clasificación de objetos celestes, perfeccionar la predicción de fenó-

menos astronómicos, e incluso nos abre posibilidades en la búsqueda de vida extraterrestre al identificar patrones moleculares. ¿Estamos ante una nueva apreciación del universo?

¿Saben qué es la endosimbiosis artificial? ¿Se pueden implantar bacterias en células eucariontes? ¿Saben que es Evo, la inteligencia artificial en el genoma? ¿Se pueden diseñar genomas sintéticos con el uso de inteligencia artificial que representen ventajas? ¿Qué es la artemisinina, cuál es su eficacia contra la malaria, se está desarrollando resistencia y por qué es importante buscar nuevos tratamientos contra esta enfermedad? Lean Desde las redes y encuentren las respuestas.

Esperemos que disfruten de este número de *Ciencia*. A nombre propio, del Comité Editorial y del equipo de producción, les enviamos nuestros mejores deseos para el año que comienza.

ALONSO FERNÁNDEZ-GUASTI

Guadalupe Estrada-Gutiérrez e Ignacio Camacho-Arroyo
(Editores huéspedes)

Presentación

PROGRAMACIÓN FETAL: SALUD Y ENFERMEDAD

LA IMPORTANCIA DE LOS PRIMEROS 1 000 DÍAS DE VIDA

A lo largo del tiempo se han generado conceptos en la ciencia que han modificado nuestra visión de los distintos fenómenos que ocurren en la naturaleza. Uno de estos conceptos surgidos en el campo de la biomedicina en la década de 1980 es el de “Orígenes en el desarrollo de la salud y la enfermedad” (DOHaD, del inglés: “Developmental Origins of Health and Disease”). Este concepto surge de los estudios del doctor David J. Barker que revelaron la correlación entre la desnutrición fetal y la aparición de enfermedades crónicas en la



vida adulta, como consecuencia del efecto que tuvo la hambruna holandesa durante la Segunda Guerra Mundial en los hijos de las mujeres que estuvieron embarazadas en ese periodo. Esta premisa, conocida como *hipótesis de Barker*, ha cambiado de manera radical nuestra visión de la salud y la enfermedad, y abre la posibilidad de que, en buena medida, éstas puedan programarse desde la etapa fetal.

Es importante destacar el papel fundamental que tiene sobre la salud futura la exposición a los diversos factores medioambientales durante el embarazo y en los primeros dos años de vida (periodo conocido como los primeros 1 000 días). Lo que es más impresionante aún es que esos efectos pueden perdurar no sólo por el resto de la vida, sino ser intergeneracionales e impactar en la salud de al menos las siguientes dos generaciones a través de mecanismos muy complejos de la regulación de la expresión de los genes que involucran aspectos epigenéticos.¹

Dada la trascendencia de estos hallazgos y en el marco del concepto DOHaD, presentamos este número temático sobre diferentes aspectos fundamentales en esta área. En él participan investigadores especializados en salud perinatal que nos ofrecen un panorama crítico y actualizado sobre la importancia de la programación fetal y su impacto en la salud futura.

En este número podrás encontrar desde un planteamiento general sobre la programación fetal y su efecto sobre la salud-enfermedad a lo largo de la vida (Estrada-Gutiérrez y Camacho-Arroyo), hasta aspectos muy puntuales y diversos que van de la importancia de la placenta en la programación de enfermedades cardiovasculares en la vida adulta (Espino y Sosa y Torres-Torres) hasta la salud mental y el neurodesarrollo (Canul-Euan, Martínez-Medina

y Suárez-Rico), pasando por un estudio sobre los trastornos metabólicos que nos muestran el impacto de la obesidad materna en la salud de la descendencia (Valencia-Ortega, y Molerés-Orduña y Solís-Paredes), el efecto de la diabetes durante el embarazo sobre la salud reproductiva (Reyes-Muñoz, Arce-Sánchez y Martínez-Cruz) y la trascendencia de la alimentación en los primeros 1 000 días de vida (Perichart-Perera y Rodríguez-Cano). Además, en el artículo de Mancilla-Herrera y González-Pérez se pone de manifiesto lo fundamental que es la lactancia en la programación de la salud y en la protección ante múltiples enfermedades. Finalmente, Borboa-Olivares y Piña-Ramírez nos hablan sobre un tema que está modificando todos los aspectos de nuestras vidas: la inteligencia artificial y la manera en que esta tecnología nos permite entender la programación fetal, predecir la aparición de diversas enfermedades y su posible solución.

Esperamos que te guste este número de la revista *Ciencia*, que aprendas sobre la importancia que tiene la programación fetal y los primeros 1 000 días en la salud de todos los individuos y que haga cambiar tu visión acerca del origen y desarrollo de las enfermedades a lo largo de la vida.

Guadalupe Estrada-Gutiérrez

Departamento de Inmunobioquímica, Instituto Nacional de Perinatología.
gpestrad@gmail.com

Ignacio Camacho-Arroyo

Unidad de Investigación en Reproducción Humana, Instituto Nacional de Perinatología-Facultad de Química, UNAM.
camachoarroyo@gmail.com

¹ Sobre este tema puede consultarse el número dedicado a “Epigenética” en *Ciencia*, 73(4), oct.-dic. de 2022.

¿Están nuestras enfermedades programadas antes de nacer?

En este artículo presentamos un panorama general sobre la programación fetal, el impacto de los factores ambientales y los propios del individuo sobre dicha programación, así como el alcance que ésta tiene para determinar la salud a lo largo de nuestra vida, haciendo énfasis en los primeros 1 000 días, que abarcan desde el primer día del embarazo hasta los dos primeros años de vida.

Una de las grandes interrogantes en las ciencias biológicas en general, y en particular en la medicina, es por qué existen individuos dentro de una población, o incluso dentro de una misma familia, que presentan diferentes condiciones de salud o son más susceptibles a ciertas infecciones o enfermedades. La respuesta podría ser simple: tenemos diferente información genética. Sin embargo, esta respuesta se queda corta y no explica, por ejemplo, cómo es que gemelos idénticos, con la misma información genética, pueden llegar a ser tan diferentes si viven en distintos lugares y tienen diferente alimentación y costumbres, lo cual nos habla de la importancia de la interacción entre el medio ambiente y los seres vivos.

El conocimiento de los efectos que tiene el entorno durante la etapa fetal sobre la salud del individuo a largo plazo llevó al doctor D. J. Barker, en la década de 1980, a plantear el concepto de programación fetal, que alude a un proceso adaptativo en el que la nutrición y los diversos factores medioambientales (radiación solar, temperatura, ciclo de luz-oscuridad, contaminantes, alimentos, drogas, agentes patógenos) moldean el desarrollo en la vida intrauterina, lo que lleva a cambios en el metabolismo postnatal y a la presencia de distintas enfermedades a lo largo de la vida de los individuos.

Los primeros estudios sobre este tema surgieron a partir de asociaciones entre la malnutrición en el embarazo, el peso al nacer y la influencia de este último en la aparición de enfermedades cardíacas y metabólicas, como la diabetes, a lo largo de la vida. Actualmente se sabe que todos los factores tanto **endógenos** –las hormonas, los microorganismos y sus productos metabólicos (microbioma)– como

Factores endógenos

Son todos aquellos propios de los individuos y se producen en su interior.



Factores exógenos
Todos aquellos que se presentan en el exterior de un organismo, es decir, en el medio ambiente.

exógenos –físicos, químicos, biológicos y sociales– a los que está expuesto el feto (exposoma), repercuten en el estado de salud de todos los órganos del ser humano por el resto de la vida. El exposoma influye de manera determinante en la salud del bebé y su futura descendencia y puede llevar a la aparición de distintas enfermedades a lo largo de la vida; por ejemplo, las de tipo crónico no transmisibles, como la diabetes, hipertensión, obesidad y enfisema pulmonar, que se encuentran entre las principales causas de morbilidad y mortalidad en los seres humanos, particularmente en México.

La interacción medio ambiente-seres humanos es crucial en ciertas etapas de la vida y en especial durante el periodo de los primeros 1 000 días de vida, contado desde el día uno del embarazo hasta los primeros 2 años. Esta etapa es fundamental en la formación de tejidos, órganos, conexiones cerebrales y la generación del potencial físico e intelectual de todos los seres humanos, por lo que todo lo que ocurra en esta etapa será determinante en el estado de salud que tendrá el niño, el adolescente y el adulto. Y lo

más impactante es que dicha programación no sólo va a influir en la salud de los hijos durante toda su vida, sino que afectará la salud de los hijos de esa primera generación; es decir, es intergeneracional, y lo que ocurra en la vida fetal va a afectar a las siguientes dos generaciones, por lo que se dice comúnmente en este ámbito científico que una mujer embarazada no lo está solamente de sus hijos, sino también de sus nietos (véase la **Figura 1**).

El concepto de programación fetal ha modificado de manera sustancial cómo visualizamos la salud y la enfermedad, y todas las investigaciones que se han realizado sobre este tema han llevado a proponer intervenciones durante el embarazo y los primeros 2 años de vida con el fin de prevenir la aparición de distintas enfermedades, sobre todo las asociadas con la obesidad y la diabetes durante el embarazo, y modular la programación fetal para mejorar las condiciones de salud.

Se sabe que la salud metabólica del individuo está determinada desde la vida fetal e incluso desde antes de que ocurra el embarazo. Así, se tienen evi-

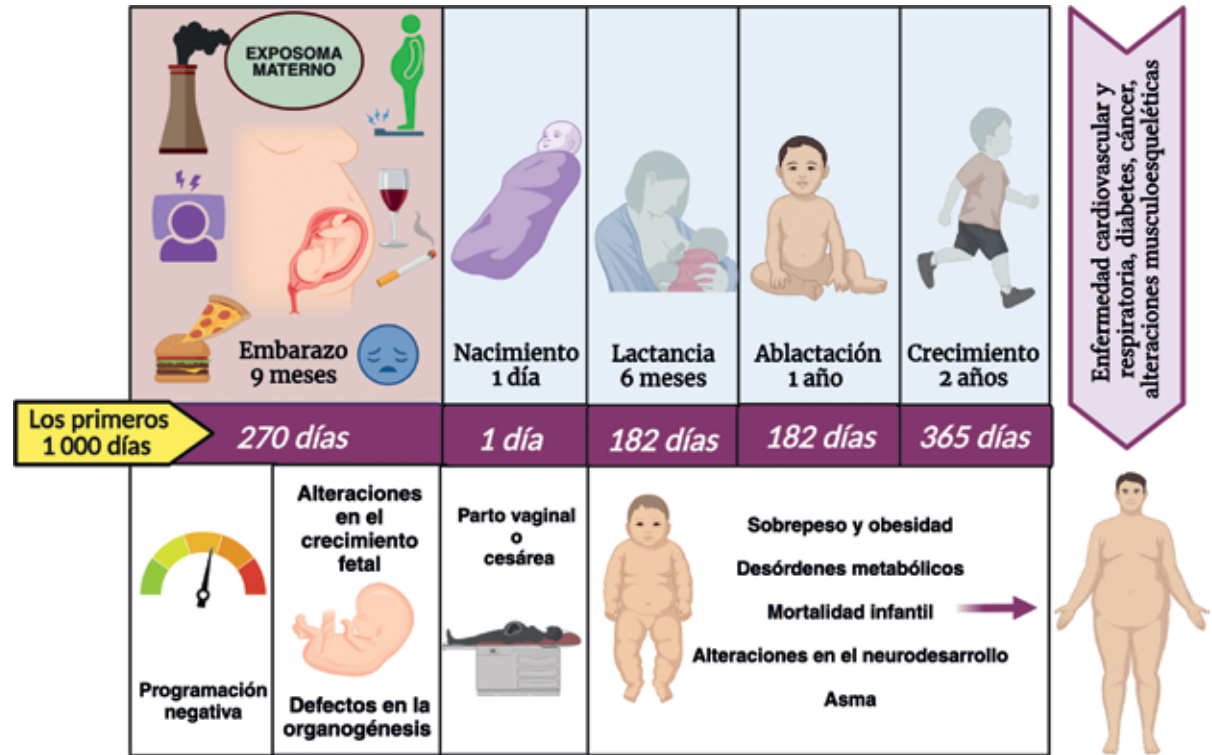


Figura 1. Los primeros 1 000 días son una ventana de oportunidad para un futuro más saludable. El exposoma materno en esta etapa es crucial para el desarrollo y la salud a largo plazo de los individuos y la sociedad.

dencias de que el peso de la futura mamá antes del embarazo (pregestacional) y la ganancia de peso durante el embarazo influyen de manera crucial en el metabolismo, crecimiento, presencia de obesidad, diabetes, problemas cardiovasculares, renales, respiratorios, reproductivos, así como en el desarrollo cerebral y el estado emocional en las distintas etapas de la vida. Recientemente, se ha propuesto también que incluso el envejecimiento saludable de un individuo depende de las condiciones a que estuvo expuesto en la etapa fetal y su respuesta al exposoma. Todo esto ocurre a través de cambios en la concentración de diferentes sustancias en nuestro cuerpo, como las enzimas (moléculas que permiten que se lleven a cabo las reacciones bioquímicas en las células), mensajeros químicos como las hormonas, neurotransmisores (moléculas que median la comunicación entre las neuronas), citocinas (proteínas que regulan la respuesta inmunológica) y las proteínas que funcionan como receptores a estos mensajeros químicos y que median sus efectos.

Existen evidencias que señalan que los hijos de madres que presentaron obesidad pregestacional o una ganancia de peso excesiva durante el embarazo tienen un mayor riesgo de complicaciones fetales, infecciones, desenlaces cardio-metabólicos, respiratorios, reproductivos y de neurodesarrollo adversos. Este riesgo también es mayor en los hijos de las mujeres embarazadas que estuvieron expuestas a metales, por ejemplo, el plomo, e incluso a los múltiples y diversos contaminantes atmosféricos. En los últimos años se ha documentado que compuestos derivados de la actividad industrial, elaboración de plásticos, resinas, pesticidas y herbicidas, entre otros —conocidos como disruptores endócrinos, ya que alteran los sistemas hormonales, como el bisfenol y los ftalatos—, provocan daños muy graves desde la etapa fetal y constituyen un factor de riesgo para la salud de los seres humanos y de otros organismos. Lo anterior indica que las condiciones del entorno son cruciales en nuestra salud, y éste es otro motivo por el cual debemos cuidar el medio ambiente.

Por otro lado, se ha demostrado que la presencia de enfermedades en la mujer embarazada, como la preeclampsia, en donde hay hipertensión, daño



vascular y renal, o de tipo infeccioso, constituyen un factor de riesgo importante para la aparición de enfermedades cardiovasculares, respiratorias y gastrointestinales en sus hijos y en sus nietos.

Un aspecto muy interesante que cada vez toma mayor relevancia es el relacionado con la salud mental de la mujer embarazada, ya que ésta tiene efectos muy claros en el neurodesarrollo, conducta, estado emocional y habilidades cognitivas y de control motor de su progenie. Así, se ha reportado que mujeres embarazadas que cursan con un alto nivel de estrés, ansiedad, depresión o estas dos últimas de manera simultánea, tienen mayor probabilidad de tener desenlaces adversos, como el parto pretérmino. El estrés y la ansiedad se presentan en un porcentaje que puede llegar hasta el 25-30 % durante el embarazo, lo que puede dañar la salud mental de la mujer embarazada. Se sabe que estos problemas emocionales se asocian a la producción de citocinas pro-inflamatorias que llevan a complicaciones obstétricas, a un mayor porcentaje de cesáreas, prematuridad, restricción del crecimiento uterino, bajo peso al nacer, problemas cardíacos, alteraciones hormonales y un neurodesarrollo con afectaciones motoras, de lenguaje y cognitivas en los niños.

La ansiedad durante el embarazo es un factor de riesgo importante para el desarrollo de la depresión



postparto, lo que disminuye la capacidad de la madre para cuidar y alimentar a su bebé de manera adecuada. De manera muy interesante, se ha observado que los hijos de madres que presentaron ansiedad durante el embarazo tienen mayor propensión a presentar también ansiedad y depresión, así como trastorno por déficit de atención y autismo. Desafortunadamente, se sabe también que el uso de antidepresivos durante el embarazo puede llevar a cambios en las diversas capacidades intelectuales, conductuales y motoras de la descendencia.

Los mecanismos moleculares involucrados en la programación fetal no se conocen por completo, pero se sabe que hay cambios en el patrón de expresión de los genes durante el desarrollo que pueden permanecer por mucho tiempo en la descendencia, incluso durante toda la vida. Otro elemento fundamental en la presentación de estos fenómenos relacionados con la programación de la salud y la enfermedad involucra la regulación epigenética, es decir, modificaciones que regulan positiva o negativamente la actividad de los genes, sin cambios en la secuencia de información de estos últimos. En esta regulación epigenética se encuentran moléculas como los ácidos ribonucleicos pequeños (microARN) y procesos como la metilación (incorporación de

grupos metilo) del ácido desoxirribonucleico (ADN) y la acetilación y desacetilación (incorporación o separación de grupos acetilo) de histonas (proteínas que dan la estructura a los cromosomas).

Recientemente, se ha adjudicado un papel fundamental a la composición del microbioma del feto y del infante en los primeros 1000 días, ya que se sabe que la composición de microorganismos y los productos secretados por ellos en distintos tejidos representa un factor trascendental en la aparición de distintas enfermedades.

El conocimiento que tenemos de la programación fetal hasta el momento ha permitido generar estrategias de prevención de las enfermedades durante el embarazo antes mencionadas, así como de intervención tanto en la mujer embarazada como a lo largo de la vida del individuo, las cuales incluyen desde cambios en el estilo de vida (dieta, ejercicio), terapias de distinto tipo, e incluso el uso de distintos medicamentos. Todas estas estrategias dan mejores resultados si se aplican a edades más tempranas, por lo que el seguimiento de la salud de la mujer embarazada y del bebé es determinante.

Un aspecto que no debemos olvidar es el hecho de que las condiciones socioeconómicas de la población influyen de manera significativa en la salud de

todos los individuos. De esta manera, se ha visto que las condiciones de pobreza que impactan, por ejemplo, en la nutrición y en la presencia de distintas infecciones son un factor de riesgo muy importante en la salud de la mujer embarazada y por lo tanto en su descendencia. Una mejora en las condiciones económicas de los sectores más desprotegidos y una menor desigualdad social sin duda llevará a una mejora de las condiciones de salud de la población.

Dada la importancia de la salud materna tanto en la vida de la propia mujer embarazada, de sus descendientes y de los hijos de éstos, es fundamental, además de realizar más investigaciones sobre este tema, generar políticas públicas que lleven a la mejora del estado de la salud de la mujer embarazada, a la atención de los infantes en periodos críticos del desarrollo —como es el de los primeros 1 000 días— y a

contar con estrategias de prevención e intervención en el caso de las distintas enfermedades surgidas por los efectos de la programación fetal. Todo lo anterior llevará a contar con una población humana con mejores condiciones de salud a lo largo de la vida.

Guadalupe Estrada-Gutiérrez

Departamento de Inmunobioquímica, Instituto Nacional de Perinatología.

gpestrad@gmail.com

Ignacio Camacho-Arroyo

Unidad de Investigación en Reproducción Humana, Instituto Nacional de Perinatología-Facultad de Química, UNAM.

camachoarroyo@gmail.com

Lecturas recomendadas

Vargas Aguilar, V. M., K. M. Beltrán Beltrán y K. Arroyo Álvarez (2023), “Fisiopatología de la programación fetal y su repercusión en la salud futura”, *Ginecología y Obstetricia de México*, 91(8):588-599.

Ramírez-Vélez, R. (2012), “Programación fetal *in utero* y su impacto en la salud del adulto”, *Endocrinología y Nutrición*, 59(6):383-393.

Camacho-Arroyo, I., M. Flores-Ramos, I. Mancilla-Herrera, F. M. Coronel Cruz, J. Hernández-Ruiz *et al.*

(2021), “Chemokine profile in women with moderate to severe anxiety and depression during pregnancy”, *BMC Pregnancy and Childbirth*, 21(807).

Estrada-Gutiérrez, G., E. Zambrano, E. Polo-Oteyza, A. Cardona-Pérez y F. Vadillo-Ortega (2020), “Intervention during the first 1 000 days in Mexico”, *Nutrition Reviews*, 78(S2):80–90.

El papel de la placenta en la salud cardiovascular

La formación de la placenta y su adecuada penetración de la pared del útero es fundamental para la salud fetal, su crecimiento y desarrollo; en este sentido, los defectos de este proceso se encuentran estrechamente vinculados con un espectro de consecuencias que van desde la pérdida temprana del embarazo hasta un impacto sobre la nutrición y el crecimiento fetal. El presente artículo explica la formación de la zona de intercambio útero-placentaria y las consecuencias cardiovasculares de los defectos de la placentación.

Tu placenta... le debes tanto y le conoces tan poco

La placenta, único órgano externo del cuerpo humano, cumple con funciones fundamentales necesarias que te preparan para independizarte de tu madre al nacer. La placenta provee nutrición, protección, metabolismo y oxigenación durante una etapa en que la dependencia es total, supliendo la función de múltiples órganos y sistemas.

El endometrio, la pared interna del útero, cambia durante cada ciclo menstrual para prepararse para un posible embarazo. Si no hay embarazo, el endometrio se desprende y ocurre la menstruación. Si hay embarazo, el endometrio se transforma en **decidua**, que ayuda a que la placenta se implante y proteja al bebé. La decidua también facilita la comunicación entre el bebé y el útero para una buena implantación. La placenta, que se conecta con el útero a través de las **vellosidades coriales**, actúa como un puente para nutrir al bebé.

La placentación en los humanos es hemocorial, lo que significa que la sangre materna y fetal están separadas por una membrana especializada. Este filtro, llamado interfase útero-placentaria, regula el intercambio de nutrientes y oxígeno entre la madre y el bebé. En las primeras etapas del embarazo, podemos identificar al embrión rodeado de una capa de células externas –a la que llamamos trofoblasto–; estas células penetran el útero, lo cual crea lagunas de sangre que nutren al embrión. El trofoblasto desarrolla en su interior vasos sanguíneos para llevar la sangre fetal que recoge oxígeno y nutrientes de la sangre materna.

Decidua

Revestimiento interno del útero que se prepara durante el embarazo para alojar y nutrir al embrión; se desarrolla específicamente para sostener el embarazo y en el momento del parto se desprende junto con la placenta.

Vellosidades coriales

Son estructuras de la placenta que facilitan el intercambio de nutrientes, oxígeno y desechos entre la madre y el feto y contribuyen a la producción de hormonas esenciales para el embarazo.



Un ejército invasor protege al bebé en formación y asegura su adecuada nutrición

Una vez que la vellosidad coriónica se ha puesto en contacto con la decidua funcional uterina, el citotrofoblasto en contacto forma una columna celular e inicia en su porción distal un cambio en su fenotipo: de proliferativo a invasor. En este cambio, podemos identificar en la superficie de estas células, moléculas de adhesión celular (integrinas), las cuales reconocen el tejido adyacente e inician una migración para obstruir los vasos (se llaman arterias espirales) que llevan la sangre hacia la placenta.

Las células de la placenta tienen la importante tarea de proteger al bebé en desarrollo. Imagina que te paras frente a un hidrante de agua y lo abres; la presión del agua te empujaría con tanta fuerza que te lastimaría. Algo parecido le pasaría a un bebé, que es muy pequeño y delicado, si estuviera expuesto directamente a la presión de la sangre sin una barrera que lo protegiera. Por eso, lo primero que hacen las células de la placenta es bloquear el flujo de sangre hacia el bebé en las primeras etapas. Aunque suene paradójico, esto protege al bebé de la presión hasta que sea lo suficientemente grande para sopor-

tarla, lo que generalmente coincide con el momento en que comienza a latir su corazón.

Además, al bloquear temporalmente el flujo de sangre, también se reduce el nivel de oxígeno, lo que protege al bebé del daño causado por el estrés oxidante. Cuando el bebé ha crecido lo suficiente, alrededor de la semana 8, la placenta empieza a trabajar para asegurar que llegue suficiente oxígeno y nutrientes. A partir de la semana 10, las células del trofoblasto (parte de la placenta) se mueven dentro de las arterias que llevan la sangre, destruyendo la capa muscular de estas arterias para que se ensanchen. Esto hace que la sangre fluya con menos presión, pero en mayor cantidad.

Este cambio es esencial porque, al reducir la presión y aumentar el flujo de sangre, se asegura que la sangre llegue suavemente a la superficie de las vellosidades coriónicas, que son las responsables de transferir oxígeno y nutrientes al bebé. De esta manera, el trofoblasto endovascular juega un papel clave en asegurar que el bebé reciba todo lo que necesita para crecer y desarrollarse adecuadamente (véase la [Figura 1](#)).



Inflamación, el punto de partida

Cualquier cosa que cause inflamación en la placenta afecta directamente el crecimiento y desarrollo del bebé. Como mencionamos antes, la destrucción de la capa muscular de las arterias de la madre permite que la sangre llegue de manera suave y con poca presión al bebé. Ahora, imagina qué pasaría si esta capa muscular no se destruyera: la sangre saldría a mucha presión con cada latido, dañando las células del trofoblasto que transportan nutrientes, lo que causaría inflamación y estrés en la placenta.

Cuando la placenta se inflama, los vasos sanguíneos del bebé que la atraviesan también se inflaman, lo que puede causar que se formen coágulos (trombosis) y bloqueen los vasos. Esto disminuye la capacidad de la placenta para llevar oxígeno y nutrientes al bebé, algo que se llama insuficiencia placentaria. Como resultado, el corazón del bebé tiene que trabajar más para que la sangre pueda pasar por los vasos bloqueados, lo que puede causar daños per-

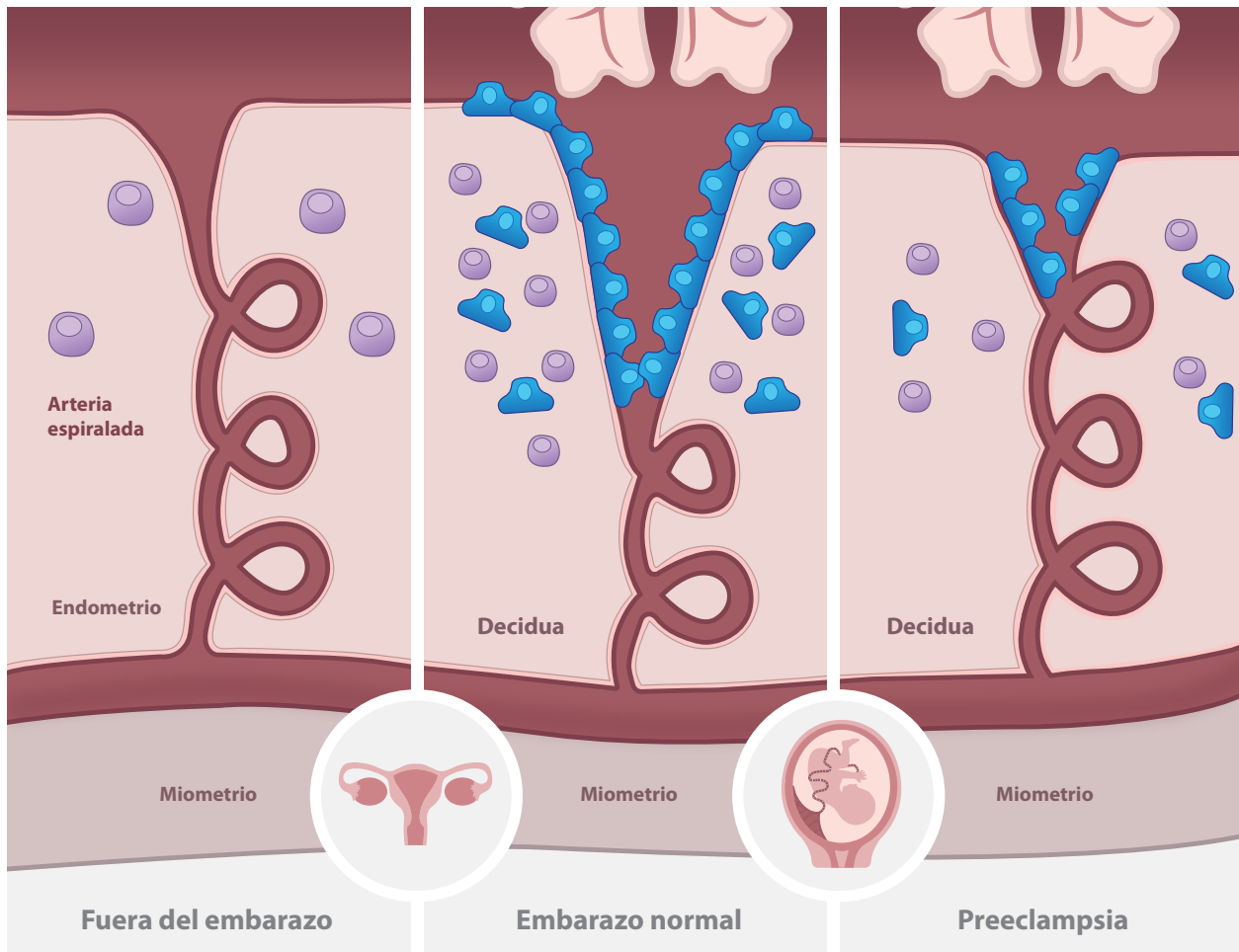


Figura 1. Formación de arterias en espiral durante el embarazo en condiciones fisiológicas y patológicas.

manentes a su corazón. Hay tres problemas principales que pueden ocurrir en la zona de la placenta donde el bebé recibe oxígeno y nutrientes: falta de oxígeno (isquemia), inflamación y daño celular causado por moléculas reactivas (estrés oxidante).

En la madre, la insuficiencia placentaria está relacionada con una condición llamada preeclampsia, que es muy peligrosa. La preeclampsia causa alta presión arterial y puede dañar varios órganos. De hecho, es una de las principales causas de muerte materna en el mundo. En el bebé, la insuficiencia placentaria puede dañar los vasos sanguíneos y reducir el suministro de oxígeno y nutrientes, lo que afecta su desarrollo. A largo plazo, los bebés que han pasado por esta situación pueden sufrir problemas del corazón y de los vasos sanguíneos que los afectarán incluso en la vida adulta. Esto subraya la importan-

cia de que la placenta se forme y funcione correctamente para asegurar la salud de la madre y del bebé.

■ **Adaptación fetal: mecanismos de supervivencia ante la insuficiencia placentaria**

■ La placenta juega un papel crucial en el crecimiento y desarrollo del bebé, proporcionando nutrientes esenciales y oxígeno mientras elimina los productos de desecho. Sin embargo, en casos de insuficiencia placentaria, donde la placenta no puede satisfacer adecuadamente las necesidades fetales, el bebé debe iniciar mecanismos de adaptación para asegurar su supervivencia. Una de esas adaptaciones críticas ocurre en el sistema cardiovascular fetal, que experimenta cambios significativos para optimizar el suministro de oxígeno y nutrientes a los órganos vitales.

La insuficiencia placentaria puede ocurrir por varias razones, como la hipertensión en la madre, la preeclampsia o el desprendimiento de la placenta antes del nacimiento. La disminución de oxígeno y nutrientes al bebé desencadena una serie de respuestas adaptativas complejas para mantener la **perfusión tisular** y la viabilidad celular. Las interacciones circulatorias materno-fetales juegan un papel crucial en el proceso de adaptación. A medida que la placenta se ve comprometida, el flujo de sangre arterial materna se redirige a áreas de la placenta que aún funcionan, lo que promueve la transferencia de oxígeno y nutrientes al bebé.

En respuesta a estas condiciones, el bebé cambia la forma en que distribuye su sangre para asegurar que los órganos más importantes, como el cerebro y el corazón, reciban la mayor cantidad posible de oxígeno.

Hay dos adaptaciones clave que ayudan a que esto ocurra. La primera es el conducto venoso, un vaso sanguíneo que desvía parte de la sangre oxigenada que llega del cordón umbilical directamente al corazón del bebé, evitando que pase por el hígado. La segunda es el conducto arterioso, que conecta la arteria pulmonar con la aorta, lo que permite que la sangre circule sin pasar por los pulmones fetales, ya que éstos todavía no están funcionando.

Además de estos desvíos, los tejidos del bebé se vuelven más eficientes para extraer oxígeno de la sangre, y el cuerpo del bebé aumenta la cantidad de hemoglobina, una proteína en los glóbulos rojos que transporta oxígeno. También aumenta la frecuencia cardíaca del bebé para mejorar el flujo de sangre y compensar la menor cantidad de oxígeno disponible.

Todos estos mecanismos son esenciales para que el bebé pueda sobrevivir en condiciones de insuficiencia placentaria, y pueden tener un impacto en la salud del individuo a largo plazo.

¡Que no quede huella! Estrategias de intervención temprana para prevenir complicaciones cardiovasculares en la vida adulta

Las complicaciones cardiovasculares, como la hipertensión arterial, la enfermedad arterial coronaria



y el accidente cerebrovascular, son las principales causas de mortalidad y morbilidad en todo el mundo. Si bien estas condiciones a menudo se atribuyen a factores del estilo de vida en la edad adulta, la evidencia emergente sugiere que las semillas de las enfermedades cardiovasculares pueden sembrarse durante la vida fetal. Por lo tanto, es importante enfatizar la importancia de las estrategias de intervención temprana durante el embarazo para prevenir complicaciones cardiovasculares en la edad adulta.

Basándonos en la hipótesis de Barker –que sugiere que la restricción del crecimiento intrauterino, como resultado de un aporte deficiente de oxígeno y sustrato a través de la placenta, puede predisponer a las personas a enfermedades cardiovasculares en el futuro–, es claro que la exposición fetal a condiciones adversas puede desencadenar alteraciones en la estructura y función de los órganos involucrados en la regulación cardiovascular, como el corazón, los vasos sanguíneos y los riñones. Además, los cambios epigenéticos pueden ocurrir durante la vida fetal debido a exposiciones ambientales, lo que conduce a patrones de expresión génica alterados asociados con el riesgo cardiovascular.

Nutrición materna y estilo de vida

A continuación, se enlistan tres consejos para disminuir el riesgo de complicaciones cardiovasculares en el largo plazo:

- Ingesta adecuada de macronutrientes: garantizar una dieta equilibrada rica en nutrientes esenciales promueve un crecimiento y desarrollo fetal óptimos.

Perfusión tisular
Es el suministro adecuado de sangre a los tejidos, garantizando el aporte de oxígeno y nutrientes, y la eliminación de desechos. Su alteración puede afectar la función celular y provocar daño tisular.

- Suplementación con micronutrientes: la ingesta adecuada de vitaminas y minerales, incluidos el ácido fólico, el hierro y los ácidos grasos omega-3, se ha asociado con mejores resultados de salud cardiovascular en la descendencia.
- Evitar sustancias nocivas: el tabaco, el alcohol y las drogas que se han asociado a complicaciones cardiovasculares.

Control prenatal

- Control prenatal regular: la atención prenatal de rutina permite monitorear el bienestar materno y fetal, detectar posibles complicaciones y, de ser necesario, intervenir de inmediato.
- Control de la presión arterial: la hipertensión gestacional y la preeclampsia están vinculadas a un mayor riesgo cardiovascular tanto en la madre como en el niño.
- Control de la diabetes gestacional: el control eficaz de la diabetes gestacional reduce el riesgo de macrosomía (bebés muy grandes con peso mayor a 4 kg) y desequilibrios metabólicos, mitigando así la probabilidad de consecuencias cardiovasculares a largo plazo.

Intervenciones farmacológicas

En algunos casos, las intervenciones farmacológicas pueden ser necesarias para controlar afecciones maternas específicas que representan un riesgo para la salud cardiovascular del bebé, como la hipertensión o la diabetes gestacional. La aspirina se ha demostrado que reduce el riesgo de preeclampsia en un 62 %.

Importancia de las estrategias de intervención temprana

El concepto de “¡Que no quede huella!” enfatiza la importancia de las estrategias de intervención temprana durante la vida fetal para prevenir complicaciones cardiovasculares en la edad adulta. La comprensión de los mecanismos que vinculan la vida fetal con los resultados de salud a largo plazo permite el desarrollo de intervenciones eficaces, incluida la nutrición materna, las modificaciones en el estilo de vida y el seguimiento específico. Al implementar estas estrategias, tenemos el potencial de reducir

la carga de enfermedades cardiovasculares y mejorar los resultados de salud a largo plazo para las personas que aún no nacen. Sin embargo, abordar los desafíos y garantizar el acceso equitativo a las intervenciones tempranas sigue siendo crucial para su implementación exitosa.

La prevención comienza en el útero, y las intervenciones tempranas pueden hacer una diferencia significativa en la salud cardiovascular futura. Al comprender y aplicar estas estrategias, podemos aspirar a un futuro con menos complicaciones cardiovasculares y una mejor calidad de vida para las próximas generaciones.

Salvador Espino y Sosa

División de Investigaciones Clínicas, Instituto Nacional de Perinatología.
salvadorespino@gmail.com

Johnatan Torres-Torres

División de Investigaciones Clínicas, Instituto Nacional de Perinatología.
torresmmf@gmail.com

Lecturas recomendadas

- Acevedo-Gallegos, S., S. Espino y Sosa, J. M. Gallardo-Gaona, B. Velásquez-Torres, L. Camargo-Marín y M. Guzmán-Huerta (2008), “La placenta humana: revisión”, *Perinatología y Reproducción Humana*, 22:230-245. Disponible en: <<https://www.inper.mx/descargas/pdf/Laplacentahumana.pdf>>.
- Crispi, F., J. Miranda y E. Gratacós (2018), “Long-term cardiovascular consequences of fetal growth restriction: biology, clinical implications, and opportunities for prevention of adult disease”, *American Journal of Obstetrics Gynecology*, 218(2):S869-S879. Disponible en: <<https://doi.org/10.1016/j.ajog.2017.12.012>>.
- Dimitriadis, E., D. L. Rolnik, W. Zhou, G. Estrada-Gutiérrez, K. Koga, R. P. V. Francisco *et al.* (2023), “Pre-eclampsia”, *Nature Reviews Disease Primers*, 9(1):8. Disponible en: <<https://doi.org/10.1038/s41572-023-00451-4>>.
- Torres-Torres, J., S. Espino y Sosa, R. Martínez-Portilla, H. Borboa-Olivares, G. Estrada-Gutiérrez, S. Acevedo-Gallegos *et al.* (2024), “A Narrative Review on the Pathophysiology of Preeclampsia”, *International Journal of Molecular Sciences*, 25(14):7569. Disponible en: <<https://doi.org/10.3390/ijms25147569>>.

Jorge Valencia-Ortega, Miranda Molerés-Orduña y Juan Mario Solís-Paredes

El lenguaje secreto del tejido adiposo materno y la programación fetal

Por mucho tiempo se pensó que el tejido adiposo era sólo un almacén de energía en forma de grasa. Hoy día se sabe que posee múltiples e importantes funciones mediante la secreción de hormonas proteínicas conocidas como adipocinas. Parece increíble, pero ¡las adipocinas producidas por el tejido adiposo materno influyen en las características del feto y por lo tanto del nuevo individuo!

Introducción

En el cuerpo humano, los lípidos se almacenan en dos tipos de tejido adiposo: el marrón y el blanco. El tejido adiposo marrón tiene la función de metabolizar lípidos para producir calor y mantener así la temperatura corporal. Por su parte, el tejido adiposo blanco (al cual nos referiremos de aquí en adelante como tejido adiposo en general) destaca como el principal tejido de almacén de energía; sin embargo, tiene otras funciones, como el aislamiento y protección mecánica de algunos órganos y la producción de hormonas. Si bien en la década de 1980 ya se sabía que el tejido adiposo secretaba hormonas esteroideas, fue hasta 1994 cuando su actividad endocrina resaltó por el descubrimiento de “la hormona de la saciedad”, la leptina, y desde entonces se han identificado más de 600 moléculas proteínicas secretadas por este tejido, tales como la resistina, omentina, adiponectina, visfatina, apelina, inhibidor del activador del plasminógeno-1, factor de necrosis tumoral alfa, entre otras. Estas moléculas son conocidas en conjunto como adipocinas y las más estudiadas en condiciones de salud y enfermedad, incluso en el embarazo, son la leptina y la adiponectina.

Recientemente, diversos estudios han revelado que las concentraciones maternas de leptina y de adiponectina se relacionan con variables antropométricas del neonato como el peso y la talla, e incluso con el neurodesarrollo en la etapa de la adolescencia. Esto apunta a que las adipocinas maternas pueden influir en



la programación fetal; sin embargo, los mecanismos implicados no han sido completamente dilucidados.

El objetivo de este trabajo es destacar el papel fundamental del tejido adiposo en el embarazo a través de la secreción de adipocinas en la estructura, forma, medidas y composición corporal de la descendencia.

Adipocinas clave en el embarazo

 Inicialmente, el estudio del tejido adiposo y las adipocinas se centró en la obesidad y otras enfermedades metabólicas, para después abarcar patologías como el cáncer y las enfermedades mentales. De manera más reciente, se han estudiado en el embarazo y su participación en complicaciones obstétricas. Hoy día sabemos que, en condiciones de salud, la cantidad de tejido adiposo aumenta a lo largo del embarazo, aunque de manera más marcada en la primera mitad de la gestación, mientras que las concentraciones de determinadas adipocinas, como la leptina y adiponectina, van cambiando a lo largo del embarazo. Lo primero se ha explicado como una preparación del cuerpo materno para cumplir con las demandas energéticas de la segunda mitad del embarazo (especialmente del último trimestre de gestación, cuando el crecimiento fetal es mayor) y de la lactancia, mientras que lo segundo es un tema novedoso de investigación.

La leptina promueve la reducción de la ingesta de alimentos al generar la sensación de saciedad. Además, tiene otras funciones como son la modulación de la respuesta inmune, del metabolismo de la glucosa y lípidos, y de procesos reproductivos como la implantación y el desarrollo embrionario. La leptina se produce mayormente en el tejido adiposo, aunque en el embarazo la placenta representa la principal fuente de esta hormona.

Independientemente de si una mujer está embarazada o no, la adiponectina es producida principalmente por el tejido adiposo. Dentro de sus funciones destacan el mejoramiento de la sensibilidad a la insulina (lo cual permite la correcta captura de glucosa por los tejidos, evitando así altas concentraciones de este carbohidrato en la sangre), además de te-

ner efectos antiinflamatorios. Fisiológicamente, las concentraciones de leptina aumentan, mientras que las de adiponectina disminuyen conforme avanza el embarazo.

Las adipocinas maternas influyen en el crecimiento fetal y neonatal

 Un nuevo individuo necesita alrededor de 40 semanas intrauterinas para desarrollarse, crecer y estar listo para la vida exterior. Generalmente, una de las primeras preguntas acerca del recién nacido es cuánto pesó y cuánto midió. Y sí, el peso y la talla al nacer son más importantes de lo que pensamos, ya que además de ser las principales medidas que indican si hubo un adecuado crecimiento durante la etapa fetal, nos proporciona información de la salud futura, debido a que se sabe que el peso excesivo o insuficiente es un factor de riesgo para presentar enfermedades metabólicas en la vida adulta. Encontrar maneras de predecir el peso y talla de los neonatos es, por ello, de suma importancia.

El crecimiento fetal está influenciado por distintos factores, entre ellos el estado nutricional de la madre (el cual se determina a través del índice de masa corporal), el porcentaje materno de masa grasa y las concentraciones maternas de glucosa e insulina. En los últimos años, se ha investigado el papel que tienen las adipocinas maternas en el crecimiento fetal. Se ha observado que las madres con mayor concentración de leptina en sangre antes de las 20 semanas de gestación tienden a dar a luz hijos con mayor peso al nacer y una mayor talla durante los tres primeros meses de vida. Además, se ha reportado que las concentraciones maternas de leptina se relacionan negativamente con la circunferencia abdominal neonatal, de manera que se piensa que esta adipocina influye en la distribución de grasa corporal del bebé.

Respecto a la adiponectina, se ha observado que la concentración de esta adipocina en sangre materna durante los tres primeros meses del embarazo se asocia negativamente con un peso mayor al adecuado en el recién nacido. Aunado a esto, se ha reportado que las concentraciones maternas de leptina

y adiponectina están asociadas negativamente a la cantidad de tejido adiposo en los recién nacidos.

En madres con obesidad, diabetes mellitus tipo 2 o diabetes gestacional, las concentraciones de leptina están aumentadas y las de adiponectina disminuidas, y generalmente esto se relaciona con un peso elevado al nacimiento. Estos hallazgos muestran el potencial que tienen las concentraciones maternas de estas adipocinas como predictores del peso, talla y adiposidad de los recién nacidos o infantes.

Mecanismos biológicos de las adipocinas maternas en el desarrollo fetal

Si bien aún se avanza en descifrar los mecanismos biológicos de la conexión entre adipocinas maternas y desarrollo fetal, la evidencia actual sugiere dos vías: la regulación del metabolismo materno y del transporte placentario de nutrientes (véase la [Figura 1](#)).

Respecto al metabolismo materno, es imprescindible recordar el papel de la insulina. Para que la glucosa en sangre sea utilizada por los tejidos (principalmente el tejido adiposo, el hígado y el músculo

esquelético), es necesario que la insulina en circulación se una a su receptor (los receptores son proteínas a las que se unen sustancias específicas, como las hormonas), lo cual da lugar a que las proteínas transportadoras de glucosa se trasladen a la membrana plasmática y la transporten dentro de la célula. La leptina, al unirse a su receptor Ob-R, disminuye el efecto de la insulina, de manera que los transportadores de glucosa se encuentran en menor cantidad en la membrana plasmática, por lo que la captura de este carbohidrato disminuye en los tejidos. Por su parte, la adiponectina, al unirse a su receptor AdipoR1 en músculo esquelético, favorece la acción de la insulina y, subsecuentemente, la captura de glucosa. Como ya hemos mencionado, las concentraciones de leptina aumentan y las de adiponectina disminuyen durante el embarazo, lo cual permite mayores concentraciones de glucosa en la circulación materna. Esta glucosa queda disponible como energía para el feto debido a que el principal transportador de glucosa en la placenta es independiente de la acción de la insulina.

Para entender los mecanismos placentarios en los que influyen la leptina y la adiponectina, es impor-

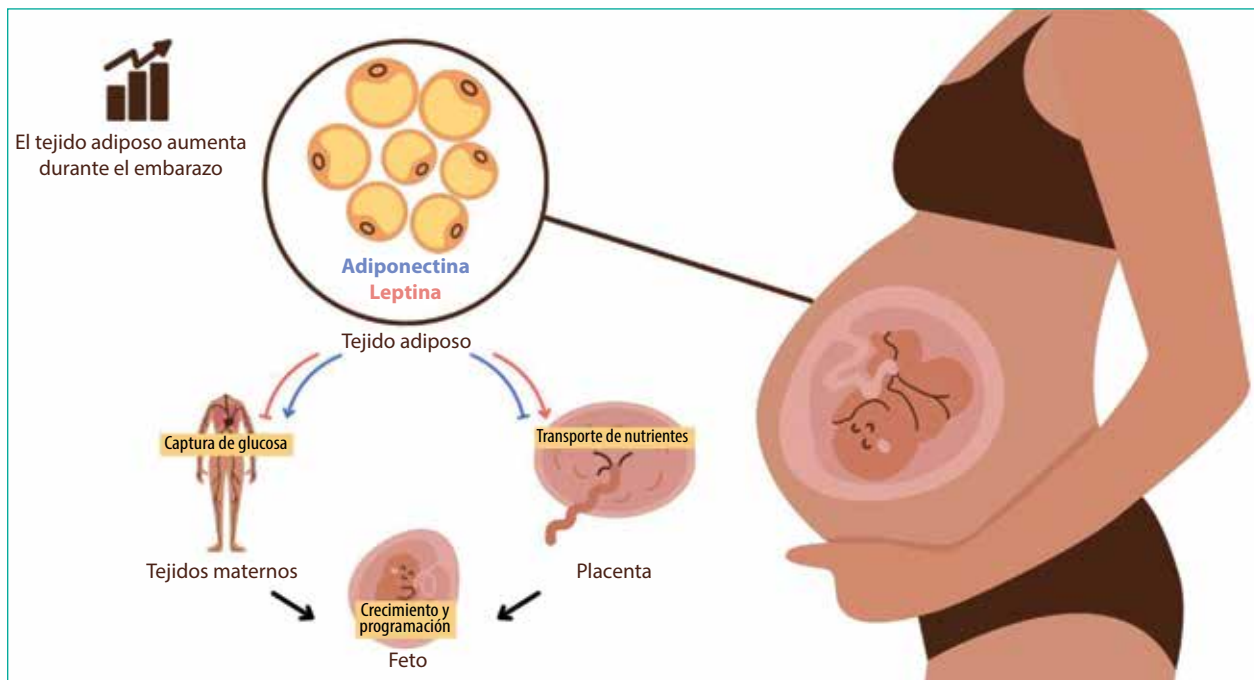


Figura 1. La leptina favorece el transporte placentario de nutrientes, mientras que la adiponectina lo reduce. Las líneas con punta de flecha indican que se favorece el proceso, mientras que aquellas con punta de "T" indican que se inhibe el proceso. Las flechas negras indican que estos procesos regulados por las adipocinas inciden en el desarrollo fetal.

tante mencionar que la placenta es esencial para el crecimiento y desarrollo del feto. Este órgano es multifuncional y actúa en varios procesos: facilita el intercambio de gases, cumple funciones inmunológicas al crear una barrera que protege al feto contra infecciones y permite la absorción y transporte de nutrientes de la madre al feto.

La leptina, al unirse a su receptor en la placenta, aumenta la expresión de transportadores de glucosa y favorece la **biodisponibilidad** de ácidos grasos y aminoácidos para el feto. En el caso de la adiponectina, se ha observado que, al unirse a su receptor en la placenta, interfiere con la señalización de la insulina, lo cual podría resultar en una menor captura de glucosa. También se ha demostrado que la adiponectina disminuye la cantidad de transportadores

de glucosa y aminoácidos (otro tipo de nutrientes esenciales para el desarrollo fetal) en la membrana de células de la placenta, lo que puede restringir la disponibilidad de nutrientes para el feto.

En nuestro grupo de trabajo hemos observado que otras adipocinas maternas, tales como la progranulina y la proteína de unión de ácidos grasos del adipocito (AFABP, por sus siglas en inglés) predicen el peso al nacer y el porcentaje de masa grasa al mes de vida de los neonatos, respectivamente; sin embargo, seguimos investigando los mecanismos biológicos implicados.

En conclusión, en el complejo y delicado proceso del desarrollo de un nuevo individuo, las adipocinas maternas juegan un papel crucial como reguladores del desarrollo fetal. Debido a que estas adipocinas

Biodisponibilidad

Representa qué tan rápido y en qué cantidad un nutriente o un metabolito llega adonde debe actuar para cumplir su función.



están influenciadas en gran parte por el estado nutricional de la madre, un adecuado estilo de vida antes y durante el embarazo ayudará a un crecimiento fetal apropiado, el cual servirá como fundamento para la salud futura.

Jorge Valencia-Ortega

Unidad de Investigación en Reproducción Humana, Instituto Nacional de Perinatología-Facultad de Química, UNAM.
j.valencia.o@hotmail.com

Miranda Molerés-Orduña

Departamento de Investigación en Salud Reproductiva y Perinatal, Instituto Nacional de Perinatología.
mirandamoleres@gmail.com

Juan Mario Solís-Paredes

Departamento de Investigación en Salud Reproductiva y Perinatal, Instituto Nacional de Perinatología.
juan.solis@inper.gob.mx

Lecturas recomendadas

- Acosta, M. E. y F. R. Ramos (2015), "Mecanismos bioquímicos de la leptina implicados en el desarrollo de la obesidad", *Revista Médica de la Universidad Veracruzana*, 2(15):103-113.
- Kirichenko, T. V., Y. V. Markina, A. I. Bogatyreva, T. V. Tolstik, Y. R. Varaeva y A. V. Starodubova (2022), "The Role of Adipokines in Inflammatory Mechanisms of Obesity", *International Journal of Molecular Sciences*, 23(23):14982.
- Kramer, A. C., T. Jansson, T. L. Bale y T. L. Powell (2023), "Maternal-fetal cross-talk via the placenta: influence on offspring development and metabolism", *Development*, 150.
- Martínez, J. E. y J. A. Suárez (2019), "Papel de la adiponectina en obesidad y diabetes tipo 2", *Medicina Interna de México*, 35(3):389-396.
- Rodríguez-Cortés, Y. M. y H. Mendieta-Zerón (2014), "La placenta como órgano endocrino compartido y su acción en el embarazo normoevolutivo", *Medicina e Investigación*, 2:28-34.
- Shimada, H., T. L. Powell y T. Jansson (2024), "Regulation of placental amino acid transport in health and disease", *Acta Physiologica*, 240:e14157.

Ameyalli M. Rodríguez-Cano y Otilia Perichart Perera



Las vitaminas y minerales durante el embarazo: beneficios para una nueva vida

La nutrición materna durante el embarazo es fundamental, ya que una alimentación adecuada, rica en vitaminas y minerales, protege la salud de la madre y del bebé. Además, es esencial complementar la dieta con suplementos de nutrientes. Descubre por qué los micronutrientes son grandes aliados para la salud materna y el bienestar de futuras generaciones.

¡Haciéndolo bien desde el principio!

La nutrición materna es una prioridad en la salud pública global porque afecta no sólo a las mujeres, sino también a sus hijos e incluso a sus nietos. Durante el embarazo, el feto crece y se desarrolla rápidamente, dependiendo por completo de la madre para obtener los nutrientes necesarios. Si la madre tiene deficiencias de vitaminas y minerales, puede experimentar inflamación, estrés oxidante, alteraciones en el metabolismo de los carbohidratos, resistencia a la insulina y acumulación de grasa. Estos cambios pueden causar adaptaciones permanentes en algunos órganos fetales, un fenómeno conocido como el “modelo de origen fetal de las enfermedades”. Este modelo sugiere que el entorno materno en momentos clave del desarrollo fetal puede modificar la expresión genética del bebé, predisponiéndolo a problemas de salud en el futuro y perpetuando estos problemas en generaciones posteriores.

Por eso es fundamental que las mujeres mantengan una dieta saludable durante el embarazo, ya que es la principal fuente de vitaminas y minerales esenciales tanto para su bienestar como para el del bebé. La alimentación no sólo proporciona energía a través de calorías, sino que también aporta los nutrientes necesarios para promover el buen curso de un embarazo. Sin embargo, en México, una gran parte de la población tiene hábitos alimenticios poco saludables, lo que contribuye a la obesidad y las enfermedades metabólicas, así como a un consumo inadecuado



A B₂ B₉ C E PP
B₁ B₆ B₁₂ D K

Folato ▶ Vitamina hidrosoluble indispensable en la síntesis de ADN, la formación de células, el metabolismo de aminoácidos; crucial en el embarazo para prevenir defectos del tubo neural en el feto.

de nutrientes. Muchas mujeres en edad reproductiva comienzan sus embarazos con estos factores de riesgo. Los productos ultraprocesados, como refrescos, embutidos, cereales de desayuno, panes y bollería, bocadillos, botanas, son comunes en la alimentación en nuestro país. Estos productos tienen un elevado aporte de azúcares, grasas saturadas y trans, y bajo aporte de proteínas, fibra y micronutrientes esenciales como **folato**, vitamina B12, calcio, niacina, piridoxina, vitamina C, vitamina E, zinc y magnesio. En México, el 85.8 % de los adultos consume bebidas endulzadas, el 35.4 % come botanas, dulces y postres, el 33.9 % consume cereales dulces y el 20.3 %, comida rápida. En contraste, sólo la mitad de los adultos consume alimentos saludables y de alta densidad de micronutrientes, como leguminosas, verduras y frutas.

Además de una dieta adecuada, la suplementación con vitaminas y minerales es fundamental para el cuidado del embarazo. Durante esta etapa, las demandas nutricionales aumentan significativamente debido a los cambios en el cuerpo de la mujer. Los suplementos ayudan a cubrir dichos requerimientos, asegurando que tanto la madre como el feto reciban los nutrientes necesarios para un desarrollo saludable y reduciendo el riesgo de complicaciones perinatales. Los profesionales de la salud, como ginecoobstetras y nutriólogos, deben evaluar la dieta de cada mujer, así como su riesgo individual de desarrollar complicaciones, para así establecer un plan de suplementación personalizado.

Los micronutrientes para prevenir complicaciones en las mamás y mejorar la salud de los hijos

Hierro y ácido fólico

El hierro es un mineral esencial durante el embarazo debido a su papel clave en la formación de la hemoglobina, la proteína en los glóbulos rojos que transporta oxígeno. En la gestación, el volumen de sangre de la mujer aumenta significativamente para llevar el oxígeno hacia los tejidos maternos y la placenta, lo que facilita el crecimiento adecuado del feto y aumenta las necesidades de hierro. Este mine-

ral es esencial para el desarrollo del bebé y la placenta; su deficiencia puede causar anemia en la madre y afectar el crecimiento del bebé, su desarrollo neurológico, además de aumentar el riesgo de prematurez. Las mejores fuentes dietéticas son alimentos como carnes, aves, frijoles, lentejas y espinacas. Aunque una dieta adecuada es importante, no siempre es suficiente para cubrir la necesidad de hierro durante el embarazo. La Organización Mundial de la Salud (OMS) recomienda que todas las mujeres embarazadas tomen un suplemento de 30-60 mg/día de hierro para reducir el riesgo de anemia, bajo peso al nacer y parto pretérmino. En México, el 89.3 % de las mujeres tiene un consumo insuficiente de hierro, y el 35 % de las embarazadas presenta anemia.

El folato actúa como una coenzima en la síntesis de nucleótidos, los bloques que forman el ADN y el ARN. Durante el embarazo, cuando las células del embrión se dividen y diferencian rápidamente para formar todos los tejidos del cuerpo, el folato facilita la replicación del ADN y la expresión genética. Su papel es vital en la multiplicación de células en tejidos en crecimiento, como la placenta y el embrión, para que el desarrollo ocurra sin errores genéticos. Por esta razón, su deficiencia puede ocasionar graves problemas congénitos, en particular los defectos del tubo neural (como espina bífida, anencefalia, entre otros). El folato también convierte la homocisteína en metionina, y si no hay suficiente folato, los niveles de homocisteína en la sangre pueden aumentar, lo que está asociado con un mayor riesgo de complicaciones en el embarazo, como el retraso del crecimiento intrauterino y la preeclampsia.

Las mejores fuentes de folato son las verduras de hoja verde oscuro, como las espinacas, así como los espárragos, coles de Bruselas y leguminosas como frijoles y chícharos. Aunque una dieta rica en folato es importante, la suplementación con ácido fólico ha mostrado prevenir defectos de cierre del tubo neural y mejorar el bajo peso al nacer. La OMS recomienda 400 mcg/día de ácido fólico para todas las mujeres en edad fértil, comenzando antes del embarazo y durante toda la gestación. Esta dosis es adecuada para mujeres con bajo riesgo de defectos del tubo neural, pero debe ajustarse en mujeres con riesgo moderado

o alto. En México, el 68.6% de las mujeres presentan un consumo insuficiente de folato.

Calcio

El consumo promedio de calcio en muchas mujeres mexicanas es insuficiente. Su papel fisiológico en el embarazo es crucial para el desarrollo óseo del bebé, el funcionamiento cardiovascular y muscular de la madre, y la prevención de complicaciones gestacionales. El calcio regula la presión arterial al influir en la contracción de los vasos sanguíneos, y su ingesta insuficiente se ha asociado con un mayor riesgo de preeclampsia. Estudios han mostrado que la suplementación con calcio puede ayudar a reducir este riesgo, especialmente en mujeres con bajo consumo de calcio y aquellas con alto riesgo de desarrollar preeclampsia (obesidad, diabetes, enfermedad renal o hepática, embarazadas adolescentes, embarazo múltiple, o antecedentes de preeclampsia). Las mejores fuentes de calcio en la dieta son los lácteos (leche, yogurt, queso), aunque también pueden aportarlo las hojas verdes, las sardinas y charales.

Vitamina D

La vitamina D es esencial durante el embarazo, ya que desempeña un papel clave en la regulación del calcio y el fósforo, que son fundamentales para el desarrollo del esqueleto fetal y la salud ósea materna. Además, la vitamina D interviene en la secreción y sensibilidad a la insulina, ya que los receptores de vitamina D en las células pancreáticas pueden influir en la producción de insulina, lo que regula los niveles de glucosa en sangre. Se ha sugerido que la vitamina D tiene efectos inmunomoduladores y antiinflamatorios, lo que pudiera contribuir a una mejor salud endotelial (de los vasos sanguíneos), reduciendo el riesgo de desarrollar preeclampsia.

La mejor forma de que el cuerpo produzca vitamina D es con la exposición a la luz solar. Aun así, es necesario incluir buenas fuentes de esta vitamina en la alimentación para ayudar a cubrir el requerimiento; los pescados grasos son una de las mejores fuentes de vitamina D. No hay un consenso sobre la suplementación para todas las mujeres embarazadas; sin embargo, dado que la deficiencia de vitamina D es

común (alrededor del 30% de las mujeres mexicanas la presentan), esta estrategia podría ser benéfica. La evidencia sugiere que la suplementación con vitamina D puede reducir el riesgo de diabetes gestacional y estimular el crecimiento del bebé (menos riesgo de bajo peso), además de una posible reducción en el riesgo de preeclampsia. Para decidir si una mujer requiere suplementarse, se debe considerar si tiene deficiencia de vitamina D (nivel en sangre de 25-hidroxivitamina D < 20 ng/ml), o si presenta factores de riesgo para deficiencia en la vitamina, como falta de exposición solar, obesidad, vivir en latitudes altas, piel oscura y dietas veganas o vegetarianas.

Omega-3

Los ácidos grasos omega-3 son esenciales durante el embarazo, pero no siempre se consumen en cantidades adecuadas. Estos ácidos grasos se encuentran en pescados y mariscos como fuente directa, mientras que fuentes indirectas incluyen semillas (linaza, chía), aceites (canola, linaza), nueces y aguacate, los cuales requieren conversión para su utilización. Las fuentes marinas son las únicas que contienen ácido docosahexaenoico (DHA) y ácido eicosapentaenoico (EPA), que son los que tienen roles activos en el organismo. Los omega-3 juegan un papel fundamental para el desarrollo cognitivo del bebé, ya que las membranas celulares de las neuronas están enriquecidas en DHA, lo que mejora la fluidez y funcionalidad.



dad de las sinapsis, además de que el DHA es esencial para la maduración neuronal y para el desarrollo de la corteza cerebral. Por otro lado, el DHA es importante para el desarrollo visual fetal, ya que ayuda en la maduración de las células fotorreceptoras (bastones y conos) en la retina, y mantiene la integridad de las membranas celulares de la retina, facilitando la transmisión de las señales visuales. Los omega-3 participan en la modulación de neurotransmisores, que es importante para la regulación del estado de ánimo. Estos ácidos grasos además tienen funciones antiinflamatorias y antioxidantes, y regulan la producción de prostaglandinas; esto promueve un entorno uterino adecuado, favoreciendo el buen crecimiento del feto y evitando que se presenten contracciones uterinas tempranas. La suplementación con omega-3 ha mostrado beneficios en la reducción del riesgo de preeclampsia, parto prematuro, bajo peso al nacer y bebés pequeños para la edad gestacional. También se ha asociado con un menor riesgo de depresión materna.

Otros nutrientes: la vitamina B12, el magnesio y el zinc

La vitamina B12 es esencial para la síntesis y metilación del ADN, la producción de energía celular, la formación de la placenta y el crecimiento fetal, así como para el desarrollo cerebral del bebé. Durante el embarazo, es esencial obtener 2.6 mcg/día en la dieta; las mujeres que no consumen productos de origen animal, principal fuente de B12, deben re-

currir a suplementos o alimentos fortificados, pues tienen riesgo de deficiencia de B12. La obesidad también puede afectar el metabolismo de esta vitamina. La deficiencia de vitamina B12 se ha documentado hasta en 30% de mujeres gestantes en el mundo y se ha asociado con defectos del tubo neural, restricción del crecimiento intrauterino, bajo peso al nacer y parto prematuro. Además, puede causar alteraciones en el neurodesarrollo del bebé, aumentar la adiposidad y provocar resistencia a la insulina en la infancia. Aunque la suplementación con vitamina B12 durante el embarazo puede ser benéfica, los estudios al respecto son limitados y no permiten llegar a conclusiones definitivas.

El magnesio es esencial para más de 300 reacciones en el cuerpo y se encuentra en alimentos como frutos secos y semillas, verduras de hoja verde, granos integrales, frutas y leguminosas, por lo que una dieta variada suele prevenir deficiencias. Sin embargo, el procesamiento de alimentos puede reducir su contenido. Las mujeres embarazadas tienen un mayor riesgo de deficiencia, ya que sus necesidades aumentan, lo que puede afectar el crecimiento y desarrollo fetal y aumentar el riesgo de parto prematuro. El magnesio también es un regulador de la sensibilidad a la insulina. La suplementación con magnesio durante el embarazo ha mostrado beneficios como reducir la necesidad de hospitalización materna y mejorar el control glucémico en mujeres con diabetes gestacional.

El zinc es esencial para el crecimiento fetal, la función inmunológica y el desarrollo neurológico. Se recomienda una ingesta dietética de 11-12 mg/día de zinc. Las principales fuentes alimentarias incluyen carnes rojas, mariscos (ostiones y almejas), leguminosas, nueces, semillas y lácteos. Aunque la deficiencia severa de zinc es rara, la deficiencia leve a moderada es bastante común y afecta al 82% de las mujeres embarazadas a nivel mundial. Bajas concentraciones de zinc materno se han asociado con parto prematuro, hemorragia posparto, bebés pequeños para la edad gestacional, retraso del crecimiento intrauterino, entre otros. La suplementación con zinc durante el embarazo ha mostrado beneficios inciertos para la prevención de complicaciones, lo que justifica la necesidad de más investigación.



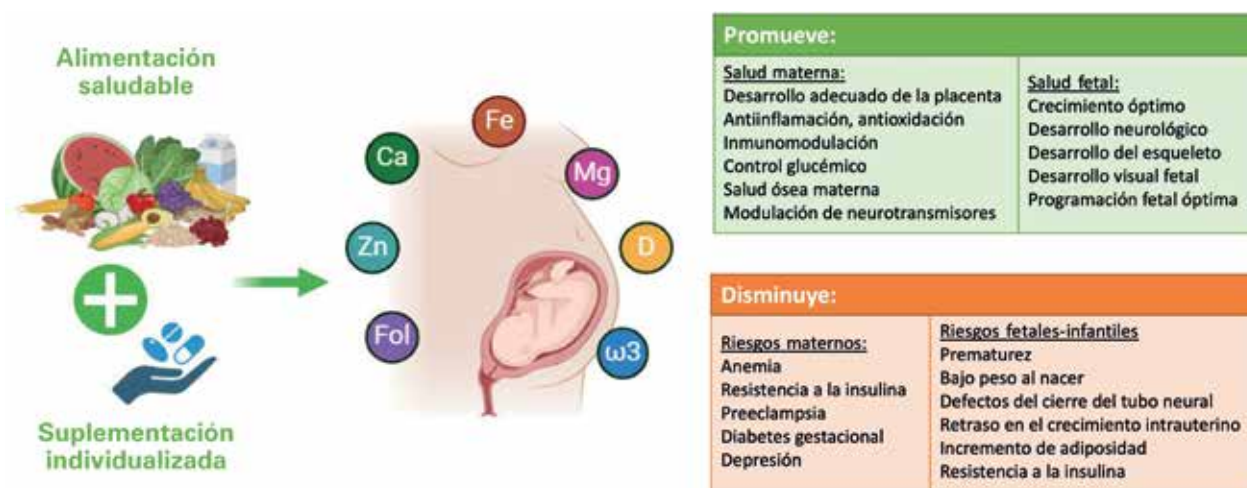


Figura 1. El aporte adecuado de micronutrientes durante el embarazo, a través de una alimentación saludable y suplementación, promueven el desarrollo óptimo del embarazo, la salud del binomio y la prevención de resultados adversos materno-fetal-infantiles.

Conclusión

Una nutrición adecuada durante el embarazo es crucial para la salud de la madre, el crecimiento y desarrollo del bebé, así como para la prevención de enfermedades crónicas a largo plazo. Es fundamental que todas las mujeres embarazadas reciban atención de un profesional de la salud que les brinde orientación para seguir una dieta saludable y un plan de suplementación que incluya hierro y ácido fólico. La suplementación con calcio se recomienda para aquellas con alto riesgo de hipertensión o bajo consumo de este mineral. Otros nutrientes, como la vitamina D, omega-3 y multivitamínicos deben ser suplementados de manera personalizada según las necesidades individuales, la dieta, los riesgos específicos y las deficiencias

presentes. Estas intervenciones personalizadas no sólo mejoran la experiencia del embarazo, sino que también pueden reducir la carga de enfermedades y tener un impacto positivo en la salud de las futuras generaciones (véase la [Figura 1](#)).

Ameyalli M. Rodríguez-Cano

Coordinación de Nutrición y Bioprogramación, Instituto Nacional de Perinatología.

rocamellayi@gmail.com

Otilia Perichart-Perera

Coordinación de Nutrición y Bioprogramación, Instituto Nacional de Perinatología.

oti_perichart@yahoo.com

Lecturas recomendadas

- Perichart-Perera, O. y A. M. Rodríguez-Cano (2022), "Suplementación de micronutrientes durante el embarazo: revisión narrativa de revisiones sistemáticas y metanálisis", *Ginecología y Obstetricia de México*, 90(12):968-994.
- Perichart-Perera, O. y A. M. Rodríguez-Cano (2023), "Nutrición en el embarazo", en M. Kaufer-Horwitz, A. Pérez-Lizaur, V. Ramos y L. Gutiérrez, *Nutriología médica*, 5ª ed., Editorial Médica Panamericana, México, 313-342.
- Mejía-Montilla, J., N. Reyna-Villasmil y E. Reyna-Villasmil (2021), "Consumo de micronutrientes durante el

embarazo y la lactancia", *Revista Peruana de Ginecología y Obstetricia*, 67(4).

Mousa, A., A. Naqash y S. Lim (2019), "Macronutrient and Micronutrient Intake during Pregnancy: An Overview of Recent Evidence", *Nutrients*, 11(2):443.

Richard, K., O. Holland, K. Landers, J. J. Vanderlelie, P. Hofstee *et al.* (2017), "Review: Effects of maternal micronutrient supplementation on placental function", *Placenta*, 54:38-44.

Enrique Reyes-Muñoz, Lidia Arce-Sánchez y Nayeli Martínez-Cruz



Ovarios poliquísticos: una batalla hormonal desde la vida intrauterina

El síndrome de ovario poliquístico (SOP) es el trastorno endócrino más frecuentemente detectado en la mujer en edad reproductiva. Diferentes científicos han aportado pruebas sobre el impacto del entorno intrauterino en el origen del síndrome y de la resistencia a la insulina (RI) en la vida posnatal, como el desarrollo del síndrome metabólico, prediabetes, diabetes mellitus tipo 2 y enfermedad cardiovascular —por ejemplo, hipertensión arterial crónica en mujeres con SOP—. El objetivo del presente artículo es explicar el papel de la programación fetal y la RI en el origen del SOP, así como los riesgos asociados e intervenciones efectivas para disminuirlos.

¿Qué es el síndrome de ovario poliquístico?

El síndrome de ovario poliquístico (SOP) es una forma común de infertilidad anovulatoria con un fuerte componente hereditario, que se expresa en forma de ciclos menstruales ausentes o infrecuentes, formación de múltiples quistes en el ovario que pueden ocasionar un exceso de hormonas sexuales masculinas. El SOP afecta entre un 10 y 20 % de las mujeres en edad reproductiva, lo que constituye una carga sanitaria y económica importante a nivel mundial. Su presentación clínica varía ampliamente y en la actualidad no existe consenso sobre los criterios para su diagnóstico. En 2003 un consenso de expertos en Rotterdam postuló que el diagnóstico se sustenta en la presencia de al menos dos de las siguientes tres características clínicas: morfología ovárica poliquística (más de 20 folículos ováricos con diámetro mayor a 2 mm y menor a 9 mm, o volumen ovárico >10 centímetros cúbicos en al menos un ovario), oligo-amenorrea (menos de 8 ciclos por año o ciclos menstruales menores de 21 días o mayores de 35 días), o hiperandrogenismo clínico (hirsutismo, acné o alopecia con distribución androgénica) o bioquímico (elevación de testosterona total y libre). Aunque se considera



Modificaciones epigenéticas
Se refiere a los cambios en la función de los genes que son hereditarios y que no se pueden atribuir a alteraciones de la secuencia de los genes.

un trastorno de capital importancia en las mujeres en edad reproductiva, este síndrome puede afectar en cualquier momento de la vida, elevando el riesgo de hiperplasia endometrial y el riesgo cardiometabólico a largo plazo.

■ **¿Cuál es el posible origen del síndrome de ovario poliquístico?**

■ Su origen es incierto; sin embargo, las pruebas actuales sugieren que se trata de una enfermedad multifactorial, con la participación de diferentes genes candidatos. Dentro de los múltiples genes implicados en la disfunción neuroendócrina del SOP, destacan aquellos que codifican para las hormonas proteínicas y sus receptores implicados en la regulación de la esteroidogénesis ovárica-suprarrenal, la ovulación y el ciclo menstrual, así como aquellos genes que participan en la expresión metabólica del síndrome (gen del receptor de insulina, genes que modulan la homeostasis de energía y la inflamación sistémica). La evidencia experimental apoya la hipótesis de que la expresión fenotípica del SOP está fuertemente

influenciada por el ambiente intrauterino, el cual puede apagar o sobreexpresar genes (**modificaciones epigenéticas**), tanto en células somáticas (páncreas, tejido adiposo, hígado) como en células germinales (óvulos y espermatozoides), que puede transmitirse a las futuras generaciones. Las hipótesis basadas en el impacto del entorno intrauterino sobre el desarrollo del SOP se pueden agrupar en dos categorías. La primera es la hipótesis del fenotipo “ahorrador”, que establece que la restricción nutricional intrauterina genera RI por una reducción de su secreción desde la etapa fetal por el apagamiento de algunos genes específicos (metilación). La segunda hipótesis postula que la exposición fetal al exceso de andrógenos representa el principal factor capaz de inducir modificaciones epigenéticas que pueden afectar el desarrollo del eje hipotálamo-hipófisis-ovario y predisponer al desarrollo del SOP en la vida posnatal, aumentar las concentraciones de insulina en sangre (hiperinsulinemia) y potenciar el riesgo de desarrollar síndrome metabólico, diabetes mellitus tipo 2, hipertensión arterial crónica e hígado graso no alcohólico (**Figura 1**).

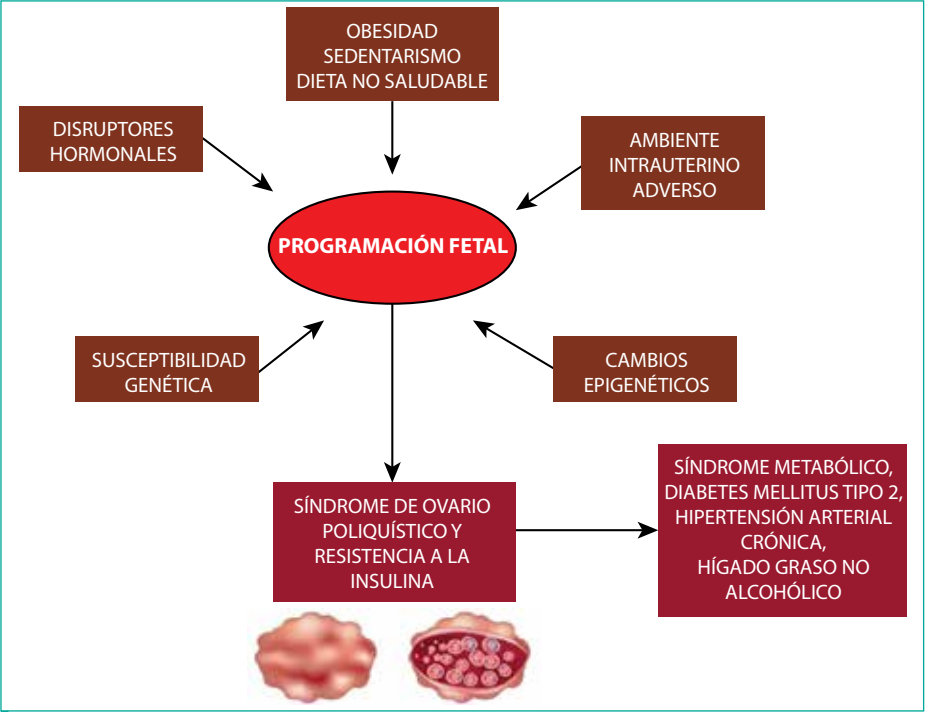


Figura 1. Factores asociados a la programación fetal del síndrome de ovario poliquístico y resistencia a la insulina, y sus posibles efectos a largo plazo.

El papel de la resistencia a la insulina en la emergencia del síndrome de ovario poliquístico

Entre las portadoras del SOP, la RI es capaz de promover un incremento en la producción de andrógenos. La RI se describe como una alteración metabólica en la que una célula o tejido (hígado, músculo o tejido adiposo) falla en su capacidad para almacenar la glucosa. Se estima que el 75 % de las mujeres afectadas por SOP nacen con un defecto intrínseco en la acción de la insulina, que no depende del peso o porcentaje de la grasa corporal total (65-95 % de las mujeres con SOP y obesidad versus 50 % de las mujeres con SOP y normopeso). La evidencia actual demuestra que el exceso de insulina a nivel del hipotálamo aumenta la secreción de una hormona gonadotrópica (hormona luteinizante, HL) que regula el ciclo reproductivo de hombres y mujeres (40-60 % comparada con la población sin SOP). La insulina y la HL en las mujeres con SOP promueven de manera sinérgica la síntesis de andrógenos ováricos.

De igual manera, a nivel hepático, la insulina afecta la producción de la proteína que regula los niveles de testosterona (globulina transportadora de hormonas sexuales), provocando un incremento significativo de la fracción de andrógenos con mayor actividad biológica (forma libre), que detonan el crecimiento excesivo de vello corporal, la alopecia y acné en las portadoras del síndrome.

Una observación experimental adicional relevante en los ovarios de las mujeres con SOP y marcada RI es la detección de un número mayor de folículos inmaduros menores de 5 milímetros, que expanden el número total de células productoras de andrógenos. También se ha descrito que la HL en presencia de insulina estimula la secreción de progesterona de manera temprana, lo cual impide el desarrollo folicular normal.

Aunque los ovarios son la fuente principal de hormonas masculinas en el SOP, hasta el 50 % de las portadoras muestra adicionalmente un exceso de andrógenos de origen suprarrenal (manifiesto por la elevación del sulfato de dehidroepiandrosterona). En este contexto, existen datos que señalan que el exceso de insulina amplifica la acción de la hormona producida por la hipófisis, que estimula las glándu-

las suprarrenales (hormona adrenocorticotrópica), debido a una alteración hereditaria en las enzimas productoras de andrógenos dentro de esta glándula. A lo largo de la vida reproductiva, el efecto conjunto del hiperandrogenismo ovárico-suprarrenal y la obesidad empeora la insulinoresistencia y crea un círculo vicioso que se estimula mutuamente (Figura 1).

Riesgos asociados en mujeres con síndrome de ovario poliquístico

La fisiopatología del SOP se relaciona principalmente con un desequilibrio hormonal en la insulina, los esteroides sexuales y un estado de inflamación crónica de bajo grado, los cuales originan múltiples comorbilidades. La coexistencia de RI en las portadoras de SOP (60-80 %), eleva significativamente el riesgo a largo plazo de síndrome metabólico, enfermedad del hígado graso no alcohólico, diabetes mellitus tipo 2, enfermedad cardiovascular, enfermedad renal, ansiedad, depresión, trastornos de la alimentación, apnea obstructiva del sueño, demencia y cáncer de endometrio.

El SOP se asocia con un mayor riesgo de asistencia para el tratamiento de la fertilidad y de complicaciones perinatales. De acuerdo con varios estudios, los trastornos lipídicos están presentes en un 70 % de los casos confirmados en forma de un patrón aterogénico (reducción del colesterol de las lipoproteínas de alta densidad con aumento de los triglicéridos y del colesterol unido a lipoproteínas de baja densidad). Entre las portadoras de SOP la frecuencia de sobrepeso y obesidad es alta comparada con mujeres de edad similar sanas, independientemente de la edad, de los criterios diagnósticos seleccionados y la región geográfica, lo cual se adjudica a una alteración intrínseca en la distribución de la grasa corporal. De igual forma, se han reportado trastornos en la coagulación debido al estado inflamatorio crónico de bajo grado.

Un estudio reciente ha confirmado un mayor riesgo de intolerancia a la glucosa (3 veces mayor) y de diabetes tipo 2 (4.4 veces mayor) en mujeres jóvenes con SOP, comparado con mujeres sanas delgadas u obesas. En consonancia con estas observa-



ciones, se ha demostrado que una concentración de testosterona genéticamente más alta es metabólicamente perjudicial en las mujeres. En la actualidad, un creciente cuerpo de evidencias indica un mayor riesgo (2.2 veces mayor) de enfermedad del hígado graso asociado a la disfunción metabólica del SOP. Las alteraciones en el patrón y calidad del sueño también son mayores en esta población (riesgo 3.8 veces mayor). Desde el punto de vista de la salud reproductiva, se estima que los periodos menstruales infrecuentes o irregulares (oligomenorrea) afectan al 75-85 % de las mujeres con SOP. La ausencia de ciclos ovulatorios de manera crónica puede exponer al endometrio a una estimulación estrogénica prolongada que potencialmente podría promover el riesgo de aborto espontáneo y cáncer endometrial. En la gestación, la preexistencia de SOP magnifica significativamente la probabilidad de diabetes mellitus gestacional (riesgo 2.9 mayor), hipertensión gestacional (riesgo 3.6 mayor), preeclampsia (riesgo 3.5 mayor), parto prematuro (riesgo 1.75 veces mayor) y mortalidad perinatal (riesgo 3.07 veces mayor).

Además de los riesgos de salud a largo plazo, el bienestar psicológico es una consideración importante en este síndrome. Un estudio encontró que el 40 % de las mujeres portadoras del SOP tienen depresión y trastornos del estado de ánimo (16.6 %), los cuales pueden afectar otras áreas de la vida, como las relaciones interpersonales, el trabajo y la participación en la comunidad.

Efectos transgeneracionales

Estudios recientes han demostrado que los cambios genéticos y epigenéticos que incrementan el

riesgo de desarrollar el SOP y la RI, pueden transmitirse de una generación hasta a dos o tres generaciones subsecuentes, lo cual implica romper y modificar el riesgo con intervenciones preventivas, dado que aun con las medidas de intervención que pueden modificar los desenlaces en el corto plazo, la susceptibilidad a desarrollar SOP y RI persisten para las futuras generaciones en el corto plazo.

Intervenciones efectivas para disminuir la resistencia a la insulina en el síndrome de ovario poliquístico

Identificar y tratar oportunamente a las personas con SOP y RI podría contribuir a la prevención del desarrollo de enfermedades crónicas, entre las que se encuentran: el síndrome metabólico, la diabetes mellitus tipo 2, hígado graso no alcohólico, hipertensión arterial crónica y enfermedades cardiovasculares.

Las intervenciones en el estilo de vida constituyen el tratamiento de primera línea en el manejo del SOP, particularmente en personas con exceso de peso. Las reducciones modestas en el peso corporal total, de tan sólo un 5 a 7 %, ofrecen beneficios metabólicos y posiblemente reproductivos. Asimismo, estas intervenciones en el estilo de vida mejoran parámetros como la circunferencia de la cintura, la relación cintura-cadera, insulina y glucosa en ayuno y el colesterol total. Cabe destacar que los estudios que involucran cambios en el estilo de vida que resultan en pérdida de peso demostraron que las mujeres con SOP logran mejoras de pérdida de peso similares a las que no lo padecen.

Por lo tanto, la principal recomendación para disminuir la RI en mujeres con SOP son los cambios en el estilo de vida que consisten en realizar una dieta saludable, balanceada, con disminución de alimentos ultraprocesados y bebidas azucaradas. Asimismo, se recomienda dedicar entre 150 y 300 minutos a la semana a realizar ejercicio; entre los ejercicios más recomendables se pueden señalar: la caminata (11 000 pasos por día), natación (30 a 45 minutos 3 a 4 veces por semana), una hora de yoga 3 días a la semana o un entrenamiento formal 3 a 5 veces por semana.

Entre los fármacos más utilizados para disminuir

la RI podemos mencionar la metformina, medicamento que ha demostrado ser efectivo; sin embargo, un 30 % a 40 % de las pacientes abandonan el tratamiento debido a efectos adversos como molestias gastrointestinales, náuseas y diarrea. En la mayoría de las personas con RI, inicialmente es recomendable, además de los cambios en el estilo de vida, agregar suplementos o fármacos sensibilizadores de la insulina; entre los suplementos más utilizados está el Mioinositol con alfa-lactoalbúmina, que ha demostrado ser tan efectivo como la metformina para disminuir la RI y que tiene entre las principales ventajas que no causa efectos adversos y en general es bien tolerado.

En mujeres embarazadas con el antecedente de SOP, la suplementación con Mioinositol ha demostrado una disminución en el desarrollo de diabetes mellitus gestacional, preeclampsia y nacimiento prematuro.

Conclusiones

El SOP es una enfermedad que afecta a una o dos de cada 10 mujeres en edad reproductiva. Si bien se desconoce el origen del SOP, los estudios actuales han

demostrado que tiene un componente multifactorial en el que se incluyen factores genéticos y epigenéticos influenciados por el ambiente, la alimentación, disruptores endócrinos, el microbioma intestinal, el sobrepeso y la obesidad. La RI y la elevación de andrógenos constituyen un ambiente intrauterino adverso que favorece la programación fetal para una mayor probabilidad de desarrollar SOP en la descendencia. El tratamiento inicial en mujeres con SOP y RI debe hacerse mediante intervenciones enfocadas a cambios en el estilo de vida.

Enrique Reyes-Muñoz

Dirección de Investigación, Instituto Nacional de Perinatología.
dr.enriquereyes@gmail.com

Lidia Arce-Sánchez

Coordinación de Endocrinología, Instituto Nacional de Perinatología.
li_arce@yahoo.com.mx

Nayeli Martínez-Cruz

Coordinación de Endocrinología, Instituto Nacional de Perinatología.
nayemc_21@hotmail.com

Lecturas recomendadas

Hernández-Valencia, M., M. Hernández-Rosas y A. Zárate (2010), "Atención de la resistencia a la insulina en el síndrome de ovarios poliquísticos", *Ginecología y Obstetricia en México*, 78(11):612-616.

Reyes-Muñoz, E., T. Sathyapalan, P. Rossetti, M. Shah, M. Long, M. Buscema *et al.* (2018), "Polycystic Ovary Syndrome: Implication for Drug Metabolism on Assisted Reproductive Techniques-A Literature Review", *Advances in Therapy*, 35(11):1805-1815.

Reyes-Muñoz, E., C. Ortega-González, N. Martínez-Cruz, L. Arce-Sánchez, G. Estrada-Gutiérrez, C. Moran *et al.* (2016), "Association of obesity and overweight with the prevalence of insulin resistance, pre-diabetes and clinical-biochemical characteristics among infertile Mexican women with polycystic ovary syndrome: a cross-sectional study", *BMJ Open*, 6(7):e012107.

Stener-Victorin, E., H. Teede, R. J. Norman, R. Legro, M. O. Goodarzi *et al.* (2024), "Polycystic ovary syndrome", *Nature Reviews Disease Primers*, 10(1):27.

Teede, H. J., C. T. Tay, J. Laven, A. Dokras, L. J. Moran, T. T. Piltonen *et al.* (2023), "Recommendations from the 2023 International Evidence-based Guideline for the Assessment and Management of Polycystic Ovary Syndrome", *Fertility and Sterility*, 120(4):767-793.

Topete-Camarena, V. M., J. Balandra-Ortiz, C. Ortega-González y E. Reyes-Muñoz (2011), "Resultados obstétricos y perinatales de mujeres mexicanas con síndrome de ovarios poliquísticos", *Perinatología y Reproducción Humana*, 25(2):88-93.

Vázquez-Martínez, E. R., Y. I. Gómez-Viais, E. García-Gómez, C. Reyes-Mayoral, E. Reyes-Muñoz, I. Camacho-Arroyo *et al.* (2019), "DNA methylation in the pathogenesis of polycystic ovary syndrome", *Reproduction*, 158(1):R27-R40.

Arturo Alejandro Canul Euan, Sandra Martínez Medina y Blanca Vianey Suárez Rico

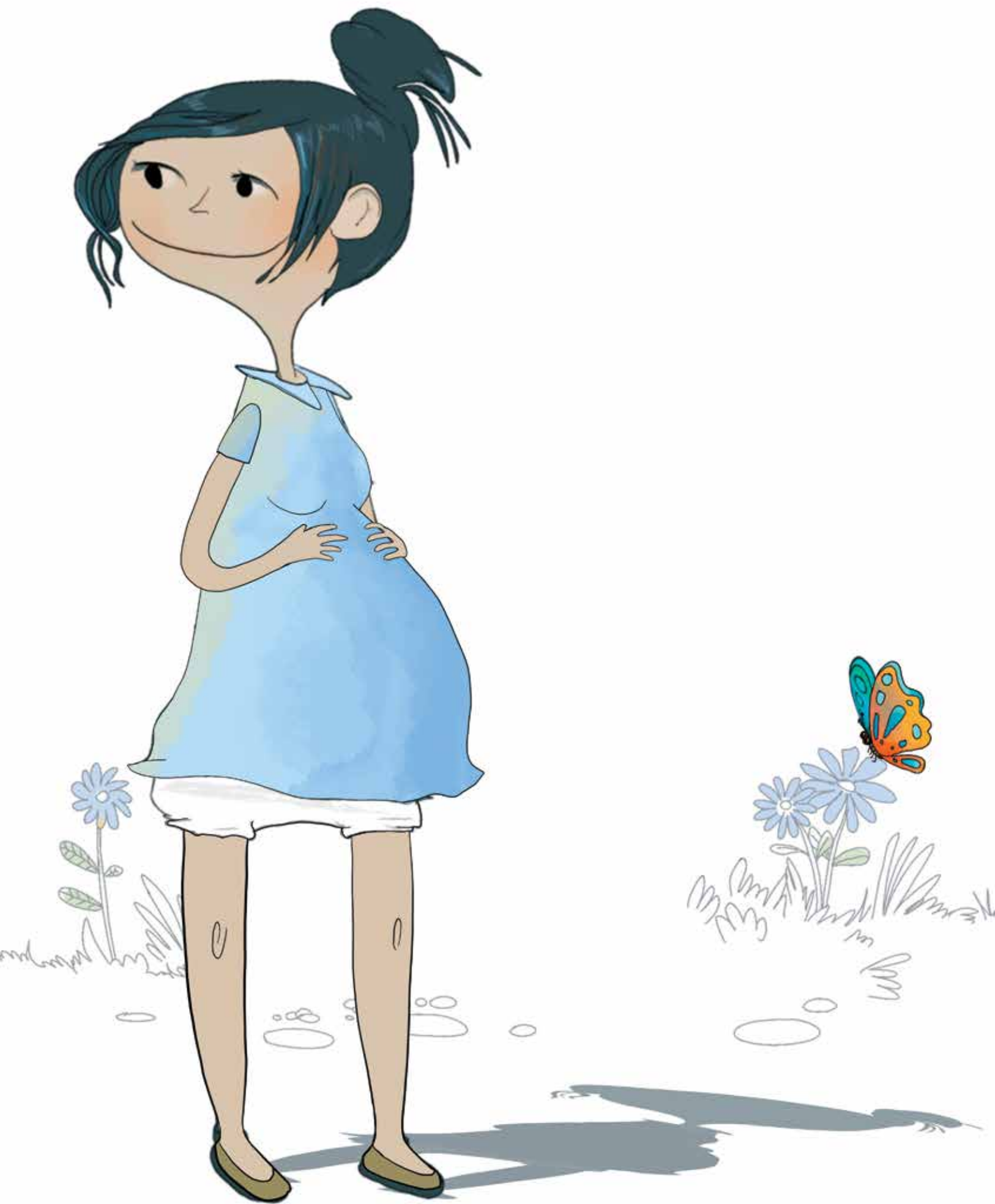
La salud mental perinatal y el desarrollo del cerebro infantil

Nuevas investigaciones sobre el desarrollo humano muestran que las adaptaciones psicológicas al entorno ocurren desde la concepción y afectan el desarrollo a lo largo de la vida. Exposiciones ambientales tempranas pueden impactar la formación del cerebro, afectando el aprendizaje y el comportamiento del niño a largo plazo. Este artículo explora la importancia de la salud mental durante el embarazo y la maternidad, mostrando mitos y realidades sobre algunas creencias comunes y ofreciendo estrategias para apoyar en estas etapas.

Programación fetal y desarrollo infantil temprano: claves para estimular nuestro máximo potencial

El concepto de programación fetal describe el proceso por el cual el feto percibe y responde al ambiente intrauterino (o es influenciado por éste). El cerebro en desarrollo es particularmente moldeable y sensible a los efectos de la programación fetal. La mayor parte de la diferenciación de las principales estructuras cerebrales ocurre durante la vida prenatal, orquestada por una cascada de interacciones bidireccionales que ocurren entre los compartimentos materno y fetal, y el entorno externo. Debido al prolongado periodo de desarrollo del cerebro, desde el nacimiento hasta la adolescencia, el concepto de programación puede aplicarse a la etapa fetal y también a algunos periodos de la vida temprana especialmente susceptibles a los efectos del ambiente. Actualmente, los investigadores hemos puesto especial interés en el periodo que va de los 0 a los 5 años de vida.

El periodo de desarrollo infantil temprano es uno de enormes cambios y se caracteriza por un alto grado de plasticidad en la organización cerebral. Podemos decir que este periodo abarca desde la concepción hasta la edad de 5 años, es decir, los primeros 2 000 días de vida. El cerebro es producto de los genes, la experiencia y el entorno. Es resultado de una combinación de lo innato y lo adquirido.



Después del nacimiento, el cerebro del recién nacido sigue desarrollándose. En estos primeros días de vida, la velocidad y la complejidad con que se establecen las conexiones neuronales es única. ¡En los primeros 2 años de vida se forman más de un millón de nuevas conexiones neuronales cada segundo!

Después de este periodo de rápida proliferación neuronal, las conexiones se reducen a través de un proceso llamado poda, de modo que los circuitos cerebrales se vuelven más eficientes. Las vías sensoriales, como las de la visión y la audición básica, son las primeras en desarrollarse, seguidas de las habilidades lingüísticas tempranas y funciones cognitivas superiores. Las conexiones se multiplican y se podan en un orden prescrito, y los circuitos cerebrales posteriores, más complejos, se construyen sobre circuitos anteriores y más simples (véase la **Figura 1**).

Las primeras experiencias de la vida afectan la calidad de la arquitectura cerebral al establecer una base sólida o frágil para todo el aprendizaje, la salud y el comportamiento futuros. Se sabe actualmente que las experiencias tempranas pueden afectar a la salud adulta al menos de dos maneras: acumulando daños con el tiempo o mediante la incrustación biológica de adversidades durante periodos sensibles del desarrollo. En ambos casos, puede transcurrir un lapso de muchos años, incluso décadas, antes de que las

experiencias adversas tempranas se manifiesten en forma de enfermedad. Si el daño se produce a través de un proceso acumulativo, las enfermedades crónicas pueden considerarse el producto de repetidos encuentros con experiencias estresantes tanto psicológicas como físicas. Cuando las exposiciones se producen durante periodos sensibles del desarrollo, sus efectos pueden incorporarse de forma permanente a los distintos procesos fisiológicos. Podríamos decir que la enfermedad en el adulto es el resultado de una exposición constante a estresores en momentos críticos del desarrollo (véase la **Figura 2**).

Experimentar estrés es una parte importante del desarrollo saludable. La activación de la respuesta al estrés produce una amplia gama de reacciones fisiológicas que preparan al cuerpo para hacer frente a la amenaza. Sin embargo, cuando estas respuestas permanecen activadas por mucho tiempo, sin relaciones de apoyo que ayuden a calmarlas, se produce el estrés tóxico. Esto puede perjudicar el desarrollo de las conexiones neuronales, especialmente en las áreas del cerebro dedicadas a las habilidades de orden superior, como la neocorteza, el lóbulo frontal, el hipocampo y la amígdala, y provocar problemas permanentes de aprendizaje, comportamiento, salud física y mental.

Las capacidades cognitivas, emocionales y sociales se encuentran complejamente entrelazadas a lo

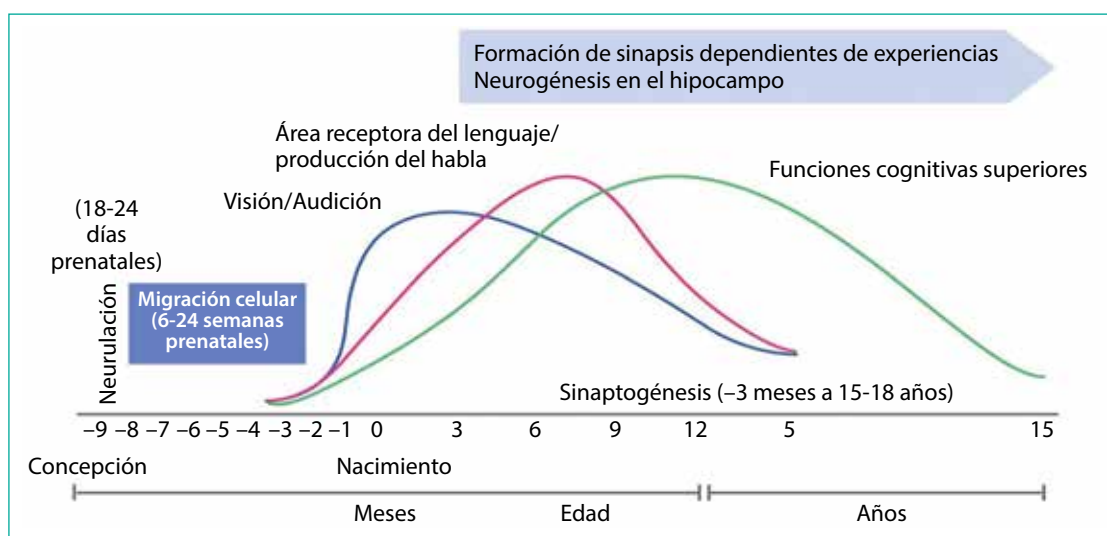


Figura 1. Desarrollo cerebral en los periodos críticos. Los niños presentan un desarrollo cerebral importante en los primeros 2 000 días de vida, el cual depende de la experiencia e impacta considerablemente sus funciones cognitivas, sensoriales, lingüísticas y motrices a lo largo de su vida. (Adaptado a partir de Black *et al.*, 2017.)

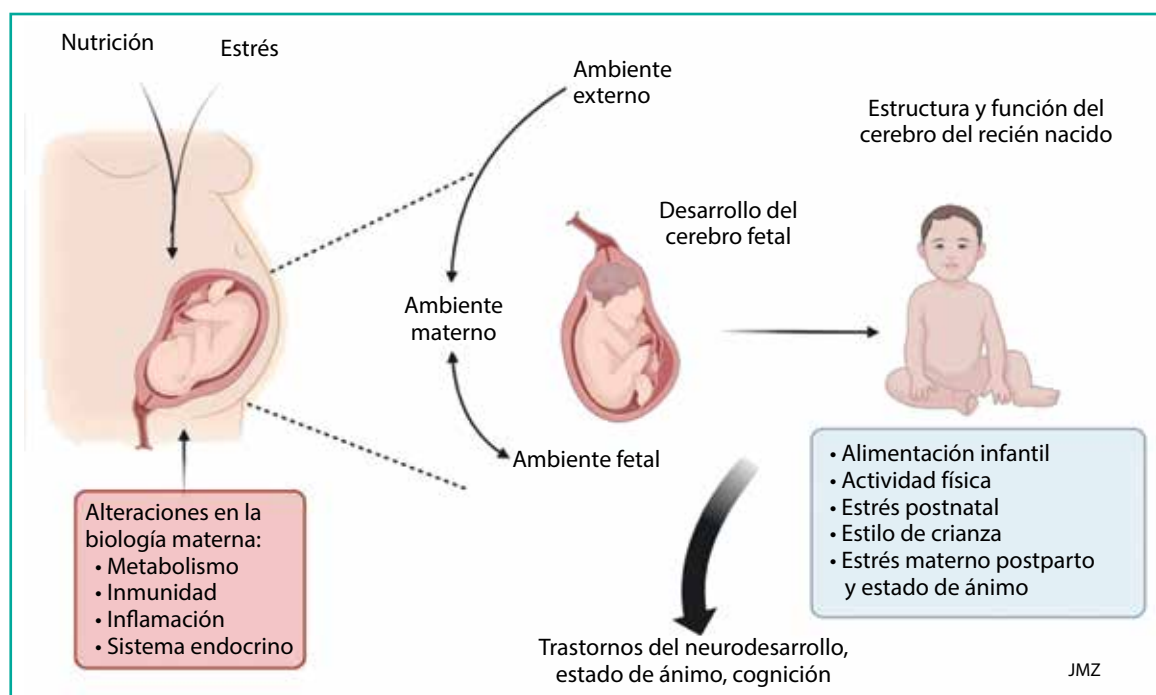


Figura 2. Programación fetal del desarrollo cerebral. Las experiencias o adversidades pre y postnatales pueden generar alteraciones en varios sistemas que a su vez modifican la estructura y función cerebrales en los primeros años, lo cual se refleja en resultados adversos en el neurodesarrollo a corto, mediano y largo plazo. (Adaptado a partir de Lindsay, 2019.)

largo de la vida. El bienestar emocional y la competencia social proporcionan una base sólida para las habilidades cognitivas emergentes y, en conjunto, son los pilares de la arquitectura cerebral. La salud física y emocional, las habilidades sociales y las capacidades cognitivo-lingüísticas que surgen en los primeros años son importantes para el éxito en la escuela, el lugar de trabajo y la comunidad en general. Los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ods) fueron adoptados por las Naciones Unidas en 2015 como un llamamiento universal para poner fin a la pobreza, proteger el planeta y garantizar que para el 2030 todas las personas disfruten de paz y prosperidad. Esta Agenda 2030 es un plan de acción a favor de las personas y el planeta, y tiene como eje rector “garantizar que todos los seres humanos puedan desarrollar su potencial en condiciones de dignidad e igualdad”.

Desde la concepción y hasta los 5 años se tiene la oportunidad de ampliar las intervenciones de desarrollo si se proporcionan cuidado materno y estimulación a través de la crianza de los hijos, el apoyo educativo y una adecuada salud nutricional. Las in-

tervenciones de cuidado cariñoso y sensible proporcionan los entornos iniciales necesarios para que se produzca la progresión del desarrollo y proteger a los bebés y niños de los efectos negativos del estrés y la adversidad.

Los primeros 2000 días de vida tienen una gran repercusión en el futuro de un niño. Un mal comienzo en la vida puede afectar negativamente la salud y el aprendizaje, y estos efectos negativos se extienden a la edad adulta resultando en bajos ingresos económicos, lo que genera más pobreza. Los niños de hoy impulsarán el crecimiento y el desarrollo en las sociedades del mañana. Por eso, proteger, promover y apoyar el desarrollo infantil temprano es fundamental para que todos puedan alcanzar su máximo potencial humano.

■ Importancia de la salud mental durante el embarazo y la maternidad

■ El embarazo y la maternidad son momentos marcados por una serie de cambios biológicos, psicológicos y sociales que impactan el bienestar de madre e

hijo. A menudo el foco principal se dirige a la salud física, descuidando la salud mental, que es importante en todos los momentos de nuestra vida. Ignorar las necesidades emocionales puede tener consecuencias tanto para las mujeres como para sus hijos. Se sabe que los trastornos mentales perinatales son un grave problema de salud pública en todo el mundo y tienen una mayor prevalencia en los países de medianos a bajos ingresos, como México, principalmente en las mujeres más pobres y con antecedentes psiquiátricos, como ansiedad y depresión.

Salud mental durante el embarazo

El embarazo es un periodo de cambios hormonales que pueden afectar significativamente el estado de ánimo de las mujeres. Los cambios hormonales, físicos y la expectativa de la llegada de un nuevo miembro a la familia pueden generar estrés, ansiedad e incluso depresión. Las expectativas sociales y culturales en torno a la maternidad pueden aumentar las dificultades emocionales que experimentan las mujeres embarazadas. La idealización de la “madre perfecta” puede generar sentimientos de culpa y frustración cuando no se ajustan a este estándar.

Además, la desigualdad de género en la distribución de las tareas domésticas y de cuidado de los hijos puede incrementar el estrés y la ansiedad durante el embarazo. La creencia de que el espacio doméstico y de cuidado es exclusivamente femenino, mientras que el espacio público es masculino, contribuye a esta presión adicional. Es importante que las mujeres embarazadas validen sus emociones y normalizar la búsqueda de ayuda profesional y apoyo emocional durante el embarazo (véase la [Figura 3](#)).

Salud mental en la maternidad

La llegada de un bebé trae consigo grandes alegrías y satisfacciones, pero también puede desencadenar problemas de salud mental, entre los cuales el de la depresión postparto es el más común. Esta condición afecta a una de cada siete mujeres y puede interferir gravemente en su capacidad para cuidar de sí mismas y de sus hijos.



Figura 3. Ilustración de la depresión postparto. La falta de comprensión de los síntomas por parte de la pareja limita el apoyo en el cuidado de los hijos, recayendo esta tarea, por desigualdad de género, en la madre. Crédito de imagen: Freepik.

La responsabilidad del cuidado y la crianza incrementa la carga física, mental y emocional de las madres. Así pues, promover la participación activa de los padres en la crianza de los hijos es fundamental para proteger la salud mental de las mujeres y el desarrollo del niño. En México es urgente cambiar el modelo de maternidad intensiva, que implica subordinación y dependencia, y reconocer que tanto hombres como mujeres están encadenados a los modelos de género heredados. Es importante trabajar hacia una mayor equidad para romper estereotipos de género y apoyar la salud mental en la etapa perinatal (véase la [Figura 4](#)).

El efecto en el desarrollo de un cuidado y atención tempranos

Como ya se mencionó, las alteraciones emocionales maternas pueden tener un impacto en su capacidad para cuidar a sus hijos. Si bien es cierto que un nivel de preocupación durante el embarazo es normal, es importante observar si estos sentimientos se vuelven abrumadores e interfieren con la vida cotidiana, ya que pueden convertirse en trastornos de ansiedad o depresión, y si no son tratados las madres



Figura 4. Efectos de la depresión postparto. La falta de apoyo a las madres con depresión en etapas perinatales repercute en el cuidado de sus hijos. (Tomada de Zero Blog, Zero Psicólogos Palma de Mallorca.)

pueden caer en patrones de comportamiento poco saludables, como la falta de sueño, mala alimentación y falta de actividad física. Otro aspecto que puede verse afectado es la capacidad para establecer vínculos afectivos fuertes y positivos con sus hijos.

Cuántas veces hemos escuchado: “¡No estés triste porque le hace daño a tu bebé!” Si la madre siente tristeza durante el embarazo afecta al bebé, debido a que las emociones maternas tienen un efecto directo en el sistema endocrino y en la liberación de hormonas en su cuerpo; estas hormonas pueden atravesar la placenta y afectar el curso normal del desarrollo del sistema nervioso del bebé.

El cortisol es una hormona que se libera en respuesta al estrés, atraviesa la placenta y pasa a la circulación sanguínea fetal. Una mala gestión del estrés durante el primer trimestre del embarazo hace que los sistemas de regulación internos, como el eje hipotálamo-hipofisis-adrenal, no siga su curso regular, afectando directamente al desarrollo fetal y aumentando el riesgo de un aborto o de alteraciones congénitas –como, por ejemplo, una alteración del desarrollo de la cresta neural–. Si la mujer está estresada antes de embarazarse, puede tener consecuencias a largo plazo debido a que los niveles de cortisol pueden permanecer en el útero. Además, se ha visto que este aumento del cortisol puede afectar el desarrollo motor de los bebés.

Cada vez hay más investigaciones que demuestran que la función de la placenta cambia en respuesta

al estado de ánimo de la madre, y puede alterar su capacidad de filtrado, especialmente al cortisol. Es decir, el cortisol se pasa a la placenta sin que haya alguna barrera para detenerlo. Una disminución de la enzima placentaria que metaboliza el cortisol está asociada con un aumento de los síntomas maternos de ansiedad. También se ha visto que el aumento de la exposición al cortisol en el útero se asocia con alteraciones del crecimiento fetal, del desarrollo cognitivo infantil en los lactantes a los 3 y 8 meses.

Tener mucho miedo al parto en la segunda mitad del embarazo se ha asociado con una disminución hasta de ocho puntos en las escalas de desarrollo mental y motor a los 8 meses.

Si la madre presenta síntomas depresivos durante el primer trimestre y esta situación no es atendida, existe el riesgo de aborto, parto pretérmino, cesáreas de urgencia, bebés con un bajo peso al nacer y problemas para lactar. En un estudio llevado a cabo hasta la adolescencia con madres que presentaban depresión, se encontró que los menores tenían mayor impulsividad y menor puntuación en escalas de inteligencia. Si la madre presentó ansiedad durante el embarazo, los niños mostraron problemas de conducta, como hiperactividad y déficit de atención a los 4 años, situación que no sucedió con la depresión postparto. Es importante contar con herramientas para la detección temprana de estos problemas de salud mental para su manejo oportuno.

■ Mitos y realidades sobre la salud mental perinatal

■ Existen muchas creencias en torno a la salud emocional materna que conducen a malos entendidos y conductas perjudiciales, ya que “el embarazo debería ser una etapa donde la mujer debe estar *feliz y plena* porque va a ser mamá”.

A continuación mencionaremos algunos mitos sobre la salud emocional que es importante tomar en cuenta:

Mito: los problemas emocionales durante el embarazo son normales, “están hormonales” y “de todo lloran o se enojan”.



Realidad: sí, suceden cambios hormonales que llevan a la mujer a trastornos en el estado emocional. Si éstos no son tomados en cuenta y salen de los niveles esperados, pueden tener un impacto significativo en la mamá y el bebé.

Mito: la depresión postparto es sólo tristeza temporal y un pretexto para no cuidar a su bebé.

Realidad: la depresión postparto es una condición seria que va más allá de la “tristeza”. Puede durar meses y requiere tratamiento profesional.

Mito: sólo las mujeres con “problemas mentales” desarrollan ansiedad postparto.

Realidad: tener antecedentes de problemas de salud mental puede aumentar el riesgo, pero cualquier mujer puede experimentar ansiedad postparto debido a los cambios hormonales y a las nuevas responsabilidades.

Mito: la maternidad es un momento naturalmente feliz y lo mejor que le puede pasar a una mujer.

Realidad: las expectativas sociales de que la maternidad debe ser feliz pueden hacer que las mujeres se sientan culpables o avergonzadas de sus sentimientos, e impedirles buscar ayuda y visibilizar su malestar.

Mito: las mujeres están biológicamente programadas para ser madres y, por lo tanto, deberían manejar el estrés de la maternidad de forma natural.

Realidad: la maternidad implica una serie de cambios físicos y emocionales que pueden ser abrumadores. La idea de que las mujeres están naturalmente equipadas para manejar estos desafíos minimiza la complejidad de sus experiencias e ignora las necesidades de apoyo emocional y psicológico. Este mito perpetúa la carga desproporcionada de cuidado y crianza sobre las mujeres, exacerbando el estrés y las dificultades emocionales.

Desmitificar la salud mental es esencial para garantizar que las mujeres reciban el apoyo y tratamiento que necesitan. Al comprender las realidades de estas condiciones, podemos crear un entorno más comprensivo y de apoyo para las mujeres.

Consejos para cuidar la salud mental materna

1. *Buscar apoyo social y emocional:* rodearse de familiares, amigos y otras mujeres que hayan pasado por experiencias similares puede ser una fuente de apoyo emocional. La creación de grupos de apoyo y redes de mujeres es fundamental para fortalecer la solidaridad.
2. *Acceder a ayuda profesional:* si las dificultades emocionales persisten o interfieren con la vida cotidiana, es importante buscar la ayuda de un psicólogo o psiquiatra especializado en salud mental materna.
3. *Fomentar la equidad de género:* es necesario abordar las desigualdades de género que impactan negativamente en la salud mental de las mujeres.
4. *Promover la distribución equitativa de las responsabilidades domésticas y de cuidado,* así como el acceso a oportunidades laborales y educativas.

5. *Impulsar el cuidado emocional de madres e hijos para alcanzar su máximo potencial humano.*

■ **Conclusión**

■ El efecto de las alteraciones emocionales maternas sobre la programación en el desarrollo fetal –con repercusiones hasta la adolescencia– varía dependiendo de los momentos del embarazo en el que se presenten; en especial, en el caso de la exposición a diversas situaciones que alteran la salud mental.

Cuidar la salud mental durante la etapa perinatal es esencial para el bienestar de la madre y el desarrollo del bebé. Reconocer y abordar los desafíos emocionales desde una perspectiva de género puede ayudar a prevenir problemas a largo plazo y garantizar una experiencia más positiva en estas etapas. Es necesario un enfoque holístico que considere las desigualdades y promueva la equidad para mejorar la salud mental materna.

Arturo Alejandro Canul Euan

Star Médica Hospital Infantil Privado.
dr.canul.neurodesarrollo@gmail.com

Sandra Martínez Medina

Departamento de Neurobiología del Desarrollo, Instituto Nacional de Perinatología.
sandys65.sm@gmail.com

Blanca Vianey Suárez Rico

Subdirección de Intervenciones Comunitarias, Instituto Nacional de Perinatología.
blancasuarezrico@gmail.com

Lecturas recomendadas

- Babieri, T. (1996), “Los ámbitos de acción de las mujeres”, en Narda Henríquez (ed.), *Encrujiadas del saber: los estudios de género en las ciencias sociales*, Lima, Pontificia Universidad Católica del Perú, pp. 107-132.
- Caparrós González, R. A. (2018), *Consecuencias de la activación del eje hipotalámico-hipofisario-adrenal sobre la salud materno-fetal durante el embarazo, parto y puerperio*, tesis de doctorado, Facultad de Psicología, Universidad de Granada.
- Fernández, I. O. e I. Gainza Tejedor (2007), “La teoría de la programación fetal y el efecto de la ansiedad materna durante el embarazo en el neurodesarrollo infantil”, *Revista de Psiquiatría Infanto-Juvenil*, 24(2, 3 y 4):176-180.
- Tena, O. y M. L. Jiménez (2014), “Algunos malestares en la experiencia de los varones: ¿Podemos ir reflexionando sobre sus derechos sexuales y reproductivos?”, en J. G. Figueroa y A. Salguero (coords.), *¿Y si hablas desde tu ser hombre? Violencia, homoparentalidad y envejecimiento en la experiencia de algunos varones*, México, El Colegio de México, pp. 331-358.
- Unicef (2018), “Cuidado cariñoso y sensible para el desarrollo en la primera infancia”, Informe, Unicef. Disponible en: <https://www.unicef.org/nicaragua/informes/cuidado-cariñoso-y-sensible-para-el-desarrollo-en-la-primera-infancia>, consultado el 31 de octubre de 2024.

Referencias específicas

- Black, M. M., S. P. Walker, L. C. Fernald, C. T. Andersen, A. M. DiGirolamo *et al.* (2017), “Early childhood development coming of age: science through the life course”, *The Lancet*, 389(10 064):77-90.
- Lindsay, K. L., C. Buss, P. D. Wadhwa y S. Entringer (2019), “The interplay between nutrition and stress in pregnancy: implications for fetal programming of brain development”, *Biological Psychiatry*, 85(2):135-149.

Lactancia, un sendero para la inmunidad y el desarrollo del cerebro

Más allá de ser una fuente de nutrición, la lactancia materna es fundamental para la inmunidad y el desarrollo del bebé. Esta práctica no sólo proporciona nutrientes esenciales, sino que también transfiere microorganismos y leucocitos que protegen contra infecciones. Además, estimula el desarrollo neurológico, impactando positivamente en el crecimiento, las habilidades cognitivas y motoras del recién nacido, con beneficios que perduran a lo largo de toda su vida.

¿Qué es la lactancia?

La lactancia es un proceso natural mediante el cual la madre alimenta a su hijo recién nacido con la leche producida por las glándulas mamarias después del parto. Esta leche contiene todos los nutrientes esenciales y óptimos que el bebé necesita para su desarrollo durante los primeros seis meses de vida, por lo que debe ser su única fuente de alimentación en este periodo. Además de su reconocido valor nutricional, la leche materna proporciona factores inmunológicos y **microorganismos comensales** que colonizan el intestino del bebé. Estos elementos trabajan en conjunto y sincronizadamente para proteger al bebé contra patógenos y establecer un equilibrio saludable con alimentos, factores ambientales, así como con los microorganismos que viven en nosotros.

Los beneficios inmediatos de la lactancia son diversos e incluyen la nutrición, digestión, protección y maduración de órganos. De manera impresionante, sus efectos duran toda la vida y proporcionan protección duradera contra enfermedades y, al mismo tiempo, potencian el desarrollo cognitivo, motor y de comunicación (véase la **Figura 1**). De esta manera, la práctica de la lactancia no sólo reduce el riesgo de desarrollar alergias, asma y enfermedades autoinmunes o neurodegenerativas, sino que también fomenta el aprendizaje y las habilidades sociales y motoras.

Microorganismos comensales

Son microorganismos que viven en nuestro cuerpo sin causarnos daño e incluso pueden ser benéficos para su adecuado funcionamiento.



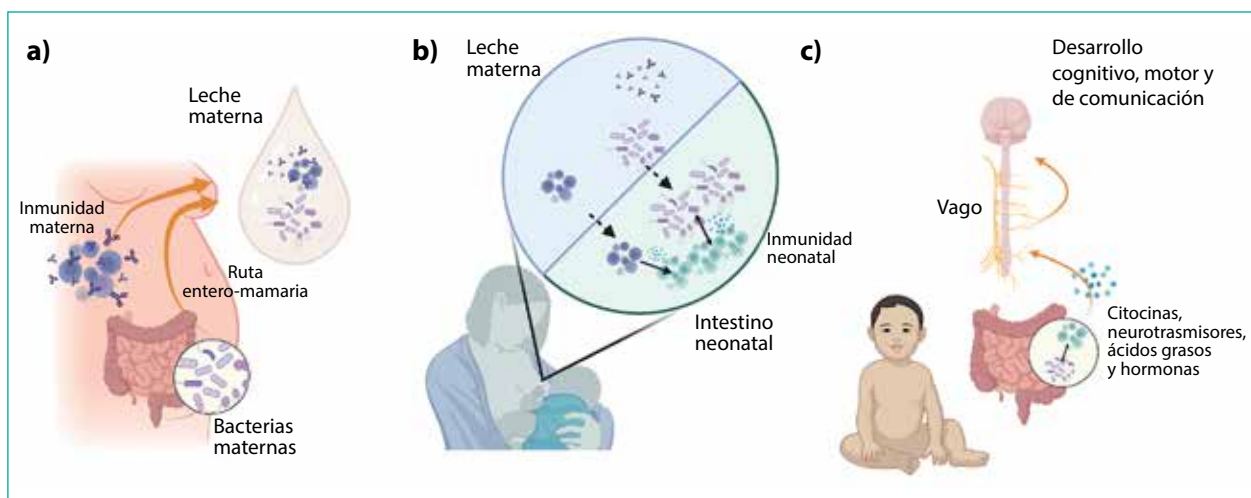


Figura 1. La lactancia como organizador del eje microbiota-respuesta inmune-cerebro neonatal. *a)* La composición de la leche materna depende de la colonización de la microbiota y la inmunidad materna. *b)* La adquisición de leucocitos, inmunoglobulinas y bacterias inocuas de la leche favorece el entrenamiento inmunológico y la copia de una microbiota similar a la que posee la madre. *c)* Las bacterias intestinales interactúan con el sistema inmunológico para comunicarse con el nervio vago, el cual se conecta con el cerebro, regulando diversas respuestas fisiológicas, incluyendo el desarrollo cognitivo, motor y de comunicación.

Versatilidad de la leche materna

Después del nacimiento, existen pocos momentos en la vida en los que el cuerpo humano es programado para responder al entorno futuro. Estos periodos críticos –también conocidos como “ventanas de oportunidad” o “periodos críticos del desarrollo”– están influenciados por los estímulos que el cuerpo recibe a través de la alimentación y el ambiente. Durante los primeros meses de vida, la leche materna desempeña un papel fundamental como uno de estos programadores biológicos. Los componentes presentes en la leche materna condicionan el correcto funcionamiento de sistemas como el intestinal, inmunológico y nervioso, resultando en una adecuada tolerancia a alimentos y **colonización** por la microbiota, una respuesta protectora frente a patógenos y vacunas, así como un óptimo desarrollo neurológico.

A lo largo de este primer periodo de vida, el bebé se enfrenta a múltiples ventanas de oportunidad, por lo que los requerimientos son diferentes en cada una de ellas. La leche materna, como suplemento biológico, se adapta a las necesidades específicas de estas ventanas, cambiando gradualmente en respuesta a las necesidades nutricionales y del desarrollo, así como al estado de salud materna y del bebé. Según el periodo de lactancia, la leche materna evoluciona de

un estado inicial llamado calostro a un estado final conocido como leche madura. El calostro, presente en los primeros 3 a 5 días después del parto, es rico en componentes protectores, pues contiene al menos 250 proteínas inmunológicas, como lactoferrina, lisozima, citocinas y anticuerpos, así como leucocitos maternos; mientras que la leche madura está compuesta principalmente por grasas, carbohidratos y proteínas, y cambia su composición, de una forma inicial más inmunológica, a una más nutritiva.

Sumado a lo anterior, la leche materna también proporciona una diversidad significativa de microorganismos que se convierten en las principales fuentes de colonización para el bebé. Su composición incluye al menos 800 especies bacterianas, entre las cuales las más abundantes son las que no requieren oxígeno para reproducirse, conocidas como bacterias anaeróbicas facultativas o anaeróbicas estrictas. De manera interesante, muchas de estas bacterias son las mismas que habitan en el intestino de la madre y se transfieren desde este órgano al seno materno a través de una ruta conocida como entero-mamaria (véase la **Figura 1a**). Esta transferencia permite “copiar” las bacterias del intestino materno en el bebé, ayudándolo a adaptarse al entorno en el que crecerá (**Figura 1b**).

Colonización
Proceso por el cual los microorganismos se establecen y crecen en un área específica del cuerpo.

¿Cómo protege la leche materna a los bebés?

A lo largo de la vida, las personas acumulan experiencias inmunológicas a través de desafíos naturales (como infecciones) o artificiales (como vacunas) a los que se enfrentan. Estas experiencias son “estudiadas” por leucocitos de larga vida: algunos capaces de producir anticuerpos (linfocitos B), otros capaces de potenciar o inhibir a otros leucocitos (linfocitos T cooperadores), y algunos que inducen la muerte celular (linfocitos citotóxicos). Una vez que se analiza el desafío, estas células responden específicamente al estímulo inicial y permanecen vivas durante años, actuando de manera más rápida, fuerte y especializada ante futuros desafíos. A este fenómeno se le conoce como memoria inmunológica, y se transmite de forma natural a través de la lactancia (Figura 1a).

Durante el periodo en que la leche materna se presenta como calostro, el intestino del bebé permite temporalmente el paso de las células maternas contenidas en ella. Estas células, al ser ingeridas, pueden distribuirse por diferentes órganos del bebé, brindándole la misma protección que la madre ha generado. Como resultado, el bebé no sólo responde a los nuevos desafíos con su propio sistema inmunológico, sino que también se beneficia de las respuestas inmunes proporcionadas por la madre (Figura 1b).

Además de proteger contra patógenos, estas respuestas inmunes también desempeñan un papel selectivo al acompañar a las bacterias comensales heredadas por la madre. Este acompañamiento está mediado por anticuerpos inofensivos y leucocitos tolerantes, que instruyen a otros leucocitos (tanto maternos como del bebé) a no actuar destructivamente contra estas bacterias.

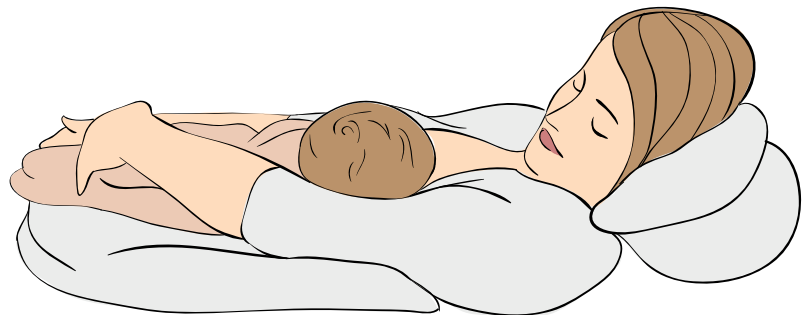
La microbiota intestinal, el sistema inmune y el cerebro: un trabajo en equipo

Una vez completada la transferencia selectiva de componentes inmunes y la colonización intestinal bacteriana a través de la lactancia, la microbiota del bebé contribuye activamente a mantener su estado de salud. Específicamente, la microbiota intestinal desempeña múltiples funciones benéficas: favorece la digestión y la absorción de nutrientes, parti-

cipa en la síntesis de neurotransmisores, hormonas, vitaminas y ácidos grasos. Además, forma una barrera que impide el establecimiento de bacterias patógenas, estimula la producción de moco y enzimas protectoras del intestino, y entrena al sistema inmunológico del bebé para responder contra patógenos. Lo interesante es que este entrenamiento inmunológico también ayuda a tolerar la presencia de ciertas bacterias (inhibiendo mecanismos destructivos), permitiendo su coexistencia y prolongando sus beneficios.

Una vez establecido el vínculo entre la microbiota intestinal y el bebé, el cuerpo está preparado para madurar aceleradamente, siendo el cerebro uno de los órganos más beneficiados por esta cooperación coordinada. Para lograrlo, la microbiota intestinal, a través de los metabolitos que produce, contribuye a mantener la homeostasis del intestino y garantiza el adecuado funcionamiento del sistema inmunológico. Este último, mediante la producción de moléculas llamadas citocinas (con funciones inflamatorias o antiinflamatorias), se comunica con el sistema nervioso intestinal. A su vez, este sistema neuronal está estrechamente conectado con el nervio vago, que establece una comunicación directa con el cerebro. Así, el sistema nervioso entérico y el sistema nervioso central forman un eje denominado intestino-cerebro, que se vincula con los centros emocionales y cognitivos (Figura 1c).

Con todo lo anterior, el adecuado funcionamiento del eje microbiota-sistema inmune-cerebro permite el desarrollo neurológico y psicomotor. En el desarrollo neurológico, se favorecen las conexiones neuronales implicadas en el aprendizaje cognitivo, la atención y la memoria, mientras que en el desarrollo psicomotor se promueve la conciencia corporal, el equilibrio, la coordinación, la adaptación al entor-



no exterior, así como la creatividad y la expresión emocional.

Este vínculo estrecho no es unidireccional, ya que, a partir de las señales que el cerebro recopila de otros órganos, es capaz de regular la permeabilidad intestinal, la señalización entero-endocrina y la activación inmune, mediadas por neurotransmisores, hormonas y citocinas.

Factores que impactan en el establecimiento de la microbiota en el lactante

Es evidente que la salud materna desempeña un papel indispensable en la transferencia de los elementos necesarios para la adecuada colonización de la microbiota a través de la lactancia. En este sentido, el estado nutricional de la madre, su alimentación, su historial de vacunación y sus antecedentes de enfermedades influyen de manera significativa en la composición de la microbiota intestinal que transmitirá a su bebé. Profundizando en este tema, ciertas condiciones maternas, como el sobrepeso, la obesidad, la preeclampsia, la ansiedad y la depresión durante el embarazo, alteran significativamente la composición de las bacterias que serán transmitidas a los hijos, condicionándolos a un desarrollo menos favorable.

Aunque la salud materna desempeña un papel importante en la adecuada colonización de la microbiota, no debemos atribuirle todo el peso. Existen diversos factores a los que está expuesto el bebé y que influyen en el establecimiento de su microbiota intestinal. Algunos de estos factores incluyen la edad gestacional, el tipo de nacimiento, la alimentación exclusiva con leche materna o su complemento con fórmula, la exposición temprana a contaminantes e incluso el uso de antibióticos durante los primeros meses de vida.

El nacimiento prematuro, que ocurre antes de las 37 semanas de gestación, representa un escenario desfavorable para el desarrollo de los sistemas inmunológico, neurológico e intestinal del bebé y, por ende, para las interacciones del eje microbiota-sistema inmune-cerebro. Los bebés prematuros suelen nacer por cesárea y frecuentemente la madre



recibe antibióticos intraparto. Este escenario altera la exposición inicial del bebé a bacterias maternas, ya que en lugar de adquirir bacterias presentes en la cavidad vaginal, es colonizado por bacterias presentes en la piel materna o en el personal y entorno del quirófano; además, el uso de antibióticos intraparto puede disminuir la densidad y diversidad de bacterias maternas transferidas al bebé. La inmadurez del sistema inmunológico de los bebés prematuros los hace más susceptibles a infecciones causadas por bacterias, como la sepsis, la neumonía y la enterocolitis necrosante, de manera que alrededor del 80 % recibe tratamiento con antibióticos durante sus primeras semanas de vida. Incluso la propia inmadurez neurológica del bebé dificulta la deglución adecuada, por lo que en algunos casos la alimentación enteral puede estar contraindicada, retrasando así la lactancia materna. Para subsanar esto, se les puede administrar a los bebés prematuros calostro en los carrillos bucales, incluso en microdosis con goteros, para beneficiarlos de la práctica de la lactancia y ayudar a la maduración y al adecuado establecimiento de la microbiota.

En resumen, alteraciones del eje microbiota-sistema inmune-cerebro en etapas tempranas de la vida pueden conducir a una activación inmune desregulada, producir inflamación sistémica y resultar en el

desarrollo atípico del cerebro, conducir a un desbalance metabólico y desencadenar trastornos en el neurodesarrollo y neuropsiquiátricos, como el trastorno del espectro autista, trastorno de déficit de atención con hiperactividad, esquizofrenia y depresión; así como incrementar el riesgo de sobrepeso y obesidad, alergias y enfermedades inmunes durante la infancia y la edad adulta.

Ejes de acción

Actualmente, en México existen diferentes condiciones de salud desfavorables para la población de mujeres en edad reproductiva. Una de ellas es la obesidad, los partos prematuros y el uso de antibióticos. En relación con ello, se sabe que el 76.8 % de las mujeres mexicanas en edad reproductiva presentan sobrepeso u obesidad, y de ellas sólo el 33.6 % alimenta con lactancia materna exclusiva a sus hijos en los primeros meses de vida; además, la incidencia de partos prematuros es de alrededor del 10 % y se encuentra en ascenso. Aunado a esto, el uso inadecuado e indiscriminado de antibióticos en la población ha incrementado la resistencia a estos medicamentos. En todos estos escenarios, la práctica de la lactancia es capaz de ayudar a mejorar el estado de salud de los infantes, disminuyendo la mortalidad y favoreciendo su adecuado crecimiento, aprendizaje y relación con el entorno. Además, sus beneficios pueden extenderse más allá de las generaciones inmediatas y tener efectos positivos en los descendientes de generaciones futuras.

Conocer la importancia de la lactancia y sus beneficios ayudará a promover la lactancia materna exclusiva, a desarrollar políticas de salud pública que apoyen a las madres lactantes y promuevan prácticas de lactancia saludable, a capacitar a profesionales de la salud para apoyar y aconsejar a las madres sobre la lactancia, a identificar y apoyar a madres con problemas de salud que puedan afectar la calidad de la leche materna y la colonización de la microbiota del bebé, y a fomentar el uso responsable de antibióticos para evitar interferir en el desarrollo de una microbiota intestinal saludable en los bebés; asimismo, comprender la conexión entre la lactancia, la

microbiota y el desarrollo neurológico y psicomotor puede llevar a mejores prácticas de cuidado infantil.

Este escrito ha sido posible gracias al apoyo y financiamiento de los protocolos 2022-1-26, 2024-1-66, 2017-2-61 y 2020-1-25 del Instituto Nacional de Perinatología (INPer), y CF-2023-G-990 y SALUD-2017-02-289734 del Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías (Conahcyt).

Ismael Mancilla Herrera

Subdirección de Investigación Biomédica, Instituto Nacional de Perinatología.

mahi_25803@yahoo.com.mx

Gabriela González Pérez

Departamento de Fisiología y Desarrollo Celular, Instituto Nacional de Perinatología.

gonzalezperez.gabriela@gmail.com

Lecturas recomendadas

Adamczak, A. M., A. Werblińska, M. Jamka y J. Walkowiak (2024), "Maternal-foetal/infant interactions-gut microbiota and immune health", *Biomedicines*, 12(3):490. Disponible en: <<https://doi.org/10.3390/biomedicines12030490>>, consultado el 31 de octubre de 2024.

Bermejo-Haro, M. Y., A. Maldonado-Ibarra, R. T. Camacho-Pacheco, M. A. Nájera-Hernández e I. Mancilla-Herrera (2024), "El microquimerismo y la lactancia: un legado inmunológico perdurable de la madre al hijo", *Perinatología y Reproducción Humana*, 38(1):19-25.

Bermejo-Haro, M. Y., R. T. Camacho-Pacheco, Y. Brito-Pérez e I. Mancilla-Herrera (2023), "The hormonal physiology of immune components in breast milk and their impact on the infant immune response", *Molecular and Cellular Endocrinology*, 572:111956.

González-Rodríguez, R. I., I. Jiménez-Escobar y P. Gutiérrez-Castrellón (2021), "Microbiota de la leche humana y su impacto en la salud humana", *Gaceta Médica de México*, 156(supl. 3):58-66.

González-Pérez, G., A. L. Hicks, T. M. Tekieli, C. M. Radens, B. L. Williams y E. S. Lamousé-Smith (2016), "Maternal antibiotic treatment impacts development of the neonatal intestinal microbiome and antiviral immunity", *Journal of Immunology*, 196(9):3768-3779.

El uso de la inteligencia artificial en la programación fetal

Cada día se conocen nuevos conceptos sobre la fisiopatología de las enfermedades y se proponen nuevas estrategias preventivas o terapéuticas. El concepto de programación fetal (PF) ha estado en constante evolución junto con nuevos avances en distintas áreas del conocimiento. Actualmente, el manejo y análisis de datos mediante inteligencia artificial (IA) ha revolucionado la forma de hacer investigación. En este artículo exploraremos el concepto de PF y su relación con el uso de la IA.

■ **Cómo cambia la IA la forma en que se nos presentan los datos en investigación clínica**

■ La IA está cambiando la forma en la que hacemos investigación en medicina. IA se refiere a la simulación de la inteligencia humana mediante computadoras o programas computacionales especializados creados para “pensar” como un humano y replicar sus acciones, de modo que sea capaz de simular procesos de aprendizaje, razonamiento y autocorrección (Joison *et al.*, 2021). Esto cambia completamente la forma en la que se presentan e interpretan los resultados de una investigación científica. Se puede aplicar al manejo y presentación de datos, a la búsqueda de información, en el muestreo de un estudio, en el reclutamiento de pacientes, e incluso se puede usar para mejorar el diseño de una investigación.

En los últimos años, hemos sido testigos de una evolución significativa de la IA en la medicina, desde las primeras publicaciones donde sus aplicaciones estaban limitadas a procesos básicos de investigación y docencia, hasta ahora, que se utiliza para mejorar todo el proceso de investigación, la aplicación de resultados en la práctica clínica y la simulación de procesos para evitar repetir un fenómeno en incontables ocasiones.

Esta evolución ha sido impulsada por una combinación de mejoras en las capacidades de la IA, el crecimiento exponencial de los datos médicos disponibles y una



creciente aceptación de la tecnología en el campo médico. En resumen, la IA en medicina está permitiendo a los investigadores llevar a cabo simulaciones más detalladas, precisas y eficientes. Ejemplos de estas simulaciones son los entornos de realidad virtual y de realidad aumentada, además de la planeación de cirugías. Esto tiene el potencial de acelerar la investigación, impulsar la industria informática, reducir costos y mejorar la seguridad y eficacia de los nuevos tratamientos.

Progresivamente, la IA ha ido evolucionando hasta convertirse en una de las principales ramas de la ciencia de la computación. Quizá la parte de la IA con aplicaciones más inmediatas se basa en las “redes neuronales artificiales” (ANN, por sus siglas en inglés), que están compuestas por “elementos procesadores” (PE, por sus siglas en inglés), que son una abstracción computacional de las neuronas humanas. Los PE se encuentran organizados por niveles, denominados “capas”. Y es, precisamente, el conjunto de todas estas capas lo que forma una ANN completa (Ávila-Tomás *et al.*, 2020). De esta forma, la IA no sólo logra emular ciertas partes de la inteligencia humana, sino que la supera en cuanto a capacidad de procesamiento y de respuesta en comparación con el cerebro humano. Existen otros métodos de IA que no se encuentran organizados como una ANN, sino que utilizan combinaciones de funciones matemáticas para su funcionamiento; ejemplos de éstos son: las máquinas de soporte vectorial (SVM, por sus siglas en inglés), bosques aleatorios, árboles de decisión, clasificador bayesiano ingenuo, k-vecinos más cercanos, entre otros; todos éstos son ampliamente utilizados en aplicaciones médicas. La **Figura 1** muestra un resumen de todo lo anterior; se sintetizan los tipos de aprendizaje (supervisado, no supervisado, semisupervisado, por reforzamiento), los métodos de clasificación (los mencionados anteriormente), y además se detallan las aplicaciones de la IA en las que se ha trabajado, las cuales son: detección oportuna de preeclampsia y estimación de riesgo de presentar depresión postparto.

La IA ha beneficiado enormemente a la investigación clínica y su aplicación ha contribuido a optimizar tiempos y costos, a mejorar los resultados

obtenidos y a la creación de modelos de predicción mucho más eficientes que los creados con los modelos matemáticos convencionales. Los continuos avances en los nuevos modelos de investigación están permitiendo nuevas visiones en el ámbito de la salud, las cuales pueden contribuir al estudio de las enfermedades, de sistemas de diagnóstico y de respuestas de tratamiento.

Existen numerosos ejemplos de aplicaciones de la IA en investigación médica, ya sea acelerando el ritmo de investigación o ayudando a los sanitarios a mejorar la toma de decisiones sobre tratamientos o diagnósticos; por ejemplo (Joison *et al.*, 2021; Ávila-Tomás *et al.*, 2020; García-López *et al.*, 2023):

- **Detección precoz y diagnóstico de enfermedades:** los modelos IA podrían emplearse para observar los síntomas de los pacientes y alertar a los médicos sobre ciertos riesgos.
- **Diseño de tratamiento personalizado:** los modelos de IA pueden aprender y retener referencias. Este hecho supone un gran potencial ante los tratamientos personalizados en tiempo real.
- **Eficiencia de los ensayos clínicos:** el desarrollo de la tecnología puede ayudar a acelerar el tiempo de los ensayos clínicos, puesto que proporciona una búsqueda más rápida de los códigos médicos asignados a los resultados de los pacientes.
- **Aceleramiento del desarrollo:** la IA podría ayudar a reducir el costo de la generación de nuevos fármacos, ya que es capaz de mejorar el diseño de éstos.
- **Reducción de errores en el diagnóstico por imagen:** actualmente, la IA ya desempeña un papel crucial en el área de las imágenes médicas. La IA es tan eficaz o aún más que la evaluación por medios convencionales para identificar alteraciones en una imagen obtenida por ultrasonido, rayos X, tomografía o resonancia magnética.

■ Sobre la validez de los resultados obtenidos mediante IA y cómo interpretarlos

■ Se han mencionado en los apartados previos las ventajas del uso de IA en investigación en medicina;

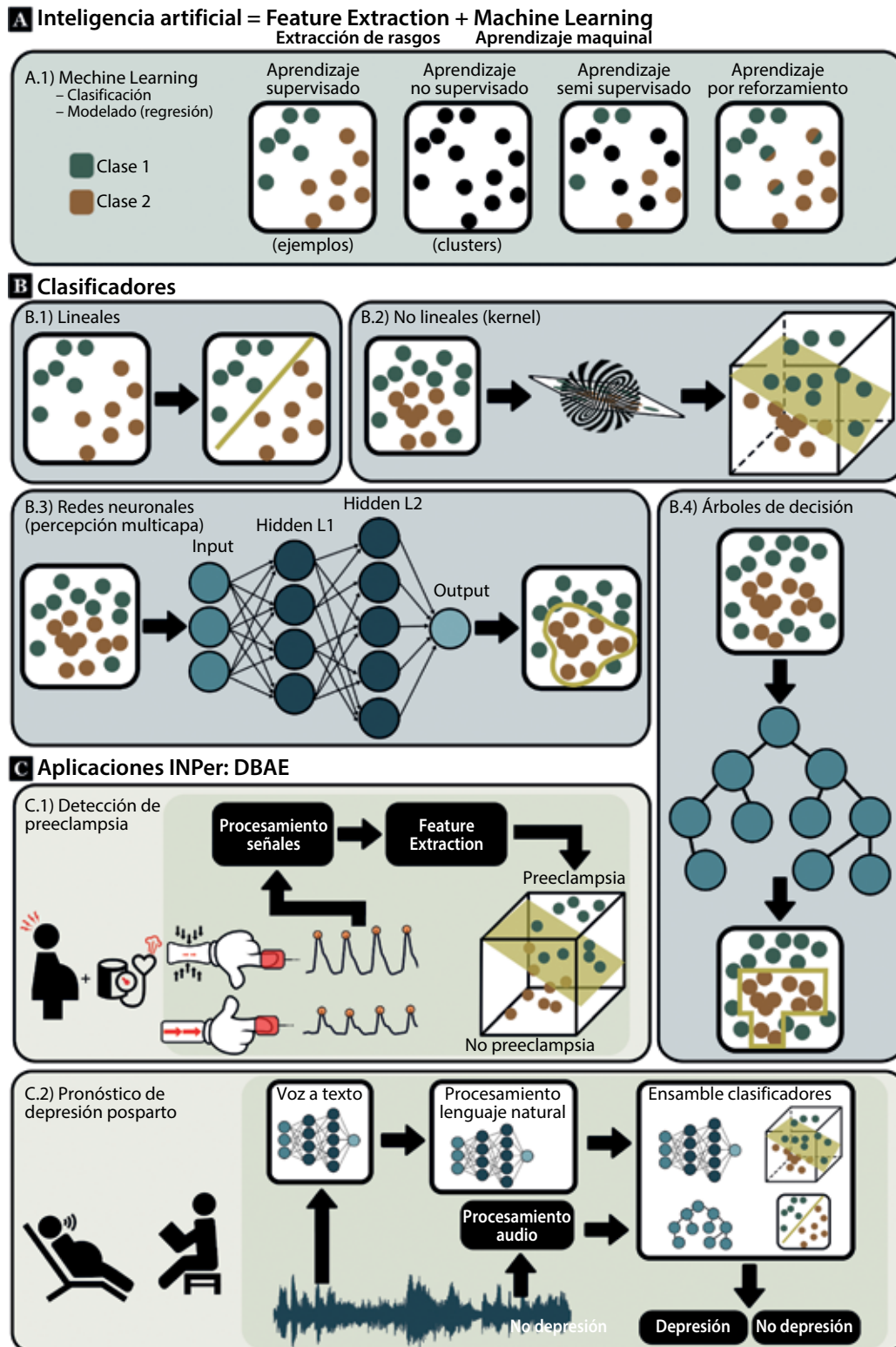


Figura 1. A) Muestra que la IA está compuesta del aprendizaje maquina (*machine learning*) y de la extracción de información o rasgos relevantes (*feature extraction*). Los paradigmas de *machine learning* que existen son: aprendizaje supervisado, aprendizaje no supervisado, aprendizaje semisupervisado y aprendizaje por reforzamiento. **B)** Ejemplos de sistemas aprendizaje supervisado aplicados para la tarea de clasificación: **B.1)** máquinas de soporte vectorial lineales; **B.2)** máquinas de soporte vectorial no lineales (utilizan una función llamada kernel); **B.3)** redes neuronales artificiales, cuando tienen más de tres capas (*hidden layers*), es lo que se conoce como aprendizaje profundo (*deep learning*); **B.4)** árboles de decisión. **C)** Aplicaciones realizadas: **C.1)** predicción de preeclampsia con base en análisis por IA de la morfología de las señales de pulso (obtenido con el método convencional de fotopletimografía, PPG); **C.2)** utilización de métodos de IA para analizar la voz, de modo que, a través de dos mecanismos, el tono y lo que se dice, se pueda predecir si la futura madre tendrá o no depresión posparto.

sin embargo, el uso de estas herramientas tiene algunos detractores que postulan que los escenarios de donde se obtienen los resultados son ficticios y fabricados por un programa computacional que replica los experimentos en múltiples ocasiones para poder llegar a un objetivo, y que los parámetros para generar estos escenarios son modificables por el investigador que está realizando el proceso. Esto es posible sin duda, pero aquí entra la ética en investigación, pues si se manipulan deliberadamente las herramientas de análisis de datos para obtener el resultado deseado, en realidad no es la herramienta la que está fallando, sino el investigador que está realizando el trabajo.

Se ha propuesto que el uso de la IA en investigación puede tener algunos riesgos, entre de los cuales están:

- Daños al proceso de investigación con sesgos en el diseño, reclutamiento, determinación de objetivos o en la obtención de resultados debido a errores en los algoritmos que no tienen una validación adecuada.
- Mal uso de las herramientas de IA, por una malintencionada manipulación del algoritmo.
- Sesgos que perpetúan las desigualdades: cuando existe un error desde el diseño original del protocolo de investigación, como, por ejemplo, en el reclutamiento de pacientes.
- Falta de transparencia: cuando uno “entra” en las tripas del algoritmo sólo encuentra un cúmulo sucesivo de operaciones algebraicas con matrices numéricas, en las que el “entrenamiento” ha modelado una serie de parámetros de las operaciones, pero ninguno explica el resultado final al que se llegó. En otras palabras, muchos modelos de IA son una caja negra en la que no se sabe como se obtienen los resultados a partir de las entradas.
- Privacidad y seguridad: la IA añade un punto de estrés a esta preocupación, pues algunas personas, de forma maliciosa, pueden deducir información valiosa sobre la salud de un individuo para luego comercializarla o usarla de forma indebida.
- Brechas en la responsabilidad: la regulación en el uso de la IA en investigación va muy por detrás

de la tecnología y aún no es capaz de fincar la responsabilidad de un resultado, ya sea del algoritmo, o de la persona que lo utiliza.

- Obstáculos a la aplicación práctica de los algoritmos en el mundo real.

Aplicación de la IA en el estudio de la programación fetal

■ El concepto de programación fetal postula que, como un proceso de adaptación, la nutrición y otros factores ambientales alteran las vías de desarrollo durante el periodo de crecimiento prenatal, y se inducen cambios en el metabolismo y la susceptibilidad de los adultos a enfermedades crónicas como diabetes, síndrome metabólico, enfermedad coronaria, enfermedad renal, entre otras. En este sentido, los modelos basados en IA podrán ayudar a presentar análisis de datos y modelos de predicción que identifiquen elementos agresores en la etapa prenatal para poder identificar a los individuos que tengan mayor riesgo de desarrollar desenlaces crónicos no transmisibles, como diabetes, hipertensión, síndrome metabólico, enfermedad coronaria o renal, entre otras, con la finalidad de realizar estrategias de prevención. Recordemos que cuando hablamos de programación, nos referimos al riesgo o probabilidad de ocurrencia de un evento, pero no de un fenómeno definitivo de causa-efecto; por lo tanto, cuando tenemos el conocimiento de que un individuo tiene un alto riesgo de alguna enfermedad crónica transmisible, se pueden implementar estrategias para reducir o eliminar ese riesgo y evitar que se desarrolle tal desenlace.

El uso de la IA en la programación fetal nos ha dado grandes beneficios en las áreas clínicas y de investigación; por ejemplo, en la predicción del crecimiento que tendrá un feto durante toda la gestación o de cuál será el peso estimado del bebé al momento del nacimiento; en la detección de malformaciones; para determinar la edad real de un feto si no se cuenta con información para poder conocerla; en la identificación, por medio de antecedentes o variables relacionadas con salud metabólica, de la función placentaria e inflamación en el caso de las pacientes que desarrollarán preeclampsia, diabetes o

alguna otra complicación en el embarazo; para poder calcular la composición corporal de un recién nacido y hacer una proyección de cómo se comportará esta variable en los primeros años de vida, y en el análisis de los datos del nacimiento y de los primeros años de vida para identificar a los individuos con un mayor riesgo de presentar alteraciones metabólicas, sobrepeso y obesidad a corto, mediano y largo plazo.

Los primeros algoritmos de IA aplicada en la programación fetal se remontan a principios de este siglo y consistían en la identificación de estructuras fetales por medio de ultrasonido, en la medición automática de biometrías fetales y en la detección de malformaciones fetales por medio de *softwares* especializados. Posteriormente, estas herramientas fueron utilizadas para predecir complicaciones en el embarazo y fue hasta el 2020 cuando se comenzó a usar para predecir desenlaces relacionados con adiposidad, sobrepeso, enfermedades metabólicas en la infancia y adolescencia con base en mediciones de distintas variables al nacimiento, y de esta forma es como comienza su utilidad en el origen perinatal de las enfermedades del adulto.

Por su misma naturaleza, el uso de la IA en los procesos de programación fetal podría tener una aplicación mucho más amplia dado que, en su mayor parte, se trata de procesos de predicción de eventos con aplicación clínica. Imaginemos la utilidad que tendría el poder saber, al nacimiento, cuáles son los individuos que tendrán mayor riesgo de desarrollar diabetes, síndrome metabólico, sobrepeso u obesidad, y de esta forma poder establecer de forma temprana estrategias de prevención para evitar esos desenlaces.

La integración de la IA en la medicina materno-fetal y la obstetricia, y por lo tanto en la programación fetal, tiene el potencial de mejorar significativamente los resultados de un embarazo a corto, mediano y largo plazo, además de aumentar la eficiencia de la asistencia en salud y los planes de atención individualizada para cada paciente. A medida que evolucione la tecnología, es probable que los algoritmos de IA se vuelvan aún más sofisticados. Sin embargo, para implementar con éxito la IA en la medicina materno-fetal y la obstetricia, es necesario ir resolviendo du-



das con respecto a la interpretabilidad y fiabilidad de estas herramientas.

Consideraciones éticas y sociales del uso de análisis y herramientas de IA en programación fetal

En realidad, existe poca reglamentación en relación con el uso de la IA en investigación en general, y prácticamente ninguna en relación con la aplicación de herramientas de IA en investigación sobre programación fetal. En 2019 la Unión Europea publicó las *Directrices éticas para una IA fiable*, que tenían como objetivo promover el uso de herramientas de IA en investigación en salud, de forma confiable y responsable por parte de los investigadores.

Estos objetivos se pueden conseguir si su uso se sustenta en tres componentes de la IA: a) debe ser lícita, es decir, cumplir todas las leyes y reglamentos aplicables; b) debe ser ética, de modo que se garantice el respeto de los principios y valores éticos, y c) debe ser robusta, tanto desde el punto de vista técnico como social, con la cantidad de datos suficiente para realizar una inferencia.

En este escenario, la heterogeneidad de los datos médicos, el volumen, su complejidad, la interpretación de un médico y los análisis de sensibilidad y de especificidad deben ser tomados en cuenta cuando

se aplican sistemas de aprendizaje automático en el proceso de investigación. Previo a su publicación, se tienen que revisar los datos para, además de asegurar que son matemáticamente correctos, verificar su plausibilidad biológica para poder realizar una inferencia (García-López *et al.*, 2023).³

Futuro de los análisis y herramientas de IA en el estudio de la programación fetal

La IA presenta un gran potencial en el ramo materno fetal y ginecológico, ya que puede prever condiciones de morbilidad materno-fetal y, por tanto, puede aportar mucho en el estudio del origen perinatal de las enfermedades del adulto. El futuro en relación con el uso de la IA en la programación fetal va encaminado a la predicción y diagnóstico, desde etapas muy tempranas de la vida, de enfermedades que un individuo tiene mayor riesgo de desarrollar en el futuro, y así prevenir que se presenten condiciones patológicas. De esta forma, en realidad se le podrá dar a la IA una verdadera aplicación clínica y lograr un cambio en la salud de la población, consiguiendo la reducción de la prevalencia de las enfermedades crónicas no transmisibles, que siguen incrementándose en todo el mundo y particularmente en países en vías de desarrollo como México (Pacheco *et al.*, 2023).

Modelos en animales han demostrado que los efectos de una agresión, o un medio ambiente adverso durante la gestación, dan como resultado cambios epigenéticos y, por lo tanto, enfermedades que pueden ser transgeneracionales; es decir, que el individuo heredará a su progenie como factor de riesgo, perpetuando un ciclo en el que las enfermedades crónicas no transmisibles siguen incrementando su presencia en la población.

La IA podría ser de gran utilidad para identificar o clasificar, mediante modelos predictivos, cuáles son los cambios epigenéticos que podrían heredarse y así identificar a la población con alto riesgo de desarrollar alguna enfermedad en particular. De esta

forma podríamos determinar los factores agresores o programadores que solamente tendrán un efecto en el individuo que se está gestando y cuáles podrían ser heredados a las siguientes generaciones, conociendo así la gravedad, para evitar la exposición a dichos factores y tener un impacto en la prevalencia de estas enfermedades metabólicas.

Héctor Borboa-Olivares

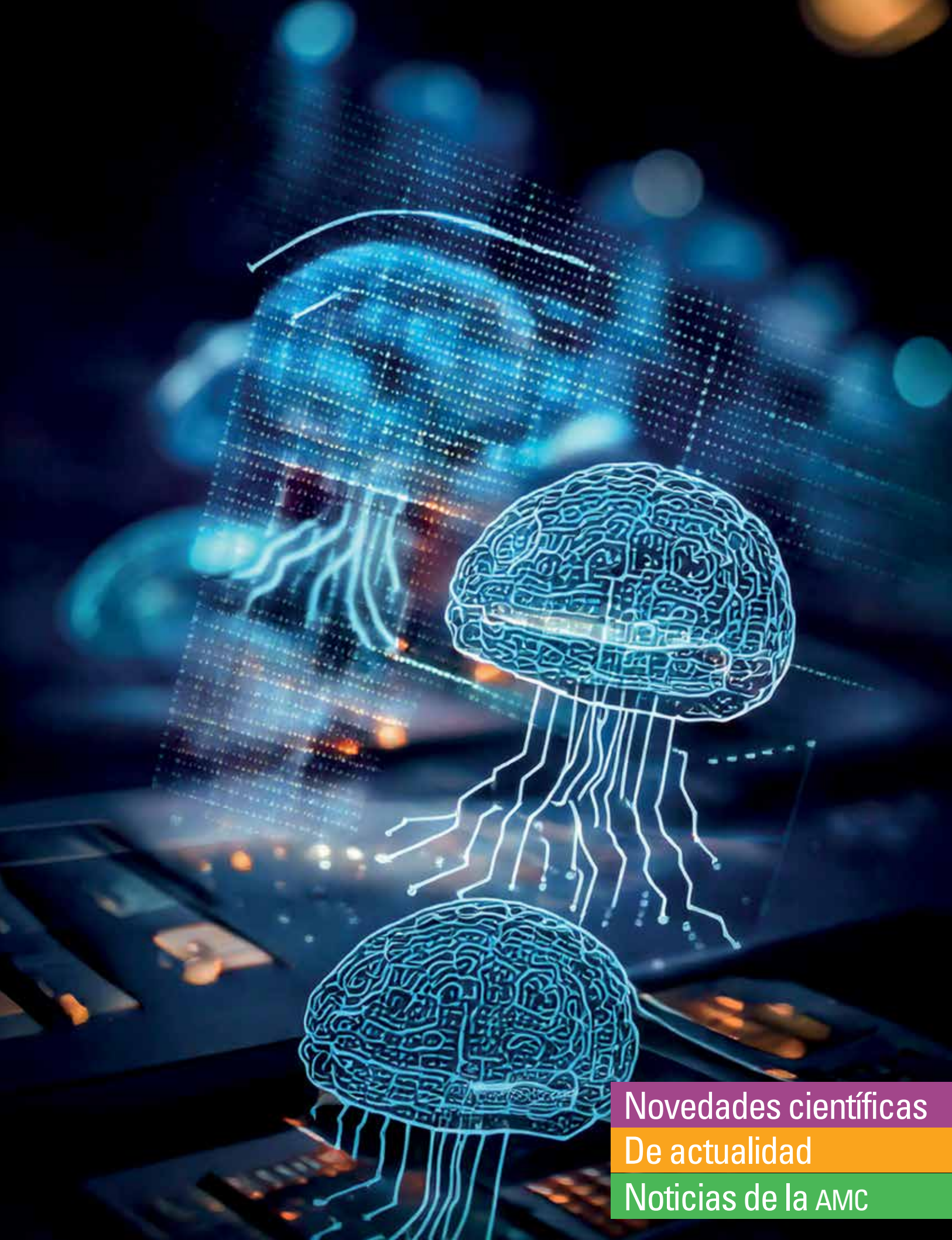
Subdirección de Investigación en Intervenciones Comunitarias, Instituto Nacional de Perinatología.
drhectorborboa@gmail.com

Omar Piña-Ramírez

Departamento de Bioinformática y Análisis Estadístico, Instituto Nacional de Perinatología.
omar.pina@inper.gob.mx

Referencias específicas

- Ávila-Tomás, F., M. A. Mayer-Pujadas, V. J. Quesada-Varela (2020), "La inteligencia artificial y sus aplicaciones en medicina I: introducción, antecedentes a la IA y robótica", *Atención Primaria*, 52(10):778-784. Disponible en: <<https://www.elsevier.es/es-revista-atencion-primaria-27-pdf-S0212656720301451>>, consultado el 1 de noviembre de 2024.
- García-López, A., F. Girón-Luque y D. Rosselli (2023), "La integración de la inteligencia artificial en la atención médica: desafíos éticos y de implementación", *Universitas Médica*, 674(3). Disponible en: <<https://revistas.javeriana.edu.co/index.php/vnimedica/article/view/36231>>, consultado el 1 de noviembre de 2024.
- Joison, N., R. J. Barcudi, E. A. Majul, S. A. Ruffino y J. J. De Mateo Rey (2021), "La inteligencia artificial en la educación médica y la predicción en salud", *Revista Methodo*, Universidad Católica de Córdoba.
- Pacheco, J., I. Sandoval Díaz y J. Ramos-Castillo (2023), "Inteligencia artificial en la práctica de la ginecología, la investigación y redacción científica", *Revista Peruana de Ginecología y Obstetricia*, 69(4). Disponible en: <<https://doi.org/10.31403/rpgo.v69i2566>>, consultado el 1 de noviembre de 2024.



Novedades científicas
De actualidad
Noticias de la AMC

Los musgos: bioindicadores de la salud del ecosistema

Los musgos son un grupo muy diverso de plantas que ofrecen grandes servicios ambientales a pesar de su sencillez estructural, por lo que en el presente artículo se hace hincapié en los procesos ecológicos en los que intervienen, así como en los usos y aplicaciones que el hombre les ha dado.

Introducción

Las briofitas son uno de los tres grupos que componen la línea evolutiva de plantas terrestres. Junto con las hepáticas (*Marchantiophyta*) y los antoceros (*Anthocerotophyta*), los musgos (*Bryophyta sensu stricto*) conforman una colección de aproximadamente 20 000 especies hasta ahora descritas en el mundo (de 5 000 a 6 000 de hepáticas, 200 a 215 de antoceros y 12 900 a 13 000 de musgos). Esta gran diversidad las coloca como el segundo grupo más diverso de plantas terrestres, sólo después de las plantas con flor (Goffinet y Shaw, 2009; Horn *et al.*, 2021, Delgadillo-Moya *et al.*, 2022).

En México se conoce que existen cerca de 1 613 especies de briofitas, de las cuales 11.4 % son endémicas; es decir, sólo están presentes en el territorio mexicano. En esa diversidad mexicana, los musgos son los más diversos, ya que actualmente se conocen cerca de 1 000 especies y variedades (Delgadillo-Moya, 2022 y Delgadillo-Moya *et al.*, 2022).

Una vida adaptada al medio terrestre

Las briofitas son un grupo de plantas morfológicamente heterogéneo que comparten la ausencia de **tejido vascular** y un ciclo de vida claramente dividido en dos fases multicelulares: una fase de larga duración, independiente por su alta actividad fotosintética y haploide (un juego de cromosomas), conocida como gametofito, y otra diploide (dos juegos de cromosomas), dependiente del gametofito y de vida corta, denominada esporofito (véase la **Figura 1**) (Glime, 2017).

En la vida de un musgo el esporofito es el responsable de liberar cientos de diminutas esporas haploides que se dispersan por el viento y al encontrar condicio-

Tejido vascular

Conjunto de células especializadas en el transporte de agua, nutrientes y otras sustancias a todo el cuerpo de una planta.





Figura 1. Los musgos son pequeñas plantas verdes que se agrupan formando una alfombra suave y densa. Su cuerpo está conformado por una fase frondosa y otra alargada y delgada que sostiene una cápsula con esporas en la punta.

nes favorables de humedad, germinarán produciendo una hilera o lámina de células llamada protonema. Durante su crecimiento, el protonema se fijará al suelo mediante pequeñas proyecciones denominadas rizoides y, con el paso del tiempo, formará al gametofito o musgo. Numerosas y pequeñas proyecciones verdes, fotosintéticas y en forma de hoja (filidios), se disponen alrededor de una estructura similar a un tallo (caulidio) y conforman el cuerpo de un musgo típico. Este cuerpo fotosintético se mantiene activo mediante intercambios directos de agua y minerales con la atmósfera. Muchas especies carecen de tejidos internos de conducción, como el xilema y floema de los helechos o las plantas con flor; pero en otras, como los musgos del género *Polytrichum*, existen células especiales denominadas hidroides y leptoides, que permiten la conducción interna de agua y otros compuestos. El gametofito crecerá lentamente y será el encargado de producir células sexuales en órganos reproductores masculinos (anteridios) o femeninos (arquegonios). En la época de lluvias, o cuando hay una fina capa de agua, las células masculinas nadarán y se fusionarán con las célu-

las femeninas inmóviles, y tras la fecundación formarán un embrión sostenido y nutrido por el gametofito, que al crecer constituirá una nueva generación esporofítica y productora de esporas (Glime, 2017).

La alternancia de estas dos generaciones multicelulares en el ciclo de vida, la formación de un embrión y numerosas adaptaciones celulares y fisiológicas han permitido que estas plantas y sus antecesores viviesen fuera del agua, pero siempre bajo condiciones de alta humedad, como las que presentan los ambientes en las orillas de ríos, bordes de lagos y zonas de alta precipitación fluvial, por mencionar sólo unos ejemplos (Goffinet y Shaw, 2009).

Funciones trascendentes para plantas diminutas

 Los musgos, y en general todas las briofitas, son plantas que en su mayoría no rebasan los 10-15 cm de altura y quizás por ello a veces pasan desapercibidas o sólo son visibles como una alfombra verde que llega a cubrir el suelo, las rocas y troncos de un bosque. Estas pequeñas y sencillas plantas crecen muy lentamente, a veces uno o dos milímetros por

año. Prosperan en zonas húmedas que se ubican desde el nivel del mar hasta altitudes superiores a los 4000 m, aunque también hay especies que se han adaptado a hábitats secos y algunas otras son acuáticas, pero nunca crecerán en zonas marinas (Glime, 2017; Delgadillo-Moya *et al.*, 2022).

En los diferentes ecosistemas e incluso en zonas urbanas, los musgos crecen formando diminutas colonias sobre una gran variedad de sustratos en los que difícilmente otras plantas podrían hacerlo. Se les puede encontrar sobre suelo o sustratos inertes como rocas, paredes, techos, ladrillos, orillas de ríos, o creciendo sobre otros seres vivos, como troncos, ramas u hojas de otras plantas, en cuyo caso se denominan epífitas (véase la **Figura 2**) (Goffinet y Shaw, 2009; Glime, 2017). Su capacidad para sobrevivir en ambientes adversos les ha permitido ser una de las primeras plantas en colonizar superficies rocosas, especialmente en sitios alterados por el fuego o en áreas con perturbaciones ambientales; a algunas otras

les ha permitido permanecer deshidratadas por algún tiempo, a veces años, resucitando y recuperando su vigor rápidamente después de ser hidratadas de nuevo (Hernández-Rodríguez y Delgadillo-Moya, 2021).

Al conformar pequeños tapetes verdes, fijan dióxido de carbono (CO_2) y liberan oxígeno, por lo que son una parte basal e importante de las **cadenas tróficas** y del ciclo de energía que mantiene vivos a los ecosistemas. Pero, además, las colonias de musgo ayudan a retener el suelo evitando su erosión, y en tiempos de lluvia pueden acumular hasta 20 veces su propio peso en agua, lo que las convierte en verdaderas esponjas vivientes y transcendentales en el balance hídrico de los bosques (véase la **Figura 3**). De esta manera, si los tapetes o alfombras de musgos se eliminan del bosque, no habrá quién absorba el exceso de agua y retenga los nutrientes y minerales disueltos en ella, por lo que se perderán y aumentará su lavado hacia ríos y mares (Goffinet y Shaw, 2009; Glime, 2017).

Cadenas tróficas

Secuencias que muestran la transferencia de energía y nutrientes a través de los seres vivos que conforman un ecosistema.



Figura 2. Al ser plantas epífitas, los musgos se desarrollan sobre troncos, donde se fijarán para una mejor obtención de los nutrientes disponibles en el aire.



Figura 3. La diversidad de especies en los tapetes del bosque se manifiesta en las variadas tonalidades de verde y alturas de las colonias de musgos; en conjunto, todas ellas ayudan a retener la humedad y a estabilizar el suelo.

Al acumular agua y nutrientes, los musgos acondicionan el suelo para que otros organismos se establezcan; es decir, son microhábitats donde prosperan insectos, arañas, moluscos, lombrices, y por lo mismo son excelentes microgerminadores de semillas, facilitando el establecimiento de plantas superiores como pinos, encinos y abetos, entre otras (Goffinet y Shaw, 2009; Glime, 2017).

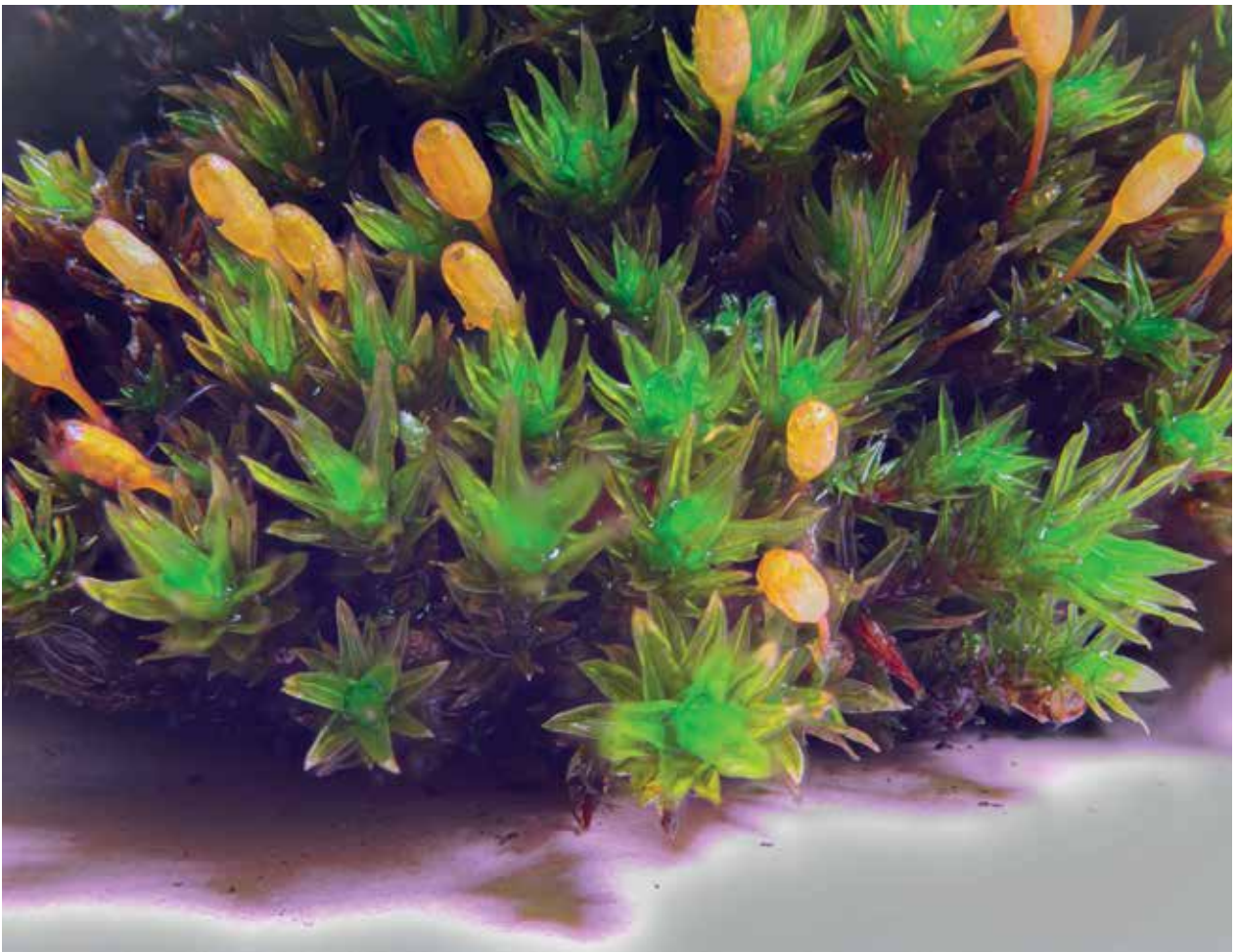
Monitores del ambiente

Los musgos carecen de una cubierta impermeable sobre su cuerpo y adquieren el agua y los nutrientes directamente de la atmósfera. Por la misma razón, no pueden controlar la pérdida de agua si el ambiente es muy seco, pero tampoco la incorporación en sus células de algunos iones o metales pesados como cobre, plomo, cadmio y zinc (Glime, 2017).

Cada especie tiene un nivel de sensibilidad y capacidad de resistir las adversidades del ambiente. Por eso algunos musgos pueden crecer incluso en ambientes muy contaminados, como las ciudades, mientras que otras desaparecerán debido a que no pueden tolerar el aumento de temperatura, la falta de humedad o la contaminación que prevalece en los centros urbanos. Gracias a esto, la presencia, el estado o la ausencia de ciertas especies aporta información sobre la calidad del ambiente, por lo que pueden usarse como bioindicadores de la salud del ecosistema, del aire y del suelo (Goffinet y Shaw, 2009).

De sus usos y oportunidades

Aunque no hay muchos estudios, la etnobiología nos dice que alrededor del mundo existen cerca de 150 especies de briofitas utilizadas para beneficio humano



(Harris, 2008). Muchas de ellas se usan como plantas medicinales debido a que producen compuestos colectivamente conocidos como metabolitos secundarios, que inhiben el crecimiento de algunos microorganismos, por lo cual son utilizados como antisépticos o antibióticos (Horn *et al.*, 2021), pero también pueden emplearse como parte de techos de las casas, camastros, almohadas, gorros o como elementos ornamentales y ceremoniales (Delgadillo-Moya *et al.*, 2022).

En México, el uso de los musgos data de la época de la Colonia, cuando se usaban para tratar algunas enfermedades de la población azteca. Un análisis reciente indica que en el territorio mexicano se usan al menos 36 especies de musgos. Al parecer el uso principal es el ceremonial durante la época navideña, donde se recolectan especies como *Hypnum amabile*, *Thuidium delicatulum*, *Bryum procerum*, así como de los géneros *Campylopus*, *Leptodontium* y *Polytrichum*,

que son apreciados principalmente por su color intenso, gran abundancia y tamaño relativamente grande. Pero también se reporta el uso de otros géneros como, por ejemplo, *Dendropogonella rufescens*, que se emplea en construcción de techos, camastros, así como en la elaboración de lechos, almohadas y gorros. Especies de los géneros *Campylopus*, *Dicranum*, *Hypnum*, *Herzogiella* y *Thuidium* se usan como elementos ornamentales en jardines y para elaborar macetas con árboles bonsái. *Braunia secunda*, *Pleurochaete squarrosa*, *Sematophyllum adnatum* se emplean como medicinales para el dolor de cabeza y estómago, respectivamente (Hernández-Rodríguez y Delgadillo-Moya, 2021; Delgadillo-Moya *et al.*, 2022).

De todos los musgos, *Sphagnum* es el que tiene un mayor número de usos ya que se emplea para germinar semillas, como material de empaque, relleno y aislante, para preparar vendajes quirúrgicos y para



producir Sphagnol, un compuesto químico que se utiliza para tratar algunas enfermedades de la piel y las picaduras de insectos. El Sphagnol es un ejemplo de que los musgos pueden ofrecer importantes beneficios para la salud y el bienestar humanos.

Por otra parte, las briofitas han sido poco estudiadas y utilizadas para la elaboración de productos naturales; no obstante, la identificación de productos químicos en ellas tiene un alto potencial para la explotación biotecnológica, como lo demuestran algunos reportes de otras partes del mundo (Horn *et al.*, 2021; Delgadillo-Moya *et al.*, 2022).

Las hermosas alfombras verdes que forman las colonias de musgos en los bosques templados de México atraen a numerosos recolectores que en la temporada navideña cosechan grandes cantidades para venderlos, sin recapacitar que tardaran varios decenios en recuperarse. En algunos estados de México, como el Estado de México, Michoacán y Tlaxcala (Acatitla *et al.*, 2020), se han calculado extracciones de varias decenas de toneladas de musgo fresco tan sólo en una temporada. Si bien esta extracción de musgo es el resultado de una tradición cultural religiosa que llegó a Latinoamérica con los españoles en la época de la Conquista (Acatitla *et al.*, 2020), sus efectos son profundamente negativos para el ecosistema, ya que además de amenazar la diversidad y las poblaciones de musgos, con ella se evita la continuidad de los procesos ecológicos en los que ellos participan y que nos benefician directamente a todos.

En México no existe una ley que prohíba la recolecta de musgos, pero de acuerdo con el Diario Oficial de la Federación su recolecta debe ser autorizada por la Secretaría del Medio Ambiente y se deben atender las medidas establecidas en el proyecto de norma PROY-NOM-005-Semarnat-2012, donde se indica claramente:

el musgo se debe aprovechar en manchones o franjas de 2 metros de ancho como máximo, siguiendo el contorno del terreno, y extrayendo, como máximo, el 50 % de las existencias en cada sitio aprovechado, para asegurar su regeneración. No se podrá aprovechar el mismo sitio hasta que se haya recuperado completamente. (DOF, 2012)

A pesar de estas medidas, la recolección indiscriminada continúa. Junto con la destrucción y pérdida de sus hábitats, esto constituye la principal amenaza que enfrentan las poblaciones naturales de briofitas, por lo que es necesario tomar medidas inmediatas para su conservación.

Es esencial desarrollar más investigación sobre la diversidad, biología, estado de conservación, amenazas y potencial utilitario de las poblaciones de musgos, y en general de todas las briofitas, lo cual permitirá establecer políticas y leyes que protejan a las especies y sus hábitats, así como la creación e imple-



Figura 4. Evitemos la pérdida de las alfombras verdes de los ecosistemas, compremos conscientemente y protejamos los musgos de nuestro entorno.

mentación de programas de manejo sustentable que eviten y regulen de forma efectiva la extracción excesiva. Pero, para que los programas de conservación funcionen, es prioritario que se disuada a la población de la compra de musgos y que se difunda entre el público en general el valor y la función ecológica de los musgos (véase la **Figura 4**). La educación a diferentes niveles, a través de talleres, conferencias, redes sociales, blogs, contenidos audiovisuales, diseños de infografías y carteles, así como de exposiciones y recorridos de campo podría generar y aumentar una conciencia ecológica entre la población que favorezca el cuidado de estas plantas, de su hábitat, de los beneficios que nos aportan y de la importancia de hacer compras informadas y responsables.

María Isabel Agustín Jiménez

Universidad Autónoma del Estado de México.
magustinj001@alumno.uaemex.mx

Carmen Zepeda Gómez

Universidad Autónoma del Estado de México.
zepedac@uaemex.mx

Javier Manjarrez

Universidad Autónoma del Estado de México.
jsilva@uaemex.mx

Referencias específicas

- Acatitla, O., C. Villamil y J. L. Martínez (2020), "La importancia comercial de los musgos en el estado de Tlaxcala, México", *Madera y Bosques*, 26(3):1-11.
- Delgadillo-Moya, C. (2022), "Cincuenta años de briología en México", *Botanical Sciences*, 100(2):263-273.
- Delgadillo-Moya, C., D. A. Escolástico, E. Hernández-Rodríguez, P. Herrera-Paniagua, P. Peña-Retes y C. Juárez-Martínez (2022), *Manual de briofitas*, México, Instituto de Biología, UNAM.
- Diario Oficial de la Federación (DOF) (2012), Proyecto de Norma Oficial Mexicana PROY-NOM-005-Semarnat-2012, Gobierno de México. Disponible en: <https://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5261563&fecha=30/07/2012&print=true>, consultado el 4 de noviembre de 2024.
- Glime, J. M. (2017), "Meet the Bryophytes. Chapt. 2-1", en J. M. Glime, *Bryophyte Ecology*. vol. 1: Physiological Ecology [eBook], Michigan Technological University e International Association of Bryologists. Disponible en: <<https://digitalcommons.mtu.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1001&context=bryo-ecol-subchapters>>, consultado el 4 de noviembre de 2024.
- Goffinet, B. y A. J. Shaw (2009), *Bryophyte Biology*, Nueva York, Cambridge University Press.
- Harris, E. S. J. (2008), "Ethnobotany: traditional uses and folk classification of bryophytes", *The Bryologist*, 111:169-217.
- Hernández-Rodríguez, E. y C. Delgadillo-Moya (2021), "The ethnobotany of bryophytes in Mexico", *Botanical Sciences*, 99(1):13-27.
- Horn, A., A. Pascal, I. Lončarević, R. Volpatto Marques, Y. Lu *et al.* (2021), "Natural products from bryophytes: from basic biology to biotechnological applications", *Critical Reviews in Plant Sciences*, 40(3):191-217.

Las neuronas artificiales y su papel central en la inteligencia artificial

Una de las grandes tendencias de los dos últimos años, con merecida razón, ha sido la inteligencia artificial. Dos de los conceptos fundamentales sobre los cuales están creados casi todos los sistemas a los que hoy damos este nombre son las neuronas artificiales (más específicamente, los denominados *perceptrón*) y las redes neuronales (los *perceptrones multicapa*). Nuestra motivación al escribir este artículo es revisar estos conceptos, explicándolos en su papel de modelos básicos en el desarrollo de la inteligencia artificial. Sin entrar en detalles técnicos, también consideramos cómo el comportamiento “inteligente” que observamos como resultado de estas estructuras está basado en procesos de optimización combinatoria.

Introducción

Este artículo ofrece una introducción al perceptrón como estructura básica de la inteligencia artificial (que en adelante denotaremos con IA). El público principal al que está dirigido es a estudiantes de carreras relacionadas con matemáticas o computación. Aunque para comprender algunos conceptos se recomienda tener conocimientos de cálculo, álgebra lineal y probabilidad, buscamos que la mayor parte del contenido fuera accesible aun para estudiantes de bachillerato. Presentamos los diversos temas que abordamos primero en lenguaje coloquial e intuitivo, y después con un cierto rigor matemático. Al final del texto aparecen referencias para quienes deseen profundizar en algunos de los temas.

Iniciaremos presentando el *perceptrón* como fundamento de muchas tecnologías fundamentales de la IA. Pero, como veremos, éste tiene límites claros en su funcionamiento. Una vez que abordemos estos límites, explicaremos las particularidades del *perceptrón multicapa*, también conocido como *red neuronal* debido a su relevancia en el desarrollo de aplicaciones de clasificación más complejas.

La IA abarca áreas de gran actualidad, como la ciencia de datos, el aprendizaje automático y el procesamiento del lenguaje natural, entre otras. Resaltamos la



importancia de entender la matemática subyacente, buscando no usarla ciegamente o como mero formalismo. Las técnicas en IA emulan funciones biológicas y naturales, aunque no son capaces de pensar ni son, bajo ningún concepto, inteligentes. En esencia, la IA es una metodología que nos sirve para resolver problemas de optimización combinatoria. Estos problemas buscan reducir el espacio de búsqueda cuando el número de opciones es abrumadoramente grande. Considérese, por ejemplo, un juego de ajedrez: profundizamos más buscando las posibles jugadas derivadas de decisiones que nos signifiquen una ventaja medible inmediatamente (como prever lo que seguirá a capturar la reina del contrincante), al mismo tiempo que descartamos acciones que nos resulten claramente desventajosas (poner a nuestra reina en una posición vulnerable sin obtener ventaja alguna por ello), ahorrándonos considerar todas las derivaciones de dichas acciones.

■ Comenzando por el principio: el perceptrón sencillo

■ Santiago Ramón y Cajal, precursor de la neurociencia, postuló en el siglo XIX la “teoría de la neurona”, indicando que las neuronas son unidades discretas (esto es, una gran cantidad de estructuras con apro-

ximadamente el mismo funcionamiento en cada una de ellas), basada en conexiones sinápticas. Posteriormente, el modelo de Hodgkin-Huxley en la década de 1950 detalló cómo las señales eléctricas viajan por las neuronas, lo que les valió ser reconocidos con el premio Nobel de medicina en 1963. McCulloch y Pitts adoptaron las ideas de Ramón y Cajal en 1943, adecuándolas de conformidad con el modelo de Hodgkin-Huxley, y modelaron la primera *neurona artificial* en 1957.

Una neurona artificial, a la cual la literatura especializada denomina *perceptrón*, representa un modelo simplificado de neuronas cerebrales. No se derivó directamente de estudios neurológicos, sino de nociones básicas sobre neuronas y necesidades de computación.

Los perceptrones adoptan la idea de recibir múltiples entradas, procesarlas por cada una de sus terminales de entrada (*dendritas*) y generar una salida (Rosenblatt, 1958). Sin embargo, estas representaciones son simplificadas en comparación con las neuronas biológicas, como se muestra en la **Figura 1**.

Los primeros modelos artificiales surgieron en los años cuarenta y cincuenta, con representaciones binarias de neuronas (McCulloch y Pitts, 1943). El perceptrón mejoró esta idea, introduciendo **pesos** en las entradas, lo que permite variar el impacto que

■ Pesos

Factor multiplicativo que se da a la salida de cada perceptrón, modulando el impacto que tiene en el resultado global.

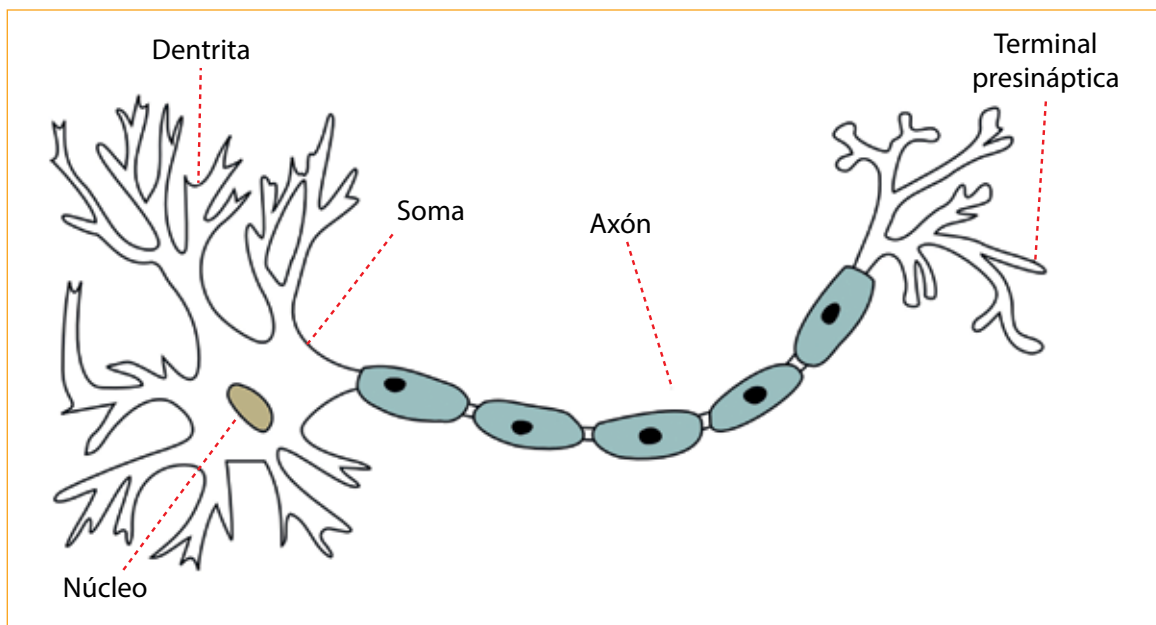


Figura 1. Una neurona biológica.

tiene cada una de ellas en el resultado obtenido. Como veremos en breve, el perceptrón, como fue planteado originalmente, tenía restricciones, como la de no poder resolver problemas que no fueran linealmente separables.

En la **Figura 2** se presenta el modelo básico de neurona artificial. Según Rosenblatt, una neurona artificial toma entradas, las pondera con pesos y genera una salida considerando un sesgo y una función de activación:

$$y = \sigma \left(\sum_{i=1}^n w_i x_i + b \right)$$

Un avance significativo en la evolución de las neuronas artificiales surgió con el desarrollo del algoritmo de *retropropagación* en los años ochenta (Rumelhart, Hinton y Williams, 1986). El método de retropropagación se basa en el modelo previamente descrito, donde las entradas se ponderan, suman y aplican a una función de activación, permitiendo entrenar redes multicapa y superar las limitaciones del perceptrón.

Más allá de obtener un 0 o un 1: las funciones de activación

Los primeros perceptrones entregaban como respuesta únicamente un valor binario, y la función de

activación era simplemente un umbral; si la suma de todas las entradas ponderadas por los pesos resultaba mayor al umbral, el perceptrón se *encendía* (1); y en caso contrario, permanecía *apagado* (0). Sin embargo, el poder entregar una respuesta sobre un *rango* (o incluso un *continuo*) de valores permite modelar mucho mejor las soluciones a problemas de clasificación. Es por esto que comenzaron a utilizarse diversas funciones de activación. La **Figura 3** presenta algunos ejemplos de funciones frecuentemente utilizadas.

Las funciones de activación en un perceptrón (o cualquier otra red neuronal) juegan un papel crucial en la capacidad del modelo para representar y resolver problemas no lineales. Dichos problemas pueden implicar aquellos donde las coordenadas que generan salidas de *prendido* y *apagado* puedan ser explicadas con una división sobre el plano con una línea recta. Algunas razones para elegir funciones de activación son:

1. **Introducen no linealidad:** un perceptrón sin función de activación es lineal. Las funciones de activación permiten representar relaciones más complejas.
2. **Limitan la transformación:** algunas, como la sigmoide, limitan los valores de activación (puede apreciarse en la **Figura 3(a)**, en que la entrada sobre x puede ser arbitrariamente grande, pero la salida se

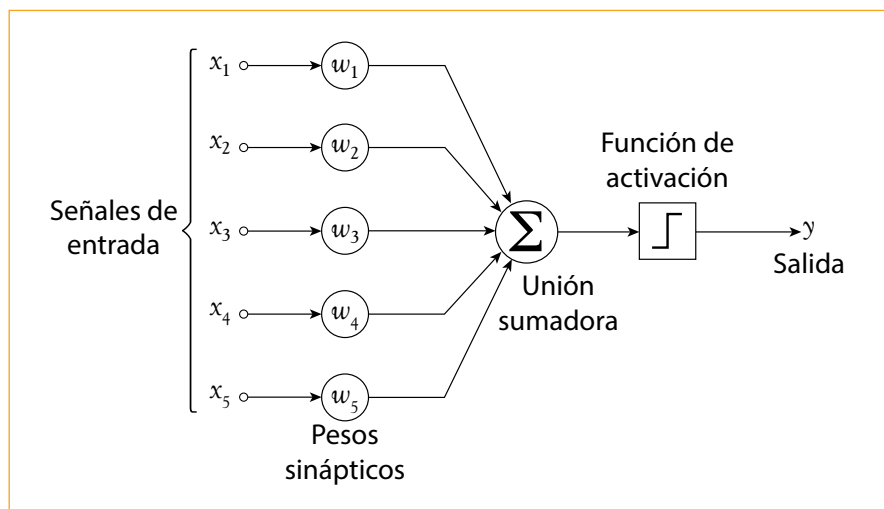


Figura 2. Modelo básico de una neurona artificial.

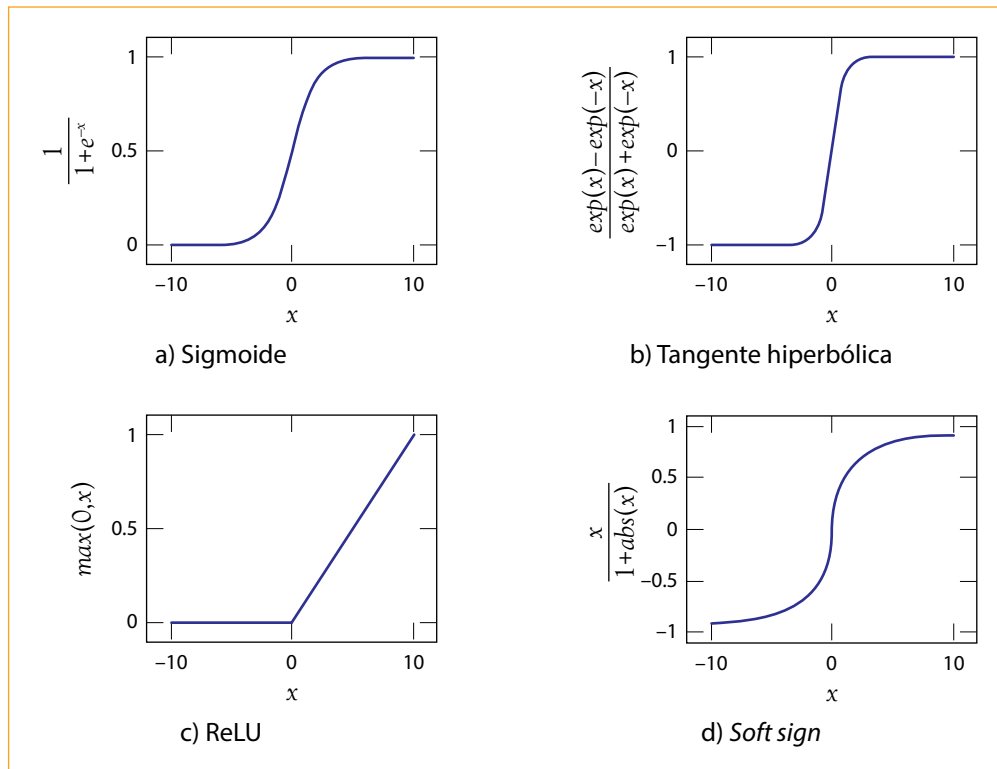


Figura 3. Algunas funciones de activación.

limita a valores entre 0 y 1), mejorando la estabilidad numérica.

3. **Son diferenciables:** esto permite usar un “descenso de gradiente” para ajustar los pesos de la red basándose en los errores entre los resultados esperados y los obtenidos.
4. **Mitigan sesgos:** funciones como ReLU previenen el *desvanecimiento del gradiente* en redes profundas.

En resumen, estas funciones son vitales para mejorar la capacidad de las redes neuronales. Por ejemplo, la función ReLU es popular por su simplicidad y por su capacidad para evitar que en algún momento el gradiente de la función de error se haga cero. Este problema es lo que se conoce como *desvanecimiento del gradiente*.

¿Y de dónde vienen los pesos? El entrenamiento del perceptrón

Para que un perceptrón entregue resultados que sean de utilidad, debe ser *entrenado* para entregar re-

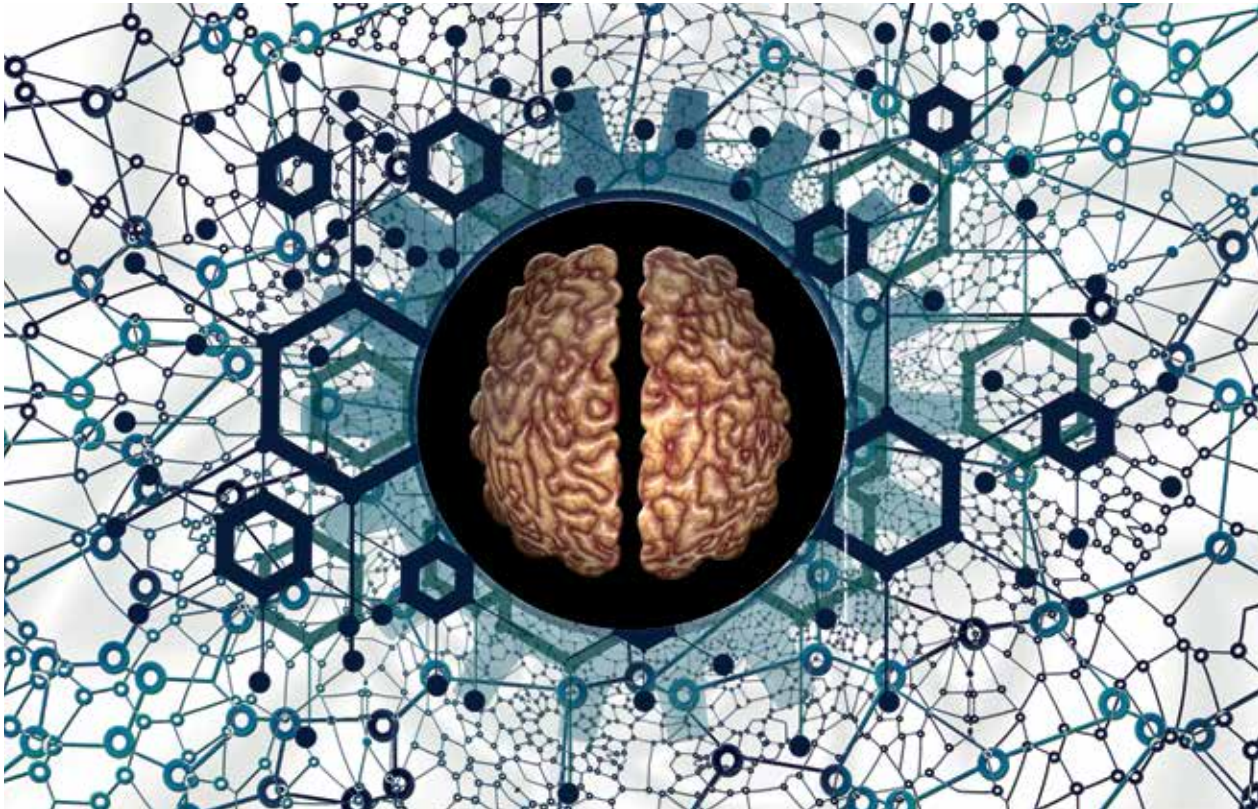
sultados útiles sobre un conjunto de datos de entrada. Para esto, puede utilizarse un proceso de *entrenamiento supervisado*. En este proceso, el perceptrón se entrena con ejemplos que indican las entradas (que representaremos con vectores x_i) y las salidas esperadas o etiquetas para el conjunto de datos ejemplo (que representaremos con números reales $\hat{y}_i$). Basado en Rosenblatt (1958) y Minsky y Papert (1969), el entrenamiento es iterativo y se resume en:

1. Establecer pesos y umbral inicialmente a valores pequeños.
2. Para cada objeto en el conjunto de entrenamiento, se calcula la salida de la neurona. Si es incorrecta, se ajustan los pesos y el umbral según la regla del perceptrón.
3. Los ajustes de pesos (w_i) y umbral siguen la fórmula:

$$w_i = w_i + \Delta w_i,$$

donde

$$\Delta w_i = \eta(y_i - \hat{y}_i)x_i.$$



η representa a la velocidad de aprende, o *learning rate* en inglés. Esta corresponde a la velocidad de ajuste del modelo. y_i es la salida del perceptrón con x_i como entrada y $\hat{y}_i$ es el valor esperado, o el valor correcto.

4. El proceso continúa hasta que la distancia entre la salida obtenida y la esperada, o el *error*, es mínimo (esto es, que la red neuronal clasifica, asignando alguna de las etiquetas o valores preestablecidos, de la forma esperada al conjunto de entrenamiento), o se alcanza cierto número preestablecido de iteraciones.

Si un conjunto de datos es *linealmente separable*, el perceptrón *converge* (esto es, que puede garantizarse que tras cierto número de rondas de entrenamiento se llega a un entrenamiento aceptable), lo que se conoce como el Teorema de Convergencia del Perceptrón: según Novikoff (1962), si existe un hiperplano correcto, el perceptrón lo encontrará; hablamos de *hiperplanos* porque los datos de entrenamiento se representan como simples puntos en un espacio de *alta dimensionalidad*. Sin embargo, muchos

conjuntos reales no son linealmente separables, lo que limita la aplicabilidad del perceptrón.

■ Afinando el entrenamiento: función de pérdida y regularización

■ El entrenamiento del perceptrón busca minimizar la función de pérdida definida como:

$$L = \sum_{i=1}^n \max(0, -y_i \cdot f(x_i))$$

donde x_i y y_i son la observación y la etiqueta, respectivamente, y $f(x_i)$ es la salida del perceptrón. Lo que hace esta función es contar el número de fallas del perceptrón en su tarea de clasificación. La meta de dicho entrenamiento es encontrar pesos que reduzcan esta pérdida. Si su mínimo es cero, el perceptrón clasifica todas las entradas correctamente (Bishop, 2006). Este tipo de problemas son el objeto de estudio de la optimización combinatoria y es lo que en esencia dota de “inteligencia aparente” al proceso.



En todas las aplicaciones de IA, el encontrar una solución “inteligente” se reduce a resolver un problema de optimización parecido. Es relevante recalcar que se trata de optimización incluso en aplicaciones de IA donde se obtiene como salida un texto o una imagen: el resultado generado es el que mejor se ajusta a los datos de entrenamiento; esto es, se optimiza para lograr un resultado congruente con el cuerpo de datos empleado para el entrenamiento.

Para evitar el “sobreajuste”, donde el perceptrón clasifica bien las observaciones de entrenamiento, pero no las nuevas (podría entenderse como que una neurona *deja de aprender*), se introduce la *regularización*. Una técnica común es la regularización L_2 o *decaimiento del peso*, que añade un término de penalización basado en el tamaño de los pesos:

$$L_{\text{reg}} = L + \lambda \|w\|^2$$

Aquí, $\|w\|^2$ es la suma de los cuadrados de los pesos y λ regula la penalización. Esta regularización

tiende a seleccionar modelos con pesos menores, reduciendo el riesgo de sobreajuste.

Tejiendo una red: el perceptrón multicapa

 El perceptrón multicapa (MLP, por sus siglas en inglés) es una extensión del perceptrón simple con múltiples capas de neuronas conectadas entre sí (Bishop, 2006). En un MLP, los datos de entrada se dividen y dan a diferentes perceptrones (una capa) las salidas de esta capa, alimentan a otros múltiples (una segunda capa) y se arman estructuras de perceptrones. Estas capas incluyen entrada, salida y al menos una capa oculta. A diferencia del perceptrón simple, el MLP puede modelar relaciones no lineales, gracias a las funciones de activación no lineales en las capas ocultas.

El aprendizaje del MLP se realiza mediante *retropropagación*. Primero, se introduce un ejemplo de entrenamiento y se propaga para obtener una salida. Luego se compara la salida con la etiqueta verdadera

(ya conocida) para calcular la pérdida. Finalmente, el error se retro-propaga y se actualizan los pesos y sesgos, buscando minimizar la pérdida. Este proceso se repite múltiples veces hasta obtener la precisión deseada (Haykin, 2009).

Conclusiones

El perceptrón es la base de muchas redes neuronales actuales. Su extensión, el MLP, puede manejar datos no lineales. Gracias a las funciones de pérdida y regularización, el perceptrón ha evolucionado hacia estructuras avanzadas, como son las **redes recurrentes y convolucionales**. Los desafíos en estas arquitecturas a menudo se abordan mediante la comprensión del perceptrón básico.

Los perceptrones son meramente *bloques de construcción*, herramientas muy sencillas si se toman uno por uno. Sin embargo, al presentarse como redes neuronales multicapa se han convertido en el fundamento de buena parte de las técnicas de IA, y todo indica que seguirán dominando esta disciplina durante el futuro previsible.

En México se han utilizado los perceptrones multicapa en tiendas departamentales para clasificar a los clientes de acuerdo con el tipo de productos de

su preferencia y canalizar de manera dirigida la publicidad que se les manda. En el Servicio de Administración Tributaria se han utilizado para localizar defraudadores fiscales y también se han aplicado para clasificar mensajes en la red X de acuerdo con su temática y sentimiento (si son mensajes positivos, negativos o neutros). Éstos son ejemplos de cuya existencia el lector seguramente ya se ha percatado, pero indudablemente se pueden localizar muchísimas más aplicaciones en contextos diversos.

Tzolkin Garduño Alvarado

University of Technology of Troyes, Francia.
tzolkin.garduno_alvarado@utt.fr

Feliú Sagols Troncoso

Departamento de Matemáticas, Cinvestav-Instituto Politécnico Nacional.
fsagols@math.cinvestav.edu.mx

Gunnar Wolf

Instituto de Investigaciones Económicas y Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México.
gwolf@gwolf.org

Redes recurrentes

Redes neuronales (o de perceptrones) que tienen un factor de memoria, mejorando la capacidad de predecir los siguientes elementos en una secuencia de datos.

Redes convolucionales

Redes de perceptrones multicapa estructuradas de forma que pueden aplicarse a matrices bidimensionales, especialmente útiles para el reconocimiento de patrones en imágenes.

Referencias específicas

Bishop, C. M. (2006), *Pattern Recognition and Machine Learning*, Cambridge, Springer.
Haykin, S. (2009), *Neural Networks and Learning Machines*, EUA, Pearson Education.
McCulloch, W. S. y W. Pitts (1943), "A Logical Calculus of the Ideas Immanent in Nervous Activity", *Bulletin of Mathematical Biophysics* 5(4):115-133.
Minsky, M. y S. A. Papert (1969), *Perceptrons: An Introduction to Computational Geometry*, EUA, MIT Press.

Novikoff, A. B. (1962), "On the Convergence Proofs on Perceptrons", *Proceedings of the Symposium on the Mathematical Theory of Automata*, 12:615-622.
Rosenblatt, F. (1958), "The Perceptron: A Probabilistic Model for Information Storage and Organization in the Brain", *Psychological Review* 65(6): 386.
Rumelhart, D. E., G. E. Hinton y R. J. Williams (1986), "Learning Representations by Back-Propagating Errors", *Nature*, 323:533-536.

Ian Carlos Flores Contreras, Yenny L. Casallas-Moreno y Luis Martín Reséndiz Mendoza

Celdas solares orgánicas: una tecnología viable para México

El aprovechamiento de la energía solar para generar electricidad por medio de las celdas solares representa una gran alternativa para el desarrollo de la energía renovable. En este artículo se presentan las celdas solares orgánicas como fuentes potenciales para aumentar la capacidad instalada, destacando características como su flexibilidad, transparencia y bajo costo. Además, se reporta la investigación desarrollada en el país y la industrialización de estos dispositivos.

Introducción

Actualmente, el crecimiento de la población mundial, junto con el desarrollo tecnológico y el fácil acceso a bienes de consumo, ha elevado significativamente la demanda de energía eléctrica y, con ello, el consumo de energías de fuentes no renovables, especialmente las derivadas de combustibles fósiles. Este uso excesivo de fuentes fósiles es responsable de gran parte de las emisiones de gases de efecto invernadero, que contribuyen directamente al calentamiento global. En respuesta a esta situación, varios países se han unido para desarrollar tratados que promueven la sostenibilidad ambiental y que buscan reducir el impacto del cambio climático. Un ejemplo de estos tratados es el Acuerdo de París, cuyo objetivo principal es limitar el aumento de la temperatura en este siglo a un máximo de 2 °C.

De acuerdo con el Inventario Nacional de Gases de Efecto Invernadero (GEI), emitido en el 2015 por el Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC), México ocupaba el décimo segundo lugar a nivel global con una emisión de 665 304.92 Gg de CO₂ (1 Gg = 1 000 toneladas; el gigagramo es una unidad de medida de masa en el sistema métrico decimal utilizada principalmente para el cálculo de emisiones de gases de efecto invernadero y en estudios de impacto ambiental). Por esta razón, la Secretaría de Energía (Sener) en el 2015 se trazó como meta el aumento de la generación de energía eléctrica a partir de energías renovables en un 30 % para 2021 y en un 35 % para 2024 (Plan Nacional de Desarrollo 2019-2024). Este compromiso se evidenció en el informe de Prospectiva de





Energías Renovables 2016-2030 de la Sener, donde se reportó que en 2015 el país ya presentaba un incremento del 6.6 % en la capacidad instalada de energía renovable en comparación con el año anterior. Estos avances y las proyecciones de los planes de desarrollo energético son motivados, por una parte, por las importaciones de energía eléctrica que ha tenido que realizar el país para cumplir con su demanda; por otra parte, por la disposición privilegiada de recursos renovables que tiene el país, como lo demuestra el hecho de que el 85 % del territorio mexicano tiene condiciones óptimas de radiación solar.

La tecnología que utiliza las celdas solares para convertir la energía solar en eléctrica ha experimentado un enorme avance. La fabricación de paneles solares se ha vuelto rentable debido a la reducción de costos y mejoras en la eficiencia de conversión. En este momento, el dominio del mercado (85 %) lo tienen las celdas solares de silicio por su bajo costo, abundancia y capacidad para utilizarse en instalaciones de escala de gigawatts (10^9 W). Las investigaciones han mostrado que el límite teórico de eficiencia de las celdas solares de silicio monocristalino es de 29.05 %. Por esta razón, se está incursionando

en tecnologías con nuevos materiales semiconductores que mejoren significativamente la cobertura en la capacidad instalada a nivel mundial. Entre ellas, las celdas solares basadas en materiales orgánicos son potencialmente atractivas, ya que pueden ser transparentes, flexibles, de bajo peso y pueden instalarse en superficies curvas.

Aprovechamiento de la energía solar en México

 México tiene un gran potencial para el aprovechamiento de la energía solar debido a su ubicación geográfica, ya que es uno de los países con mayor irradiancia promedio anual en el mundo (5.3 kWh/m^2 por día, según Conagua, 2012). Al realizar una comparación con Alemania, un país puntero en el aprovechamiento de la energía solar, se aprecia que la generación de energía eléctrica con fuente solar en México es de 114.2 GWh, 44 veces menor a la producción de Alemania, de 5 047 GWh a partir de una irradiancia promedio anual de 1.1 kWh/m^2 por día, según datos recopilados por el CIEP (Centro de Investigación Económica y Presupuestaria, A. C., 2017).

Para aumentar la capacidad instalada de fuentes energéticas en el país, se han propuesto diferentes proyectos e inversiones que promueven la implementación de tecnologías que aprovechan el recurso de la radiación solar. Uno de los proyectos pioneros fue el de Sonntlan (1979-1985), en el que los gobiernos de México y Alemania Occidental invirtieron en un generador fotovoltaico de 250 W en Baja California Sur. En 1984 el gobierno alemán se retiró y en ese mismo año el gobierno mexicano cedió el proyecto a la Universidad Autónoma de Baja California Sur. Uno de los proyectos más conocidos fue el instalado en Baja California Sur (26 de marzo 2014) por parte del Corporativo Aura Solar, que representó la central fotovoltaica más grande del país, pero lamentablemente fue destruida en gran parte por el huracán Odile, el 15 de septiembre de 2014. En la actualidad, la central se encuentra operando y su producción de energía renovable es equivalente al 60 % del consumo energético de los habitantes de La Paz.

En este momento, en México se encuentran funcionando 23 centrales fotovoltaicas, en su mayoría

ubicadas en Baja California Sur, Durango, Chihuahua y el Estado de México, las cuales han reportado una generación de electricidad, desde el 2017, de 344 GWh, según el Informe de Labores 2019-2020 de la Sener. En estos proyectos se emplea como tecnología principal las celdas solares inorgánicas convencionales, que son cuadradas, planas, rígidas y pesadas. Para el aprovechamiento de la energía solar a gran escala, se ha hecho un gran esfuerzo por implementar nuevas tecnologías, como las celdas solares orgánicas (cso). La compañía Engie, con su campaña Harmony, ha instalado en la Ciudad de México, bajo el proyecto “Solar Graffiti”, las primeras cso fabricadas por Heliatek para implementar energía renovable en las urbes y resolver los principales problemas de la ciudad, que son el espacio disponible y el exceso de peso en los inmuebles; esta tecnología se vale de la flexibilidad de los semiconductores orgánicos para diseñar módulos solares curvos y adaptables a diferentes superficies.

■ Celdas solares orgánicas: ■ una alternativa prometedora

■ Las cso son dispositivos que transforman la energía solar en energía eléctrica mediante el aprovechamiento de la radiación que llega a la superficie de la Tierra, en un proceso conocido como **efecto fotovoltaico**, similar al de las celdas solares convencionales inorgánicas. Es importante destacar que las cso pertenecen a la tercera generación de tecnologías fotovoltaicas. Los materiales orgánicos que componen las cso son compuestos que contienen enlaces de carbono (C), en combinación con otros elementos, como el hidrógeno (H_2) y oxígeno (O_2). Entre estos elementos se encuentran polímeros, oligómeros y monómeros orgánicos que se distinguen de sus versiones inorgánicas por su estructura y propiedades. Aunque también existen variantes inorgánicas de estos compuestos, en las cso se emplean exclusivamente materiales orgánicos. Las celdas están constituidas por una capa activa, compuesta de una **heterounión** de dos materiales semiconductores orgánicos, un material que transporta carga negativa (llamado material aceptor) y otro que transporta car-

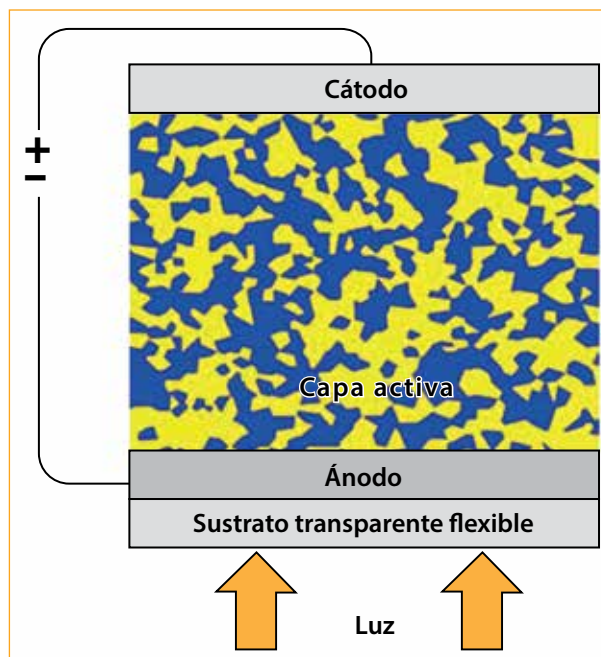


Figura 1. Esquema de la estructura fundamental de una CSO.

ga positiva (llamado material donador), tal como se ilustra en el esquema de la Figura 1. Adicionalmente, la celda cuenta con dos electrodos que recolectan los portadores de carga, permitiendo la generación de corriente eléctrica.

En la actualidad, para aumentar la eficiencia del dispositivo se agregan, en la unión de la capa activa con los electrodos, dos capas transportadoras de carga, una de carga positiva y otra de carga negativa. Otra forma de aumentar la eficiencia del dispositivo es uniendo más de dos capas activas de diferentes materiales para absorber una mayor cantidad de luz, formando así las denominadas cso de unión múltiple (tándem o sándwich), que puede alcanzar eficiencias, según estudios teóricos, de más de 40 % a costos bajos (IEA, 2011).

Los primeros dispositivos orgánicos se elaboraron en la década de los ochenta, formados por una estructura de una sola capa y reportaron eficiencias menores al 1 %. Desde entonces, se han desarrollado investigaciones para optimizar las cso, lo que dio paso a estructuras bicapa o de heterounión plana (véase la Figura 2a), formadas por una capa de un material aceptor y otro donador, demostrando que se deben considerar los efectos que suceden

◀ Efecto fotovoltaico

Es un fenómeno físico en el que un material genera una corriente eléctrica al ser expuesto a la luz.

◀ Heterounión

Es la interfaz entre dos materiales semiconductores con diferentes propiedades electrónicas, para optimizar el rendimiento de dispositivos optoelectrónicos.

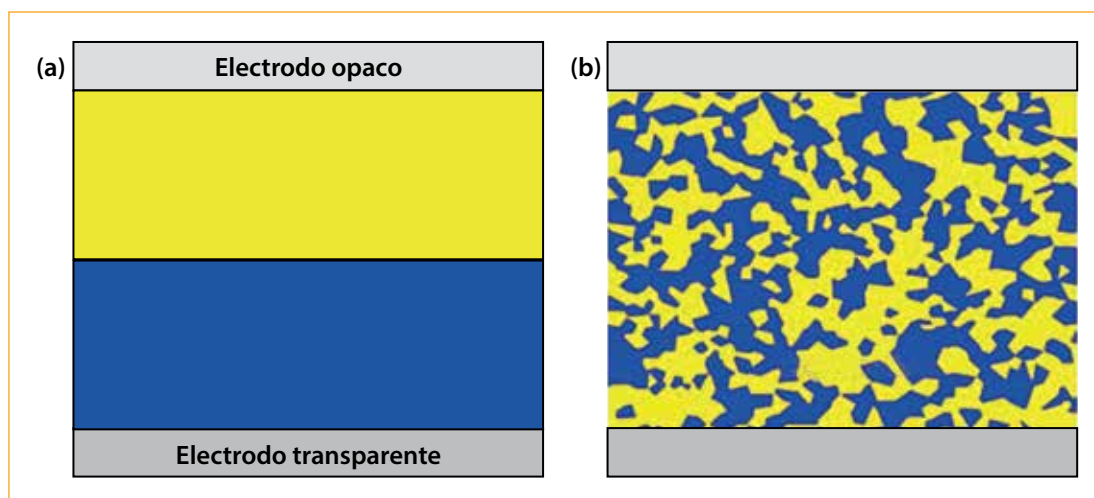


Figura 2. Esquema de la capa activa de una CSO con forma de: a) bicapa, b) heterounión de volumen desordenada. En color azul y amarillo se representan las regiones de los materiales aceptores y donadores, respectivamente.

internamente en la capa activa. En la década de los noventa, se descubrió que hay mejor transferencia de portadores de carga usando un polímero como material donador y un fullereno como material aceptor. En 1995 se propuso la estructura de heterounión de volumen (BHJ, por sus siglas en inglés: *bulk hetero junction*), en la cual se disuelve la mezcla binaria de los materiales aceptores y donadores en el mismo disolvente, logrando una mejora en el transporte de portadores de carga (véase la [Figura 2b](#)). También, se identificaron dos materiales que en la actualidad son los más utilizados. El polímero P3HT y el fullereno PCBM (Berger y Kim, 2018). Estos materiales presentan propiedades adecuadas para el transporte de carga más efectivo y su uso ha permitido la implementación del método de impresión rollo a rollo para la fabricación a gran escala. Con el desarrollo de nuevos materiales orgánicos semiconductores, se logró que en el 2018 se desarrollaran CSO con estructura *tándem* y eficiencias superiores al 17 %, y en el 2020, superiores al 18 por ciento.

Las CSO tienen dos desventajas respecto a su contraparte inorgánica: presentan bajas eficiencias de conversión de energía y tienen cortos tiempos de vida. Por el momento, el récord de eficiencia experimental reportado para películas delgadas es de 18.6 %, menor a la que presentan las películas delgadas de silicio monocristalino, que es de 26.7 %. No obstante, debido a la gran diversidad de materiales semiconductores

orgánicos, la eficiencia ha aumentado en los últimos diez años más del 8 %. Por otro lado, el tiempo de vida de las celdas fotovoltaicas orgánicas encapsuladas es menor a 10 años, baja en comparación con las celdas de silicio (25 años). Para mejorar este inconveniente se han estado investigando nuevos materiales aceptores, donadores y metales de contacto.

■ Investigación de celdas solares orgánicas en México

En la última década, varios grupos de investigación (particularmente en México) han incrementado el número de trabajos relacionados con las CSO, como se puede observar en la [Figura 3](#). Los centros de in-

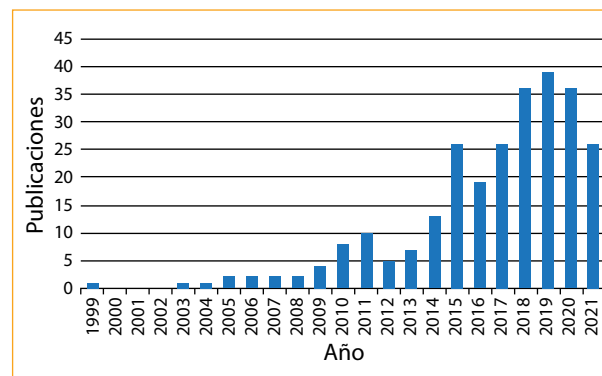


Figura 3. Publicaciones por año de instituciones mexicanas relacionadas con las CSO (información obtenida de la base de datos de la página Web of Science Core Collection, 2021).

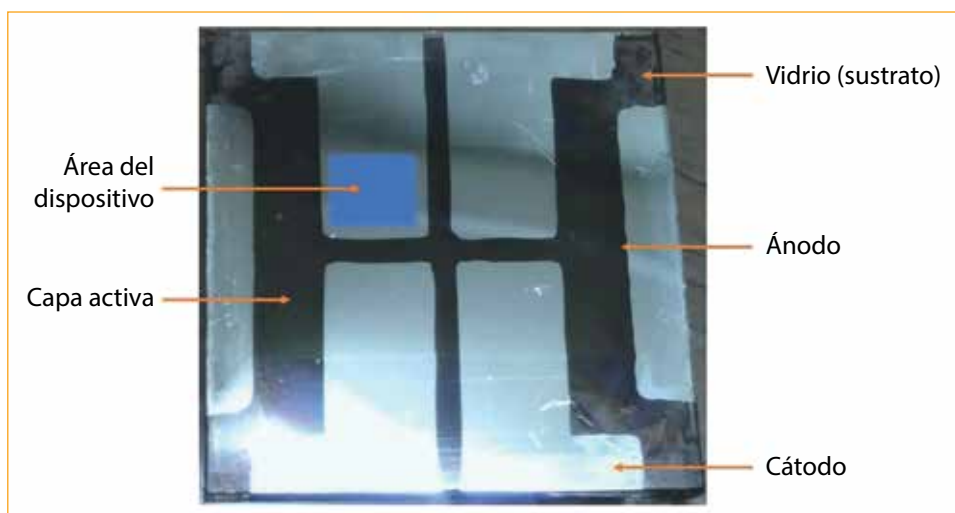


Figura 4. Celda solar orgánica con eficiencia de conversión del 10 %, desarrollada en el grupo de investigación de la doctora Magali Estrada de la SEES -Cinvestav.

vestigación e instituciones de educación superior están sumando esfuerzos en el desarrollo de cálculos teóricos, así como en la síntesis de nuevos compuestos orgánicos para incrementar el tiempo de vida y la eficiencia de las celdas. Por ejemplo, el Cinvestav y el Instituto Politécnico Nacional han contribuido al avance en las cso en México, ya que se han fabricado en laboratorio cso con eficiencias de alrededor del 10 % (dispositivo mostrado en la **Figura 4** con un área de 0.09 cm²), en la Sección de Electrónica del Estado Sólido del Cinvestav (Ramírez-Como *et al.*, 2021). Además, se han realizado estudios teóricos de los procesos en el interior de la celda solar orgánica para optimizar su desempeño en la Unidad Profesional Interdisciplinaria en Ingeniería y Tecnologías Avanzadas del IPN (Lastra *et al.*, 2019) (Flores-Contreras y cols., 2019).

■ Industrialización de las celdas solares orgánicas

■ Las características de las cso son muy atractivas; aun así, no es tan común la industrialización de esta tecnología. Konarka Technologies, cofundada por el premio Nobel de Química Alan J. Heeger, apostó por comercializar este tipo de tecnología durante 11 años, logrando dispositivos que tenían una eficiencia del 4 %. Otro ejemplo es Heliatek, empresa alemana fundada en 2006 en la Universidad Técnica

de Dresden, que desde 2012 lanzó al mercado su primera línea de producción de celdas solares tándem con 13.2 % de eficiencia y con productos que tienen un tiempo de vida de 20 años. La producción de las cso se lleva a cabo por medio de la técnica de síntesis de recubrimiento rollo a rollo, que permite un gran volumen, alto rendimiento, larga vida útil y alta eficiencia en los dispositivos.

Las cso no son el sustituto de las celdas convencionales; son una tecnología complementaria asequible, pues se estima que la producción de estos módulos es 59.6 % menor respecto a los módulos de silicio (Kalowekamo y Baker, 2009).

■ Conclusión

■ Las cso presentan propiedades como la flexibilidad, semitransparencia y bajo peso, lo que las convierte en dispositivos atractivos y de alta relevancia para el aprovechamiento de la energía solar en lugares no accesibles para las celdas convencionales. Estas características posicionan a las cso como una tecnología complementaria a las opciones convencionales. Además, el avance científico y la industrialización en la última década de las cso se debe a que su producción es de bajo costo, a que las técnicas de elaboración son simples y los materiales orgánicos empleados son abundantes y de gran diversidad.

Además, es posible optimizar su rendimiento mediante el diseño e innovación de su estructura.

Por el momento, los esfuerzos se centran en la búsqueda de nuevos materiales con propiedades adecuadas para aumentar la eficiencia y el tiempo de vida de los dispositivos. La riqueza que presenta México para el aprovechamiento de la radiación solar ha motivado a diferentes grupos de investigación para desarrollar investigación de alto impacto en este tema, llevando a realizar aportes importantes en la eficiencia y tiempo de vida de las cso, con lo que se han logrado eficiencias superiores al 10 por ciento.

Se agradece a la doctora Magali Estrada del Cueto y su grupo de investigación de la SEES-Cinvestav por la fotografía de la celda solar experimental, y al doctor Víctor Cabrera Arenas por la revisión del artículo. Y. L. Casallas-Moreno agradece al proyecto de Ciencia de Fronteras 2023, núm. CF-2023-I-1117. Ian C. Flores agradece al programa "Proyecto de Desarrollo Tecnológico o Innovación para alumnos del IPN, 2024", y Luis M. Reséndiz agradece al proyecto SIP 20242346 por el apoyo para la realización de este trabajo.

Ian Carlos Flores Contreras

Unidad Profesional Interdisciplinaria en Ingeniería y Tecnologías Avanzadas, Instituto Politécnico Nacional.
ifloresc1800@alumno.ipn.mx.com

Yenny L. Casallas-Moreno

Conahcyt, Unidad Profesional Interdisciplinaria en Ingeniería y Tecnologías Avanzadas, Instituto Politécnico Nacional.
ycasallasm@ipn.mx

Luis Martín Reséndiz Mendoza

Unidad Profesional Interdisciplinaria en Ingeniería y Tecnologías Avanzadas, Instituto Politécnico Nacional.
lresendiz@ipn.mx

Referencias específicas

- Berger, P. R. y M. Kim (2018), "Polymer solar cells: P3HT: PCBM and beyond", *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, 10(1):013508.
- Flores-Contreras, Ian C., V. Cabrera y L. Reséndiz (2019), "An algorithm to generate two-dimensional morphologies of organic solar cells", ponencia presentada en la 19th International Conference on Numerical Simulation of Optoelectronic Devices, Ottawa, Canadá.
- International Energy Agency (IEA) (2011), "Solar Energy Perspectives", *International Energy Agency*. Disponible en: <<https://www.iea.org/reports/solar-energy-perspective>>, consultado el 11 de noviembre de 2024.
- Kalowekamo, J. y E. Baker (2009), "Estimating the manufacturing cost of purely organic solar cells", *Solar Energy*, 83(8):11224-1231. Disponible en: <<https://doi.org/10.1016/j.solener.2009.02.003>>, consultado el 11 de noviembre de 2024.
- Lastra, G., V. S. Balderrama, L. Reséndiz, J. Pallarès, L. F. Marsal et al. (2019), "Air environment degradation of a high-performance inverted PTB7-Th: PC70BM solar cell", *IEEE Journal of Photovoltaics*, 9(2):464-468.
- Ramírez-Como, M., A. Sacramento, J. G. Sánchez, M. Estrada, J. Pallarès et al. (2021), "Small molecule organic solar cells toward improved stability and performance for Indoor Light Harvesting Application", *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 230, 111265.



Elizabeth Martínez Gómez

Impulsando nuestra comprensión del universo con inteligencia artificial

La inteligencia artificial (IA) ha revolucionado la astronomía al facilitar el análisis de grandes volúmenes de datos y abordar desafíos como el ruido y las escalas de tiempo. Este artículo examina cómo la IA mejora la identificación y clasificación de objetos celestes, así como la predicción de fenómenos astronómicos. Gracias a sus técnicas, nuestro conocimiento del cosmos se ha ampliado.

La inteligencia artificial: ¿otro tipo de inteligencia?

El término inteligencia artificial (IA) surgió en la informática hace más de 60 años y constituye un área que ha experimentado un avance notable gracias al incremento en la capacidad de procesamiento de datos y al desarrollo de algoritmos más complejos, apoyados por ramas de las matemáticas como la topología y el álgebra lineal. Esto ha dado lugar a aplicaciones en medicina, robótica, seguridad, agricultura, entre otras áreas.

Comúnmente, se asocia la IA con un robot que tiene características humanas y puede tomar decisiones autónomas ([Figura 1](#)); sin embargo, esta representación no refleja completamente la realidad. Por ejemplo, las recomendaciones en plataformas de *streaming* no dependen de robots físicos, sino de algoritmos computacionales que procesan la información generada por el usuario al visualizar contenido. Estos algoritmos identifican patrones de comportamiento y preferencias para sugerir contenido personalizado, optimizando la experiencia del usuario al mostrar opciones relevantes.

Al buscar “inteligencia artificial” en un motor de búsqueda, se encontrarán cientos de resultados con definiciones diversas. Tras analizar varias, se puede concluir que la inteligencia artificial es un término general que abarca un conjunto de técnicas y metodologías diseñadas para realizar tareas complejas, como la identificación de patrones de comportamiento o la predicción de características de interés. No representa un nuevo tipo de inteligencia, sino una evolución de la inteligencia humana aplicada en el ámbito informático.



Figura 1. La inteligencia artificial vista como un robot con características humanas y tomando decisiones. Creado con el generador de imágenes de IA de Microsoft.

Actualmente, la mayoría de las aplicaciones de IA de las que escuchamos hablar, desde computadoras que juegan ajedrez hasta vehículos autónomos, se basan principalmente en métodos de aprendizaje automático (*machine learning*), aprendizaje profundo (*deep learning*), redes neuronales artificiales (*artificial neural networks*) y en el procesamiento del lenguaje natural (*natural language processing*).

Astronomía antes de la IA

La astronomía es una ciencia observacional y de las primeras practicadas por la humanidad. Requiere de la física y de las matemáticas para dar una explicación de los mecanismos de evolución de los astros y del universo mismo (**Figura 2**). Antes de la época

de los avanzados telescopios que llevaron al manejo de grandes cantidades de datos, hubo varios descubrimientos que marcaron nuestra historia. Entre los más destacados se pueden mencionar:

- **Las fases de la Luna:** en la Edad de Piedra (año 32000 a. C.) se hacían registros de este fenómeno.
- **La duración del año terrestre:** Hiparco de Nicea (año 150 a. C.) calculó con gran exactitud la duración del año midiendo el valor de la precesión de los equinoccios.
- **El Sol como centro del sistema solar:** Copérnico (1543) formuló la teoría heliocéntrica del sistema solar.
- **Las leyes de Kepler:** entre 1609 y 1619, Kepler propuso tres leyes del movimiento de los planetas

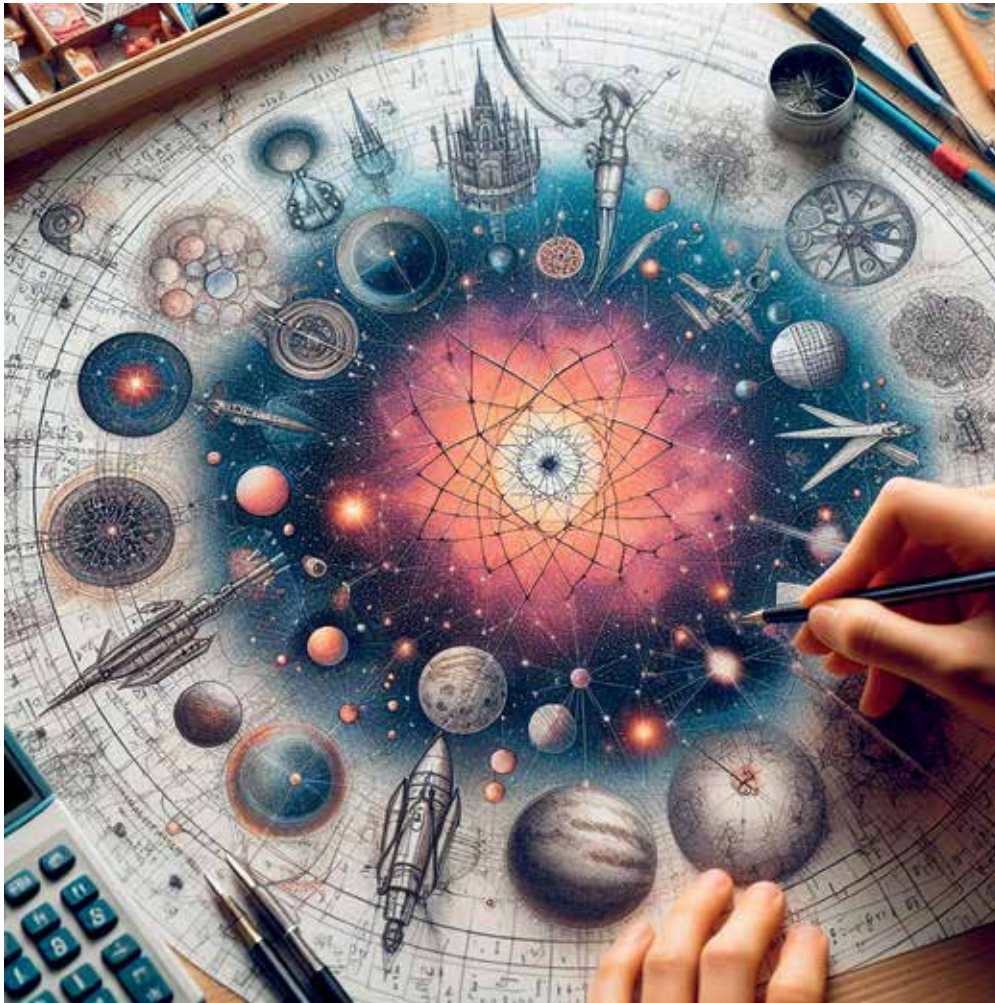


Figura 2. La investigación astronómica antes de la IA. Creado con el generador de imágenes de IA de Microsoft.

que han servido para sentar las bases de la astronomía moderna.

- **El efecto Doppler:** en 1842, Doppler enuncia este efecto, según el cual la longitud de onda varía en función de la distancia y el movimiento del objeto emisor y receptor.
- **La teoría de la relatividad:** en 1915, Einstein publica su teoría general, en donde establece que el espacio y el tiempo son relativos, que forman un “continuo” llamado espacio-tiempo y que la masa de los objetos hace que el espacio-tiempo se curve.
- **La radiación de microondas de fondo:** Penzias y Wilson (1965) detectaron esta radiación, la cual es una consecuencia de la explosión del Big Bang hace 13 mil 820 millones de años.

- **El primer exoplaneta:** en 1995, Mayor y Queloz anunciaron al mundo la existencia del primer planeta orbitando una estrella distinta al Sol. A estos cuerpos se les conoce simplemente como *exoplanetas* o planetas extrasolares.
- **Las ondas gravitacionales:** en 2016, el equipo del observatorio LIGO anunció la detección de ondas gravitacionales. Con esto se confirmaron las teorías de Einstein y también permitió el estudio del universo sin necesidad de luz (lo que finalmente captan los telescopios).

■ **La astronomía después de la IA**

- Dos de las necesidades actuales para emplear las técnicas de IA son el almacenamiento y la visuali-

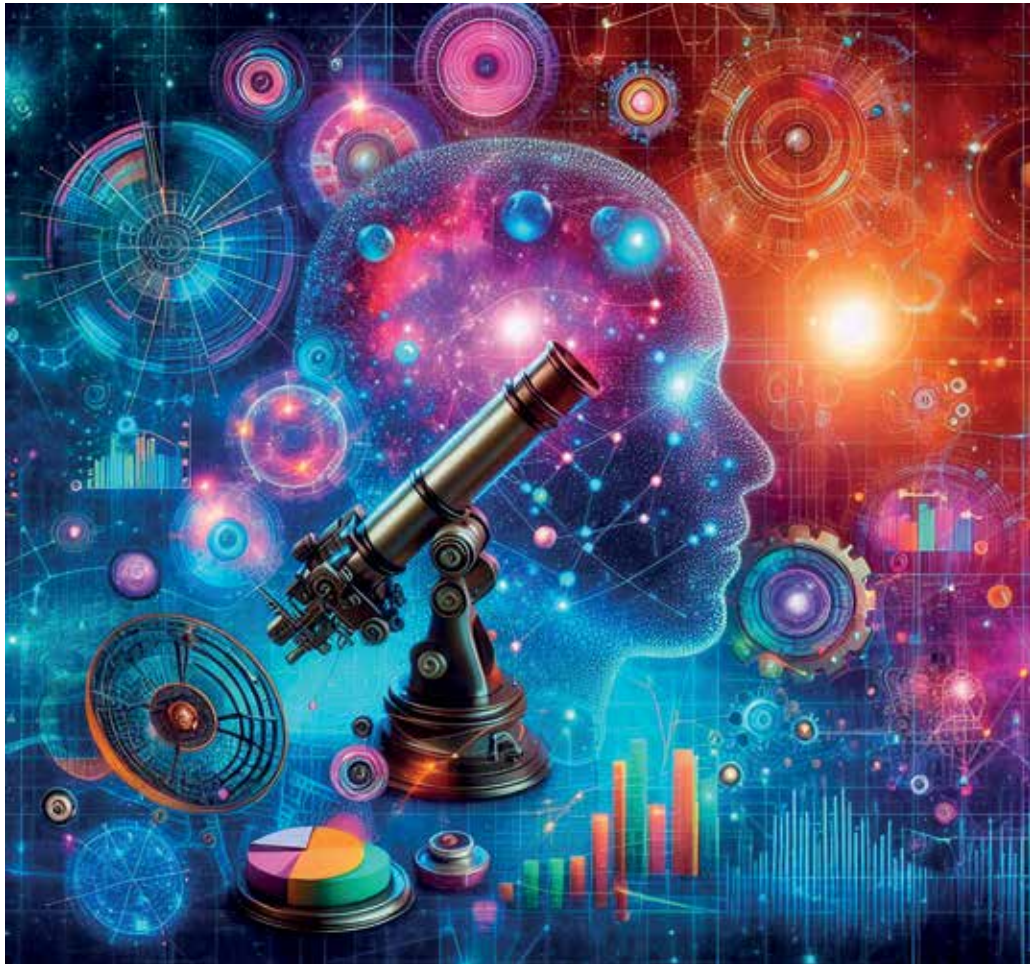


Figura 3. La investigación astronómica y el uso de la IA. Creado con el generador de imágenes de IA de Microsoft.

zación de enormes cantidades de datos (proceso llamado *Big Data*). Aunque los términos IA y *Big Data* no son sinónimos, es un hecho que los algoritmos desarrollados en la IA ayudan al preprocesamiento y análisis del llamado *Big Data*.

Además de los desafíos relacionados con el volumen, la variedad, la velocidad y el valor de los datos astronómicos, se requiere cada vez de una mayor resolución y de un mínimo de errores en las estimaciones de los parámetros de los modelos teóricos. Estos modelos, formados por ecuaciones derivadas de la física, describen el fenómeno de interés y, cuando es posible, predicen su evolución. Esto hace imprescindible el uso de algoritmos computacionales más eficientes y precisos, lo que ha llevado a que la inteligencia artificial (IA) transforme o redirija el enfoque de las investigaciones astronómicas (**Figura 3**). Algunos de

los problemas científicos modernos en astronomía que están siendo abordados mediante IA son:

Detección de objetos celestes

Ésta siempre ha sido una de las tareas más complejas y las imágenes actuales logran una más alta resolución, brillo, rotación, ruido, entre otros. Por ejemplo, en abril de 2023, se aplicó un cambio de imagen mediante la técnica de aprendizaje automático a una imagen del año 2019 del agujero negro supermasivo en el centro de la galaxia Messier 87 (M87), lo que produjo una imagen significativamente más nítida de la estructura del agujero negro (Medeiros y cols., 2023).

Las técnicas de IA han permitido desarrollar nuevos métodos para la detección de exoplanetas. Un ejemplo destacado es el uso de redes neuronales para analizar curvas de luz, que representan la intensidad lumínica

de un objeto celeste a lo largo del tiempo. Estas redes permiten detectar exoplanetas utilizando datos de telescopios espaciales como Kepler o TESS (Chatterjee y cols., 2024), los cuales observan la luminosidad de las estrellas en busca de variaciones generadas por los tránsitos de exoplanetas frente a sus estrellas huésped.

Clasificación de objetos celestes

Éste es otro de los problemas comunes en astronomía. Una vez que se detectaron los objetos hay que clasificarlos en grupos para poder estudiar las propiedades particulares de cada uno.

Cuando se cuenta con un conjunto amplio de imágenes, el aprendizaje profundo mediante redes neuronales convolucionales es una técnica muy útil para su clasificación (O'Shea y Nash, 2015). A diferencia de las redes neuronales artificiales tradicionales, las redes convolucionales requieren un operador matemático específico que permita relacionar los datos de manera espacial, como ocurre en las imágenes.

Una aplicación de esta técnica en astronomía es la clasificación morfológica de galaxias (Serrano-Pérez y cols., 2024). En este caso, una red neuronal convolucional es entrenada con imágenes de los cuatro tipos de galaxias conocidas y, utilizando un enfoque bayesiano, puede predecirse la morfología de una nueva imagen con aproximadamente un 80 % de precisión.

Otro enfoque innovador consiste en clasificar las señales débiles provenientes de posibles exoplanetas. Estas señales son difíciles de detectar debido a la distancia y a la interferencia del ruido cósmico. Sin embargo, las redes neuronales entrenadas con señales de exoplanetas conocidos pueden distinguir entre señales reales y ruido, ayudando a encontrar nuevos candidatos a exoplanetas, como se realizó en el trabajo de Nieto y Díaz (2023).

Tanto la detección (o identificación) como la clasificación (o categorización) de objetos celestes es fundamental para un mejor entendimiento de la composición y evolución del universo.

Identificación de patrones

Gracias al aprendizaje automático se pueden entrenar (ejecutar) cientos de modelos en un tiempo relativamente corto con la finalidad de que se reconoz-

Recuadro 1.

Se le llama *objeto celeste* o *astronómico* (Figura 4) a una estructura compleja, menos cohesionada (unida), que puede estar formada por múltiples cuerpos o incluso por otros objetos con subestructuras. A menudo este término también es referido como cuerpo. Los sistemas planetarios, cúmulos estelares, galaxias y nebulosas, son ejemplos de objetos astronómicos.



Figura 4. Algunos ejemplos de objetos astronómicos. Panel superior (izquierda a derecha): región "Pilares de la Creación", sistema planetario, nebulosa planetaria; Panel inferior (izquierda a derecha): galaxia espiral, cometa y cúmulos estelares.

can patrones en los datos astronómicos. Por ejemplo, estos patrones pueden indicar la presencia de un exoplaneta, o bien la identificación de ciertos elementos químicos y propiedades físicas en espectros complejos (el espectro es el resultado de separar las frecuencias presentes en la luz o, más precisamente, la radiación, y medir la cantidad de energía recibida en cada una de esas frecuencias).

■ ¿Estamos ante una nueva apreciación del universo?

■ Es importante destacar que lo que conocemos hasta el momento proviene del universo observable (esto es, la parte visible del universo total, la cual es lo suficientemente pequeña como para que la luz emitida de las regiones más remotas haya tenido tiempo de llegar a la Tierra).

Conforme los algoritmos de la IA se perfeccionan es seguro que habrá más descubrimientos nuevos o se confirmarán con mayor precisión los ya existentes. Lo

más alentador es que tal vez se disponga por primera vez de modelos físicos con una alta capacidad predictiva, lo cual impactará de manera significativa en la comprensión de los fenómenos astrofísicos subyacentes y ayudará en la planeación de proyectos espaciales.

Si se piensa en un universo ajeno al nuestro, la IA podría finalmente brindar pruebas más precisas para detectar la presencia de vida extraterrestre, tal y como un equipo de científicos liderado por Robert Hazen del Instituto Carnegie para la Ciencia y Jim Cleaves del departamento de Química de la Universidad de Howard y del Instituto Espacial de Ciencias de Blue Marble señalan en su trabajo publicado en 2023. En su investigación, utilizando modelos basados en bosques aleatorios, lograron distinguir con una tasa de precisión del 90 % entre muestras bióticas y abióticas. Las muestras incluyeron células vivas, material fósil, meteoritos ricos en carbono y compuestos orgánicos sintetizados en el laboratorio. Esto significa que pudieron identificar variaciones mínimas en los patrones moleculares de las muestras con gran claridad (Cleaves II y cols., 2023).

La siguiente generación de telescopios, como el Extremely Large Telescope (ELT) y el Large-Aper-

ture Synoptic Survey Telescope (LSST), se están diseñando con capacidades de IA integradas para permitir el almacenamiento y procesamiento de datos en tiempo real, lo cual indudablemente acelerará el estudio del espacio y continuará sorprendiéndonos.

Conclusiones

La inteligencia artificial ha revolucionado la investigación astronómica al facilitar el análisis de grandes volúmenes de datos, mejorando la detección y clasificación de objetos celestes. Además, sus técnicas abren nuevas posibilidades en la búsqueda de vida extraterrestre al identificar patrones moleculares en muestras. Finalmente, con la próxima generación de telescopios integrados con IA, se prevé un avance acelerado en la ciencia espacial y una mejor comprensión del universo y sus fenómenos.

Elizabeth Martínez Gómez

Departamento de Ciencia, Escuela de Ingeniería y Ciencias, Tecnológico de Monterrey-Campus Cuernavaca.

eli.mago@tec.mx

Lecturas recomendadas

Delgado Inglada, G. (2023), "Aplicaciones de la inteligencia artificial en la astrofísica", *Muy Interesante*. Disponible en: <<https://www.muyinteresante.com.mx/espacio/38253.html>>, consultado el 26 de junio de 2024.

Duarte Muñoz, C. (2019), "Inteligencia artificial y astronomía", *Hacia el espacio*. Disponible en: <<https://haciaespacio.aem.gob.mx/revistadigital/articul.php?interior=1036>>, consultado el 26 de junio de 2024.

Referencias específicas

Chatterjee, M., A. Sen y S. Roy (2024), "ExoSpikeNet: A Light Curve Analysis Based Spiking Neural Network for Exoplanet Detection", *13th IEEE International Conference on Communication Systems and Network Technologies (CSNT 2024)*. Disponible en: <<https://arxiv.org/pdf/2406.07927>>, consultado el 11 de octubre de 2024.

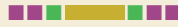
Cleaves II, H. J., G. Hystad, A. Prabhu y R. M. Hazen (2023), "A robust, agnostic molecular biosignature based on machine learning", *Proceedings of the National Academy of Sciences (PNAS)*. Disponible en: <<https://www.pnas.org/doi/10.1073/pnas.2307149120>>, consultado el 11 de octubre de 2024.

Medeiros, L., D. Psaltis, T. R. Lauer y F. Özel (2023), "The image of the M87 black hole reconstructed with PRIMO", *The Astrophysical Journal Letters*, 947(1). Disponible en: <<https://iopscience.iop.org/article/10.3847/2041-8213/acc32d>>, consultado el 11 de octubre de 2024.

Nieto, L. A. y R. F. Díaz (2023), "ExoplanetNet: A deep learning algorithm to detect and identify planetary signals in radial velocity data", *Astronomy & Astrophysics*, 677, id. A48. Disponible en: <<https://arxiv.org/abs/2303.09335>>, consultado el 11 de octubre de 2024.

O'Shea, K. y R. Nash (2015), "An Introduction to Convolutional Neural Networks", *ArXiv e-prints*. Disponible en: <<https://arxiv.org/pdf/1511.08458>>, consultado el 11 de octubre de 2024.

Serrano-Pérez, J., R. Díaz-Hernández y L. E. Succar (2024), "Bayesian and convolutional networks for hierarchical morphological classification of galaxies", *Experimental Astronomy*, 58(2), id.5. Disponible en: <<https://arxiv.org/pdf/2405.02366>>, consultado el 11 de octubre de 2024.



Desde las redes

Endosimbiosis artificial

A finales de los años sesenta, Lynn Margulis propuso, en un artículo científico que fue rechazado unas quince veces, la teoría de la endosimbiosis. Ésta postula que las células eucariotas, es decir, las células con núcleo y organelos, surgieron a partir de la fusión de células bacterianas y arqueas.

Un grupo de investigadores, liderado por la microbióloga Julia Vorholt de la Escuela Politécnica Federal de Zúrich, se dio a la tarea de implantar bacterias en una célula más grande; es decir, producir un evento de endosimbiosis artificial. Para ello usaron células del hongo *Rhizopus microsporus*, a las que les fueron insertadas bacterias. El método utiliza una aguja de 500 a 1000 nanómetros de ancho con una presión de 6.5 bar para perforar la pared celular del hongo, con la que pudieron implantar alrededor de 1 a 30 bacterias por evento de inyección.

En sus primeros ensayos usaron la bacteria *Escherichia coli*, pero los resultados no fueron los esperados, pues se produjo una reacción de defensa por parte del hongo que atrapó a las bacterias y evitó que se transmitieran a las esporas que dan lugar a la siguiente generación del hongo.

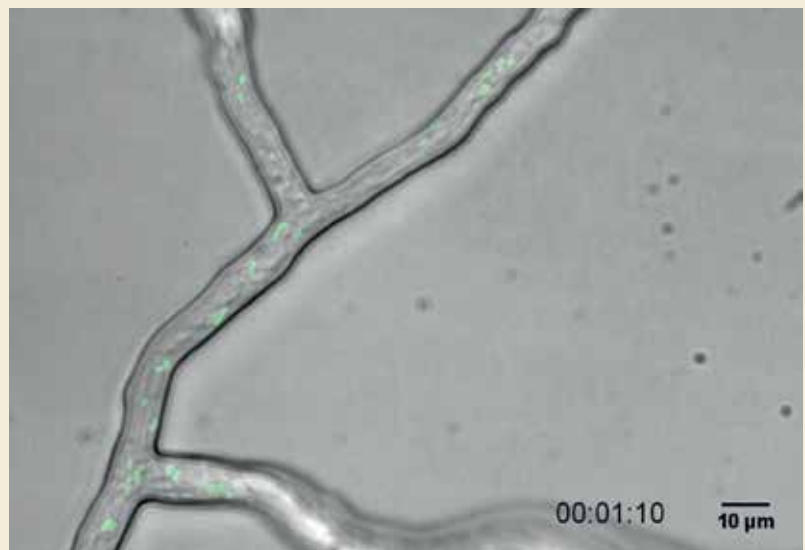
El panorama cambió cuando utilizaron la bacteria *Mycetohabitans rhizoxinica*, pues algunas bacterias lograron pasar a las esporas y ser transferidas a la descendencia. Esta endosimbiosis inducida se mantuvo durante generaciones y su presencia mejoró el número de esporas viables. Además, observaron que la bacteria cooperó con el hongo en la producción de

ciertas moléculas que mejoraron su capacidad para alimentarse y defenderse.

Este tipo de estudios abre la puerta para desarrollar nuevos organismos con características útiles, como la capacidad de consumir dióxido de carbono o nitrógeno atmosférico, que serían difíciles de implementar en otras condiciones.

Más información

G. Giger *et al.* (2024), "Inducing novel endosymbioses by implanting bacteria in fungi", *Nature*, 635:415-422. Disponible en: <doi.org/10.1038/s41586-024-08010-x>, consultado el 20 de noviembre de 2024.



M. rhizoxinica (color verde) dentro de *R. microsporus*. Crédito: G. Giger *et al.* (2024).

Evo, la inteligencia artificial en el genoma

El año pasado, los Premios Nobel destacaron a investigadores que usaron los beneficios de la inteligencia artificial en el campo de la física y la química.

Ahora, Brian Hie, biólogo computacional de la Universidad de Stanford, junto con otros investigadores, desarrolló un modelo de inteligencia artificial multimodal, llamado Evo, que puede interpretar y generar secuencias genómicas a gran escala.

Evo es capaz de analizar millones de genomas microbianos y ha desarrollado, gracias a técnicas de aprendizaje profundo, una comprensión integral del código genético de la vida, analizando desde bases

de ADN individuales hasta genomas completos. Esto le permite predecir cómo pequeños cambios en el ADN pueden afectar a un organismo, generar secuencias realistas del genoma y diseñar nuevos sistemas biológicos.

Para alcanzar este nivel de resultados, sus creadores le entrenaron durante cuatro semanas, en las que aprendió a usar 80 mil genomas de microbios, así como millones de secuencias de virus que atacan a bacterias y fragmentos de ADN conocidos como plásmidos. Ante la posibilidad de que usuarios malintencionados pudieran usar un modelo como Evo para diseñar un arma biológica, los investigadores



Evo, que puede interpretar y generar secuencias genómicas a gran escala. Crédito: Freepik.

eliminaron del conjunto de entrenamiento de la IA las secuencias de cualquier virus que ataque a los humanos u otros organismos eucariotas.

Evo fue sometido a varias pruebas. En primer lugar, se le pidieron predicciones del impacto de algunos tipos de mutaciones en el rendimiento de las proteínas que se producen. El equipo comparó las predicciones de Evo con resultados publicados en los que otros científicos habían inducido las mismas mutaciones en células bacterianas. Evo superó a los modelos de IA anteriores que infieren los efectos de las mutaciones a partir de datos de secuencias de ADN; además, funcionó tan bien como otros modelos de IA que inician su análisis partiendo de secuencias de proteínas.

Posteriormente, con el propósito de probar su capacidad para generar nuevas secuencias, se le pidió que generara nuevas versiones de CRISPR, una nueva técnica de edición genética que utiliza moléculas de ARN y una proteína, denominada Cas, para dirigirse a zonas elegidas del ADN y cortar.

La IA usó más de 70 mil secuencias de ADN bacteriano que codificaban las proteínas y sus ARN. A continuación, el modelo diseñó millones de versiones potenciales de las moléculas. Los investigadores

seleccionaron las 11 variantes más prometedoras y sintetizaron las proteínas en el laboratorio. La mejor variante diseñada por Evo era tan buena para cortar ADN como una versión comercial de la proteína. Sin embargo, también se dieron cuenta de que el programa propuso algunas versiones que no tenían ninguna posibilidad de ser viables.

Finalmente, también se le pidió a Evo que diseñara secuencias de ADN que sirvieran como genomas para bacterias. Sus propuestas contenían muchos de los genes necesarios para que las células pudieran sobrevivir, pero carecían de algunos que eran necesarios.

Estos resultados muestran que tanto Evo como inteligencias artificiales similares podrían ser un paso hacia el diseño de genomas sintéticos de manera más rápida y exitosa. Los investigadores por ahora no tienen planes de comercializar este avance.

Más información

E. Nguyen *et al.* (2024), "Sequence modeling and design from molecular to genome scale with Evo", *Science*, 386(6723). Disponible en: <doi.org/10.1126/science.ado9336>, consultado el 20 de noviembre de 2024.

¿Deberíamos buscar nuevos fármacos contra la malaria?

La malaria (<https://www.revistaciencia.amc.edu.mx/index.php/vol-68-numero-1/460-malaria>) o paludismo es una enfermedad causada por un parásito que se transmite a los humanos a través de la picadura de mosquitos infectados. Es usual que las personas que tienen malaria se sientan muy enfermas, con fiebre alta y escalofríos con temblor.

Recientemente, en África se detectó resistencia a la artemisinina, uno de los fármacos usados para tratar la enfermedad.

La artemisinina elimina rápidamente la mayoría de los parásitos de la malaria en el cuerpo y, combinada con un fármaco asociado que circula en el cuerpo durante más tiempo, mata a los parásitos restantes. Este tratamiento es conocido como terapia combinada basada en la artemisinina (ACT).

En el caso de la malaria grave, que puede cursar con síntomas como convulsiones, problemas respiratorios y hemorragias anormales, el tratamiento es más intensivo. Los médicos administran artesunato (una versión de la artemisinina de acción rápida) por vía intravenosa durante al menos 24 horas. A continuación, se administra ACT.

El estudio que reportó la resistencia analizó a niños de entre 6 meses y 12 años con malaria grave. Descubrieron que 11 de los 100 participantes mostraban resistencia parcial a la artemisinina. Una infección parcialmente resistente se clasifica como aquella en la que el fármaco tarda más de 5 horas en matar la mitad de los parásitos de la malaria.

Se sabe que existen mutaciones en el parásito que pueden dotarle de resistencia a la artemisinina, lo que podría hacer que en el futuro este tratamiento pierda eficacia.

Aunque el estudio no ofrece una respuesta definitiva a la cuestión de si la resistencia a la artemisinina ya está provocando peores resultados clínicos, sí demuestra que los tratamientos actuales para la malaria grave no son tan eficaces como deberían serlo.

Más información

R. Henrici *et al.* (2024), "Artemisinin Partial Resistance in Ugandan Children With Complicated Malaria", *JAMA Network*. Disponible en: <doi.org/10.1001/jama.2024.22343>, consultado el 20 de noviembre de 2024.



La malaria es una de las enfermedades infecciosas de mayor importancia para la humanidad; cada año se infectan entre 300 y 600 millones de personas, con más de un millón de casos fatales por año. Créditos: Freepik.

Noticias de la Academia Mexicana de Ciencias



La AMC dio a conocer a los ganadores de los Premios de Investigación para Científicos Jóvenes 2024

La Academia Mexicana de Ciencias (AMC) dio a conocer a los ganadores de los Premios de Investigación para Científicos Jóvenes 2024. Se trata de la distinción más importante que otorga la AMC a investigadoras e investigadores que no hayan cumplido 40 años, en el caso de los hombres, y 43 años en el de las mujeres.

Desde que se instituyeron en 1961, la Comisión de Premios de la AMC evalúa la investigación de punta y observa criterios como el rigor, la calidad, originalidad e independencia, así como el liderazgo e impacto de los trabajos. A la fecha se ha reconocido a 258 científicas y científicos en las áreas de ciencias exactas, naturales, sociales, humanidades, ingeniería y tecnología, y recientemente en ciencias médicas y de la salud.

Las ganadoras y los ganadores de los Premios de Investigación para Científicos Jóvenes 2024 son:

Ciencias exactas

Abraham Nehemías Meza Rocha

Facultad de Ciencias Físico Matemáticas, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla

Ciencias médicas y de la salud

Omar Yaxmehen Bello Chavolla

Dirección de Investigación, Instituto Nacional de Geriatría, Secretaría de Salud

Ciencias naturales

Antonio Juárez Maldonado

Departamento de Botánica, Universidad Autónoma Agraria "Antonio Narro"

Ciencias sociales

María del Socorro García González

Facultad de Matemáticas, Nodo Chilpancingo, Universidad Autónoma de Guerrero

Humanidades

Fernanda López Escobedo

Escuela Nacional de Ciencias Forenses, Universidad Nacional Autónoma de México

Ingeniería y tecnología

Citlalli Jessica Trujillo Romero

Dirección de Investigación Tecnológica, Instituto Nacional de Rehabilitación, Secretaría de Salud

Talleres de la AMC

La Academia Mexicana de Ciencias, en colaboración con la Universidad Nacional Autónoma de México, a través de la Dirección General de Cómputo y de Tecnologías de Información y Comunicación, organizaron dos conferencias y cinco talleres sobre inteligencia artificial que fueron impartidos por investigadores del Instituto de Investigaciones en Matemáticas Aplicadas y en Sistemas, y el Instituto de Investigaciones Jurídicas de la UNAM, el Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional, el Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica, el Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica y de El Colegio Nacional.

Conferencias

- Miércoles 6 de noviembre de 2024
"Turing, ChatGPT y las visiones de la IA"
Luis Pineda Cortés
IIMAS-UNAM
<https://www.youtube.com/live/7NTxVzcKvtQ>
- Jueves 7 de noviembre de 2024
"Del asombro al miedo: pasado, presente y futuro de la inteligencia artificial"
Carlos Coello Coello
Cinvestav y El Colegio Nacional
<https://www.youtube.com/live/q9BcfpSrHg8>

Talleres

Los talleres se llevaron a cabo del 11 al 15 de noviembre de 2024, en un horario de 17:00 a 20:30 horas.

- AlphaZero: integración de búsqueda simbólica y redes neuronales**
Coordinador: Luis Pineda (IIMAS-UNAM) en colaboración con cuatro investigadores del IIMAS-UNAM: Luis A. Pineda: Introducción; Gibrán Fuentes: Introducción al aprendizaje



profundo; Carlos Ignacio Hernández: Introducción al aprendizaje por refuerzo; Ricardo Cruz y Noé Hernández: Introducción a AlphaZero.

- Nociones de algoritmos genéticos y sus aplicaciones**
Coordinador: Carlos Coello (Cinvestav y El Colegio Nacional).
- Introducción al aprendizaje de máquina**
Coordinador: Luis Enrique Sucar (Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica, INAOE), en colaboración con dos investigadores del INAOE: Hugo Jair Escalante y Eduardo F. Morales.
- Inteligencia artificial aplicada para informática de la salud**
Coordinador: José Luis Morán (Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, IPICYT), en colaboración con tres investigadores del IPICYT: Salvador Ruiz Correa: Panorama de la inteligencia artificial y el aprendizaje de máquina causal; Cesaré Moisés Ovando Vázquez: Panorama del aprendizaje profundo aplicado a las ciencias de la salud; Mishael Sánchez Pérez: Sesión práctica sobre los conocimientos adquiridos (uso del lenguaje R).
- Las tendencias en la regulación de la IA**
Coordinadores: Pedro Salazar y Sergio López Ayllón (Instituto de Investigaciones Jurídicas, UNAM) en colaboración con: Kiyoshi Tsuru (fundador y director de TMI Abogados); Saúl López Noriega (Escuela de Gobierno y Transformación Pública del Tecnológico de Monterrey).

CITA

(Ciencia, Innovación, Tecnología y Academia)

A partir de agosto de 2023, la AMC y el Centro de Ciencias de la Complejidad (C3) de la UNAM dieron inicio a un nuevo programa de conferencias denominado CITA (Ciencia, Innovación, Tecnología y Academia) con el fin de tener un espacio mensual en el que se reúnan miembros de distintas comunidades de la ciencia, la tecnología, la innovación, la comunicación de la ciencia y el público no especializado, para intercambiar perspectivas sobre temas científicos y tecnológicos relevantes y coyunturales. Los encuentros del programa de CITA son coordinados por Julia Tagüeña Parga, Coordinadora de Comunicación del C3, investigadora emérita del Instituto de Energías Renovables de la UNAM y miembro de la AMC. El formato es presencial y también se transmite por los canales de YouTube de la AMC y del C3.

Las conferencias más recientes son:

- 24 de septiembre de 2024
"Cultura científica y comunicación: un binomio inseparable"
Manuel Suárez Lastra
Dirección General de Divulgación de la Ciencia-UNAM
<https://www.youtube.com/live/8pFeQrlle4o>



Al término de la conferencia, se invitó a un panel de especialistas para comentar sobre el tema. Participaron Lourdes Patiño Barba, de Fibonacci y el Comité Promotor del Día Internacional de la Cultura Científica, A. C.; Miguel García Guerrero, de la Red de Popularización de la Ciencia y la Tecnología en América Latina y el Caribe (RedPop) y del Museo de Ciencias de la Universidad Autónoma de Zacatecas; Xavier Soberón Mainero, del Instituto de Biotecnología y del Centro de Ciencias de la Complejidad, UNAM, y Aleida Rueda, del Centro de Ciencias de la Complejidad, UNAM, con Julia Tagüeña, coordinadora de CITA, como moderadora.

- 29 de octubre de 2024
"Mezcal: ciencia, tradición y complejidad"
Alfonso Valiente Banuet
Instituto de Ecología y Centro de Ciencias de la Complejidad, UNAM
<https://www.youtube.com/live/mlvyejVOWvo>

Al término de la conferencia, se invitó a un panel de especialistas para comentar sobre el tema. Participaron Mari Carmen Serra Puche, del Seminario Universitario de Investigación del Patrimonio Cultural del Instituto de Investigaciones Antropológicas de la UNAM, y Antonio del Río, del



Instituto de Energías Renovables y el C3 de la UNAM, con Julia Tagüeña, coordinadora de CITA, como moderadora.

Podcast científico y cultural de la Academia Mexicana de Ciencias



La Academia Mexicana de Ciencias impulsa contenidos de actualidad con interesantes pláticas y reflexiones de miembros de la Academia, así como de distinguidas y distinguidos invitados. La grabación se realiza en las instalaciones de Radio UNAM, con la conducción de Alejandra Galindo y la producción de Edmundo V. Correu. Se puede acceder a los capítulos del podcast en dos plataformas y la distribución está a cargo de Eduardo González y Walter Galván.

YouTube:

<https://www.youtube.com/@AMCciencias/podcasts>

Spotify:

<https://open.spotify.com/show/7zLc28wfByRM8GCnohzwGa>

Los capítulos más recientes han sido:

- “Astronomía en México, eclipse total de Sol, 8 de abril de 2024”

En este episodio tuvimos la oportunidad de conversar con el doctor José Franco, astrofísico mexicano y miembro de la AMC, quien comentó aspectos interesantes de la astronomía. La plática se realizó en el Instituto de Astronomía de la UNAM y trató sobre fenómenos astronómicos sucedidos en el siglo xx, como los eclipses de 1919 y 1923, y como preámbulo al acontecimiento del eclipse solar total que tuvo lugar el 8 de abril de 2024.

<https://open.spotify.com/episode/0pbeXFjGR0ceNBi-HutSXjj?si=8zloxFfcSamIPKp7iqtggw>

Recomendamos visitar el sitio en internet de la *Revista Obsidiana*, que el pasado 26 de febrero celebró su primer aniversario: <https://obsidianadigital.mx/no-6-eclipses/>

- “Arte y matemáticas”

En esta oportunidad conversamos con tres invitados con algo en común: el amor por las matemáticas y el arte. El podcast de la Academia Mexicana de Ciencias presenta una charla en la que se habla de lenguaje matemático, matemáticas aplicadas en los procesos artísticos, inspiración y de los proyectos en la vida de Julia Carrillo, Aubin Arroyo y Enrique Barrios. Este episodio fue grabado en el Museo Universitario de Arte Contemporáneo de la UNAM.

<https://youtu.be/fZjRBE-uXKc?si=tKhOoE3nCMhCp9eD>

Charlas con autores de la revista *Ciencia de la AMC*

Continúan las pláticas que diversos autores, que han contribuido en números recientes de la revista *Ciencia de la AMC*, dictan a través de las redes sociales de esta publicación. Las charlas más recientes han sido:

- 1 de octubre de 2024
“La fauna silvestre mexicana, un recurso biocultural”
Alejandro García Flores
Universidad Autónoma del Estado de Morelos
<https://www.youtube.com/live/jUSYfNAJPv0>



- 15 de octubre de 2024
“El uso tradicional de las plantas medicinales, ¿tiene sustento científico?”
Rosa Virginia García
Instituto de Química Aplicada, uv
<https://www.youtube.com/live/VDn1EJV2ig>



- 5 de noviembre de 2024
"De estetoscopios a dispositivos inteligentes: una revolución del monitoreo materno-fetal"
Jenny Noemí Muñoz Montes de Oca
Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica
<https://www.youtube.com/live/dmi06Gphq04>
- 12 de noviembre de 2024
"Ranas que silban entre las piedras"
José Manuel Serrano
Facultad de Ciencias, UNAM
<https://www.youtube.com/live/7h5eVAxfqsE>



- 19 de noviembre de 2024
"Acuaponía, cultivos del pasado para la alimentación del futuro"
Jesús Josafat de León Ramírez
Universidad Autónoma de Querétaro
https://www.youtube.com/live/LTOg92X0a_w

- 26 de noviembre de 2024
"Las plantas y la luz solar"
Roberto Carlos Barragán Campos
Universidad de Guadalajara
<https://www.youtube.com/live/ihlf1gW-kww>

Webinar "Tu mundo con ciencia"

Continúa el ciclo de conferencias "Tu mundo con ciencia", impartido por exbecarias ganadoras de las Becas para Mujeres en la Ciencia L'Oréal-Unesco-AMC. Las pláticas se llevan a cabo el segundo jueves de cada mes y son transmitidas por los canales de las redes sociales de la AMC. Las conferencias están orientadas a jóvenes de nivel bachillerato, para fomentar las vocaciones científicas. En el mes de agosto de 2024 inició su tercera temporada. Las conferencias más recientes son:

- 10 de octubre de 2024
"Orden en el caos: impresoras que crean vida"
Grissel Trujillo de Santiago
Escuela de Ingeniería y Ciencias del Tecnológico de Monterrey
<https://www.youtube.com/live/bYHDzT9LSpw>





- 14 de noviembre de 2024
"Plásticos sustentables e innovadores: impulsando la economía circular"
Dora Iliana Medina
<https://www.youtube.com/live/5QsGXE7gwyM>

Noche de las Estrellas

La Noche de las Estrellas está organizada por la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), el Instituto de Astronomía de la UNAM (IA), la Academia Mexicana de Ciencias (AMC), el Instituto Politécnico Nacional (IPN), el Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica (INAOE), la Asociación Mexicana de Planetarios (Ampac), la Agencia Espacial Mexicana (AEM) y las Sociedades Astronómicas de la Noche de las Estrellas (Sande).

La edición del presente año se celebró el 9 de noviembre en más de 100 sedes a lo largo y ancho del país. En esta ocasión,



En la sede de las Islas de Ciudad Universitaria de la UNAM asistieron 60 mil personas, se colocaron 200 telescopios y 57 carpas con conferencias y talleres. Fotografía: José Eduardo González / AMC.



La Noche de las Estrellas se ha realizado en México desde el año 2009. Fotografía: José Eduardo González / AMC.

se celebró la vida y obra de Marie Curie, primera persona y única mujer hasta hoy en ganar dos Premios Nobel: uno de física y otro de química, a 90 años de su partida.

En las sedes, además de la observación del cielo con telescopios, también hubo talleres de ciencia, música, teatro, cuentacuentos, planetarios y muchas cosas más para el público de todas las edades. Cabe destacar que en la sede de Ciudad Universitaria de la UNAM se contó con una plática del astronauta José Hernández.

Junto con el homenaje a Marie Curie, también se celebró a la primera astrónoma profesional en México, Marie Paris Pişmiş de Recillas, fallecida hace 25 años, quien fue una de las personas más influyentes para que la astronomía mexicana tomara importancia a nivel mundial.

En nuestro próximo número
de abril-junio de 2025

LOGROS DE LA INTELIGENCIA ARTIFICIAL EN MÉXICO

