

Contactos, Revista de Educación en Ciencias e Ingeniería

Abril - Junio 2023

ISSN: 2683-2607

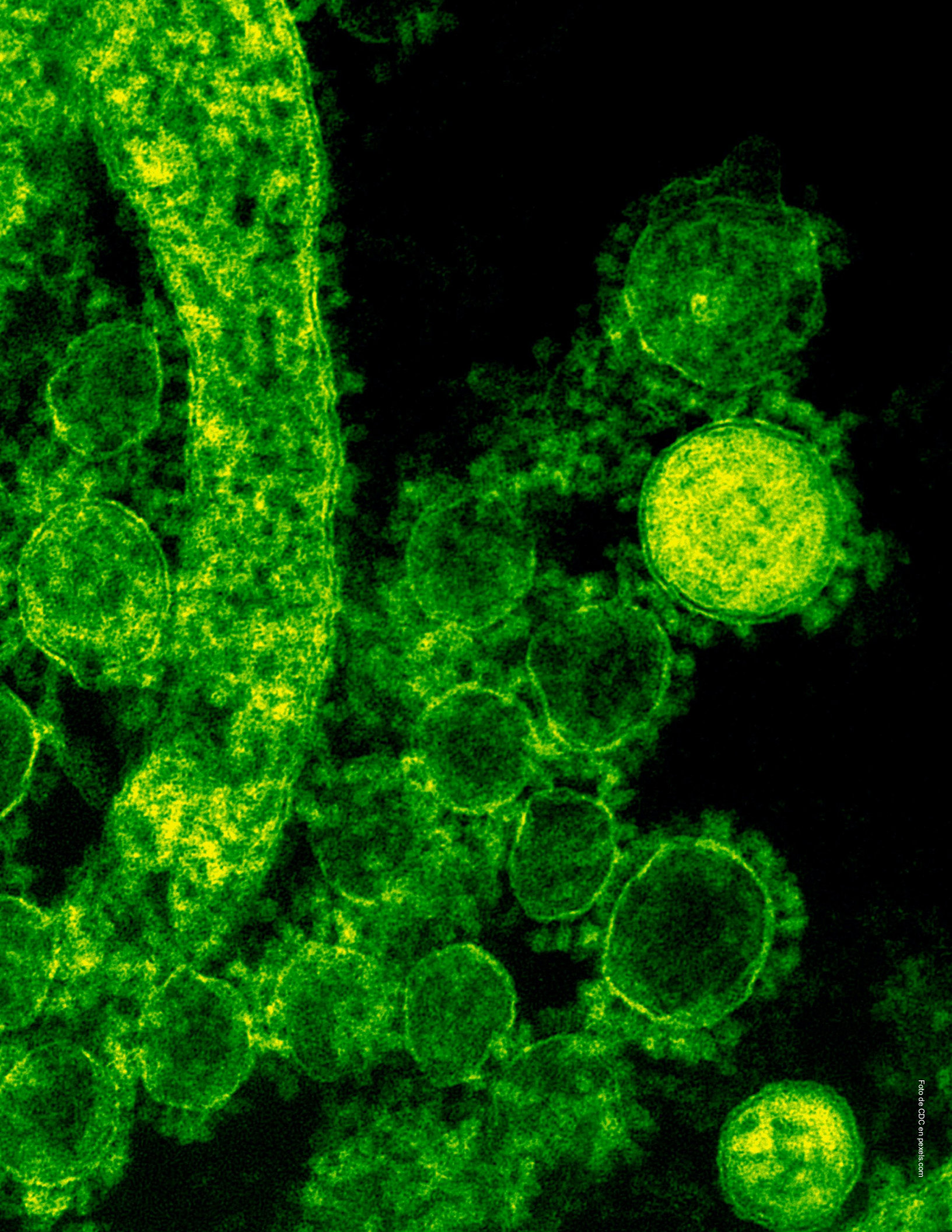
No. 129

**Apuntes sobre el anuncio
de la Fusión Nuclear en EEUU**

**¿Por qué los fármacos son
contaminantes del ambiente?**

**Papel de los canales iónicos de la
membrana celular en la respuesta inmune**

**Índice de Estado Ecosistémico de Barrancas
(IEEB); una metodología para
evaluar barrancas urbanas**



Contenido

Contactos, Revista de Educación en Ciencias e Ingeniería

No. 129 Abril - Junio 2023

		<i>Papel de los canales iónicos de la membrana celular en la respuesta inmune</i>	
Editorial	3	Dr. J. Rafael Godínez Fernández Dr. Gerardo J. Félix-Martínez	39
<i>Apuntes sobre el anuncio de la Fusión Nuclear en EEUU</i>	5	<i>¿Por qué los fármacos son contaminantes del ambiente?</i>	48
Dr. Román Linares Romero		Dra. Araceli Tomasini César Macías Paredes	
<i>Índice de Estado Ecosistémico de Barrancas (IEEB); una metodología para evaluar barrancas urbanas</i>	12	<i>La diversidad taxonómica, filogenética y funcional: un acercamiento al caso de "El Arca de Noé"</i>	56
Dr. Víctor Gutiérrez Pacheco, Dra. Sonia Emilia Silva Gómez y M. en C. Laura Leonor Varela Olguín		M. C. Alexis Arriaga Ramírez	
<i>María Goeppert-Mayer y su primer descubrimiento científico: la absorción de dos fotones</i>	29	<i>Método Montante: Una alternativa para la solución en la intercepción de dos ecuaciones lineales dentro de método gráfico</i>	65
Fis. Raquel Baza Medina Dr. Luis Guillermo Mendoza Luna Dr. César Augusto Guarín Durán Dr. Emmanuel Haro Poniatowski Dr. José Luis Hernández Pozos		Mtro. Marco Antonio González Morales	

Contactos, Revista de Educación en Ciencias e Ingeniería
en la WEB

Lea los artículos publicados en
<https://contactos.izt.uam.mx>



Casa abierta al tiempo
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA METROPOLITANA



ÍNDICE DE REVISTAS MEXICANAS
DE DIVULGACIÓN CIENTÍFICA Y TECNOLÓGICA

Rector General

Dr. José Antonio de los Reyes Heredia

Secretaria General

Dra. Norma Rondero López

UNIDAD IZTAPALAPA

Rectora

Dra. Verónica Medina Bañuelos

Secretario

Dr. Javier Rodríguez Lagunas

Director de la División de Ciencias

Básicas e Ingeniería

Dr. Román Linares Romero

Director de la División de Ciencias

Biológicas y de la Salud

Dr. José Luis Gómez Olivares

Contactos, Revista de Educación en Ciencias e Ingeniería:

Consejo Editorial:

Dra. Verónica Medina Bañuelos

Dr. Javier Rodríguez Lagunas

Dr. Román Linares Romero

Dr. José Luis Gómez Olivares

UAM- Iztapalapa

Editora en Jefe:

M. C. Alma Edith Martínez Licona

Asistente Editorial:

Lic. Paula López Andrés

Comité Editorial por CBS:

Dra. Edith Arenas Ríos, Dra. Laura Jose-

fina Pérez Flores, Dr. Pedro Luis Valverde

Padilla

Por CBI:

Dr. Hugo Ávila Paredes

Por la Universidad Iberoamericana:

Mtro. Adolfo G. Fink Pastrana

CONTACTOS, REVISTA DE EDUCACIÓN EN CIENCIAS E INGENIERÍA.

3ª Época, No. 129, Abril - Junio 2023, es una publicación trimestral de la Universidad Autónoma Metropolitana a través de la Unidad Iztapalapa, División de Ciencias Básicas e Ingeniería y División de Ciencias Biológicas y de la Salud. Prolongación Canal de Miramontes 3855, Col. Ex-Hacienda San Juan de Dios, Alcaldía Tlalpan, C.P. 14387, México, Ciudad de México y Av. Ferrocarril San Rafael Atlixco 186, Col. Leyes de Reforma 1a Sección, Iztapalapa, Cd. de México. C.P. 09310, Edificio T144, Tel. 5804 – 4600. Ext. 114 Página electrónica de la revista: <https://contactos.izt.uam.mx/> y dirección electrónica: cts@xanum.uam.mx Editora responsable MC Alma E. Martínez Licona. Certificado de Reserva de Derechos al Uso Exclusivo de Título No. 04-2013- 042212044000-203, ISSN 2683-2607, ambos otorgados por el Instituto Nacional del Derecho de Autor. Responsable de la última actualización de este número, Mtra. Alma E. Martínez Licona; Unidad Iztapalapa, División de CBI y CBS; fecha de última modificación 20 de Junio de 2023. Tamaño del archivo 14.9 MB.

Las opiniones expresadas por los autores no necesariamente reflejan la postura del editor de la publicación.

Queda estrictamente prohibida la reproducción total o parcial de los contenidos e imágenes de la publicación sin previa autorización de la Universidad Autónoma Metropolitana.

Fecha de Publicación: Abril - Junio 2023.

Los artículos publicados en **Contactos, Revista de Educación en Ciencias e Ingeniería** son sometidos a arbitraje; para ello se requiere enviar por mail el trabajo en Word. Toda correspondencia deberá enviarse a:
Comité Editorial de **Contactos, Revista de Educación en Ciencias e Ingeniería**,
UAM – Iztapalapa, T144, Tel. 5804-4600. Ext. 1144
Av. Ferrocarril San Rafael Atlixco 186. C.P. 09310
<https://contactos.izt.uam.mx/> e-mail cts@xanum.uam.mx

Editorial

Estamos llegando a la mitad del año, tratando de darle a nuestros lectores números que cuenten con artículos diversos e interesantes, este número no es la excepción, presentando artículos que lograrán atrapar la atención de nuestros amables lectores quienes irán descubriendo temas, tal vez nuevos para muchos, al paso de cada página.

A su vez, agradecemos a nuestros amables autores por considerar a nuestra revista para publicar, lo cual no es nada fácil, escribir artículos de divulgación, poner sus conocimientos a un nivel que nuestros lectores comprendan de forma fácil, siendo muchos ajenos a éstos, es todo un reto.

Este número en especial recibe autores de la Universidad Autónoma de Puebla, de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, del Centro Universitario de la Ciénega de la Universidad de Guadalajara y de nuestra querida Universidad Autónoma Metropolitana unidad Iztapalapa. Gracias a cada uno y esperamos recibir más autores de éstas y más universidades nacionales e internacionales.

Sin más, disfruten este número.

Atentamente

MC Alma Edith Martínez L.



Información para autores

Contactos, Revista de Educación en Ciencias e Ingeniería, Revista dirigida a profesores y a estudiantes de estas disciplinas.

Está registrada en el índice de revistas de divulgación de Conacyt, así como en Latindex, Sistema Regional de Información en Línea para Revistas Científicas de América Latina, el Caribe, España y Portugal.

Para publicar, los trabajos deberán ser originales y accesibles a un público amplio con formación media superior o universitaria pero no especializada; los temas deberán presentarse en forma clara. Cada colaboración debe incluir figuras, diagramas, ilustraciones, fotografías, etc. (otorgando el crédito correspondiente en caso de no ser original), que hagan más accesible la presentación.

Las secciones que la constituyen son:

1. Divulgación. Artículos que presentan temas científicos con enfoques novedosos y accesibles (15 cuartillas).

2. Educación científica. Enfoques originales en la enseñanza de temas particulares (15 cuartillas).

3. Artículos especializados. Reportes breves de investigación, relacionados con una problemática concreta (15 cuartillas).

4. Crónicas. Historia y desarrollo de conceptos científicos, así como teorías alternativas (15 cuartillas).

5. Divertimentos. Juegos y acertijos intelectuales (5 cuartillas).

6. Noticias breves. Información de actualidad en el mundo de la ciencia (4 cuartillas).

7. Los laureles de olivo. Los absurdos de la vida cotidiana y académica (4 cuartillas).

En todos los casos se debe incluir los nombres completos de los autores con su adscripción, dirección, teléfono y dirección de correo electrónico.

Normas

Las colaboraciones a las secciones 1 a 4 deberán ajustarse a las siguientes normas:

1. Resumen escrito en español e inglés.
2. 4 palabras clave en español e inglés.
3. Cuando se incluya una abreviatura debe explicarse por una sola vez en la forma siguiente: Organización de los Estados Americanos (OEA). . .
4. Cuando se utilice un nombre técnico o una palabra característica de una disciplina científica deberá aclararse su significado de la manera más sencilla posible.

5. Las citas textuales deberán ir de acuerdo al siguiente ejemplo: En cuanto la publicación del placebo se asevera que “el efecto placebo desapareció cuando los comportamientos se estudiaron en esta forma” (Núñez, 1982, p.126).

6. Las referencias (no más de 10) se marcarán de acuerdo al siguiente ejemplo: Sin embargo, ese no es el punto de vista de la Escuela de Copenhagen (Heisenberg, 1958), que insiste en. . .

7. Al final del artículo se citarán las referencias por orden alfabético de autores. Pueden añadirse lecturas recomendadas (no más de 5).

8. Cada referencia a un artículo debe justarse al siguiente formato: Szabadváry, F. y Oesper, E., Development of the pH concept, J. Chem. Educ, 41 [2], pp.105 -107, 1964.

9. Cada referencia a un libro se ajustará al siguiente formato: Heisenberg, W., Physics and Philosophy. The Revolution in Modern Science, Harper Torchbook, Nueva York, pp.44-58, 1958. 10. Para páginas electrónicas: dirección (fecha de acceso).

11. Los títulos de reportes, memorias, etcétera, deben ir subrayados o en itálicas.

Envío y características del artículo

El envío del artículo deberá ser en archivo electrónico, en Word, tipo de letra Times New Roman, tamaño 12 con interlineado sencillo y uso de editor de ecuaciones.

En el caso de ilustraciones por computadora (BMP, JPG, TIFF, etc.) envíelos en archivos por separado. El material es recibido en:

Contactos, Revista de Educación en Ciencias e Ingeniería.

UAM – Iztapalapa, T144,

Información: cts@xanum.uam.mx,

Tel. 5804-4600. Ext. 1144.

Av. Ferrocarril San Rafael Atlixco 186.

C.P. 09310

Arbitraje

El Comité utiliza un sistema de arbitraje anónimo que requiere un mes. Se entiende que los autores no han enviado su artículo a otra revista y que dispondrán de un plazo máximo de un mes para incorporar las observaciones de los árbitros.

La decisión final de publicar un artículo es responsabilidad exclusiva del Comité Editorial.

Apuntes sobre el anuncio de la Fusión Nuclear en EEUU

Dr. Román Linares Romero
Departamento de Física, UAM-Iztapalapa

Resumen: En este artículo de divulgación damos algunos elementos que permiten entender de mejor manera el anuncio hecho por la secretaria de energía de los EEUU, Jennifer Granholm, de los resultados obtenidos en la National Ignition Facility sobre el primer evento de fusión nuclear donde se obtuvo una energía mayor a la introducida para provocar la ignición.

El pasado 13 de diciembre de 2022, la secretaria de energía de EEUU, Jennifer Granholm (JG), anunció al mundo a través de una conferencia de prensa transmitida en vivo, el éxito histórico logrado por la National Ignition Facility (NIF), al haber logrado por primera vez un proceso de fusión nuclear donde la energía para producirla era menor que la energía obtenida. En este artículo damos algunos apuntes breves sobre el anuncio realizado, con la intención de dar elementos para entenderlo de mejor manera. El formato que seguiremos consiste en citar textualmente, fragmentos del discurso de la secretaria Granholm, para posteriormente contextualizar y explicar un poco más a fondo lo expresado.

JG: Los investigadores de Livermore y de todo el mundo han estado trabajando en este momento durante más de 60 años.

El anuncio se refiere a un resultado obtenido en el Laboratorio Nacional Lawrence Livermore (LLNL, por sus siglas en inglés), localizado al este de Livermore, en California, el cual es un centro de desarrollo e investigación financiado principalmente con fondos federales de los EEUU. De acuerdo con su página de internet, la misión que ha impulsado el trabajo del LLNL es aplicar la ciencia y tecnología para hacer del mundo un lugar más seguro “Mientras tenemos en mente nuestros compromisos cruciales impulsados por la

misión, aplicamos ciencia y tecnología de vanguardia para lograr avances en la disuasión nuclear, el contraterrorismo y la no proliferación, la defensa y la inteligencia y la seguridad energética y ambiental”. El laboratorio fue fundado en 1952 con el nombre de Lawrence Radiation Laboratory at Livermore como una filial del Laboratorio de Radiación de la Universidad de California en Berkeley y pasó a ser conocido como Laboratorio Lawrence Livermore en 1971. Los científicos Edward Teller y Ernest O. Lawrence, este último quien fungía como director del Laboratorio de Radiación de Berkeley, fueron los cofundadores del LLNL. En su origen se pretendía que el LLNL compitiera con el laboratorio de diseño de armas nucleares del Laboratorio Nacional de Los Álamos, Nuevo México, cuna del Proyecto Manhattan. Su primer director, Hermet York se aseguró que el nuevo laboratorio adoptara el punto de vista de la “gran ciencia”, abordando proyectos que suponían un reto con físicos, químicos, ingenieros y científicos de la computación trabajando juntos en equipos multidisciplinarios.

El NIF es un proyecto de investigación sobre fusión nuclear por confinamiento inercial que se desarrolla en el LLNL. El 5 de diciembre de 2022, obtuvo por primera vez un factor de ganancia positivo, es decir, las reacciones de fusión desencadenadas durante el experimento generaron más energía de la suministrada al combustible, convirtiéndose en el primer laboratorio en conseguir un factor de ganancia positiva.

JG: ¿Qué hace este logro? dos cosas, primero, fortalece nuestra seguridad nacional porque abre un nuevo ámbito para mantener una disuasión nuclear segura y efectiva, en una era en la que no tenemos pruebas nucleares, la ignición nos permite replicar

por primera vez ciertas condiciones que son encontrado solo en las estrellas y el sol.

La idea de la fusión nuclear se remonta a principios del siglo XX. El físico británico Arrthur Eddington fue uno de los primeros en proponer la posibilidad de que las estrellas, incluido nuestro sol, obtengan su energía a través de la fusión nuclear. En la década de 1930, el astrofísico alemán Hans Bethe, desarrolló las teorías y cálculos detallados que explican el proceso de fusión en el sol. En parte por estos trabajos fue merecedor del premio Nobel de Física en 1967.

Grosso modo la fusión nuclear es un proceso termonuclear (proceso en el cual se involucran temperaturas extremadamente altas) en el cual dos núcleos atómicos se unen para formar un núcleo más pesado, liberando una gran cantidad de energía en el proceso (reacción exotérmica). Es importante señalar que es necesario introducir un proceso de ignición al sistema, para que se produzca la fusión. A este punto es conveniente introducir una analogía, la combustión del fósforo de un cerillo al estar en contacto con el oxígeno del aire generan una reacción química exotérmica, sin embargo, la reacción no se produce espontáneamente, para producirla se necesita una energía de activación que en la analogía es la producida por el rozamiento entre el fósforo y la parte rugosa de la caja de cerillos. Una vez aportada esta energía, la reacción se autosostiene y produce energía que podemos aprovechar. Algo similar ocurre en el caso de la fusión nuclear, para lograrla se necesita un mecanismo de ignición.

La ignición en la fusión nuclear consiste en proveer a los núcleos atómicos de suficiente energía cinética de manera tal

que contrarresten la repulsión eléctrica entre ellos (recordemos que los núcleos atómicos tienen carga eléctrica positiva y que cargas del mismo tipo se repelen mutuamente), permitiéndoles acercarse significativamente (del orden de 1 fermi = 0.000000000000001m) para que la interacción nuclear fuerte se encargue de unirlos. Esto es equivalente a decir que los núcleos deben estar a temperaturas muy altas: del orden de 10 000 000 °C en el núcleo del Sol y en el NIF a 3 300 000 °C.

A tan altas temperaturas la materia se encuentra en un estado conocido como el cuarto estado de la materia, el estado de **plasma**. En muchos aspectos el plasma se comporta como un gas pero debido a que a estas temperaturas los enlaces entre electrones y núcleos de un átomo se rompen, el plasma está compuesto de iones y electrones.

Existen dos parámetros adicionales que se deben cuidar para que la fusión tenga oportunidad de iniciarse. Además de la **alta temperatura** es necesario tener una **alta densidad** de plasma durante un **tiempo suficiente** a fin de permitir que ocurran suficientes reacciones de fusión nuclear para obtener una ganancia neta de energía. El plasma al estar caliente, tiende a expandirse, así para lograr tener alta densidad es necesario tener un mecanismo de confinamiento. La combinación de los tres parámetros nos lleva al concepto de **tiempo de confinamiento**, el cual se define como el tiempo que se mantiene el plasma a una temperatura por encima de la temperatura de ignición crítica. Para producir más energía de fusión que la invertida en calentar el plasma, el medio debe ser mantenido a esta temperatura durante un período de tiempo mínimo.

Para lograr el confinamiento del plasma existen principalmente tres posibilidades: 1) Confinamiento gravitatorio. En este caso es la interacción gravitacional la que confina el plasma. Es el que se da como proceso natural en las estrellas pero no es reproducible a escala terrestre. 2) Confinamiento magnético. En este caso el plasma de baja densidad a elevadas temperaturas se mantiene confinado mediante campos magnéticos, lo cual es posible gracias a que el plasma está formado por partículas cargadas. Este tipo de confinamiento se utiliza en varios laboratorios y 3) Confinamiento inercial. En este caso una pequeña cápsula de combustible se comprime inercialmente, generalmente mediante láseres de gran potencia. Con este método se contiene el plasma durante muy poco tiempo pero a densidades extremadamente altas, lo que permite que se produzcan muchas reacciones. Este es el tipo de confinamiento utilizado en el NIF.

Específicamente el NIF logró la ignición utilizando 192 láseres gigantes que hicieron estallar una pastilla que contenía átomos de hidrógeno encerrados en diamante. En un breve instante de tiempo, que duró menos que un suspiro (100 trillonésimas de segundo) 2.05 megajules de energía bombardearon la pastilla de hidrógeno, provocando la salida de neutrones que transportaban unos 3 megajules de energía, logrando así un factor de 1.5 de ganancia energética.

JG: y lo segundo que hace, por supuesto, es que este hito nos acerca un paso significativo a la posibilidad de una energía de fusión con cero emisiones de carbono y abundante energía para nuestra sociedad. Si podemos hacer avanzar la energía de fusión, podríamos usarla para producir electricidad limpia. Industrias mucho

más, sería como agregar un taladro eléctrico a nuestra caja de herramientas para construir esta economía de energía limpia.

La demanda energética mundial ha aumentado constantemente en las últimas décadas debido a la creciente población global, la urbanización y al desarrollo industrial y tecnológico en diferentes países. La forma de generar esta energía a nivel mundial se puede agrupar en 4 grandes formas: 1) Los combustibles fósiles, los cuales generan aproximadamente el 64% de la electricidad mundial, siendo el carbón la fuente más utilizada, seguido del gas natural y luego el petróleo. 2) La energía hidroeléctrica es una de las fuentes renovables más utilizadas y representa alrededor del 16% de la generación de electricidad a nivel mundial. Sin embargo, su participación puede variar considerablemente según el país y la disponibilidad de recursos hidroeléctricos. 3) La energía nuclear, la cual representa aproximadamente el 10% de la generación de electricidad a nivel mundial. Algunos países, como Francia, dependen en gran medida de la energía nuclear para satisfacer sus necesidades energéticas, mientras que otros tienen una participación menor o han optado por eliminar gradualmente esta fuente de energía y 4) Energía renovable (excluyendo la hidroeléctrica). Las fuentes renovables, que incluyen la energía eólica, la energía solar, la energía de biomasa y la energía geotérmica, están experimentando un crecimiento significativo en todo el mundo. En conjunto, representan aproximadamente el 10% de la generación de electricidad global. Sin embargo, su participación está en constante aumento debido a los esfuerzos para fomentar la transición hacia una matriz energética más sostenible.

Es necesario tomar medidas para satisfacer la creciente demanda de energía de

manera sostenible, promoviendo la eficiencia energética, la diversificación de las fuentes de energía y el desarrollo de tecnologías más limpias y renovables. Esto es fundamental para abordar los desafíos relacionados con el cambio climático y asegurar un suministro energético seguro y sostenible para el futuro.

La fusión nuclear tiene el potencial de abordar y contribuir significativamente al problema energético mundial de varias maneras: 1) Es una fuente de energía abundante, la fusión nuclear utiliza isótopos de hidrógeno, como el deuterio y el tritio, que se encuentran en abundancia en el agua de mar y en otros recursos. Estos combustibles son prácticamente inagotables en comparación con los combustibles fósiles limitados, lo que proporciona una fuente de energía a largo plazo y reduce la dependencia de recursos agotables. 2) Posee bajas emisiones y sostenibilidad, la fusión nuclear no emite gases de efecto invernadero. No produce emisiones de dióxido de carbono (CO₂) ni otros contaminantes atmosféricos dañinos, lo que la convierte en una fuente de energía limpia y sostenible. Al no depender de combustibles fósiles, se reduce la huella ambiental y se promueve una economía baja en carbono. 3) Tiene una mejor gestión de residuos. En comparación con la fisión nuclear, la fusión nuclear produce residuos radiactivos de corta duración y en menor cantidad. Estos residuos son menos radiactivos y tienen una vida útil más corta, lo que facilita su gestión y minimiza los desafíos asociados con la gestión y el almacenamiento a largo plazo de los desechos nucleares y 4) Tiene un potencial de generación de energía masiva. La fusión nuclear tiene el potencial de generar grandes cantidades de energía en un espacio relativamente pequeño. La energía liberada por la fusión nuclear es

considerablemente mayor que la obtenida de otras fuentes de energía convencionales, como la quema de combustibles fósiles. Esto significa que la fusión nuclear podría satisfacer la creciente demanda energética mundial de manera efectiva.

Sin embargo, es importante tener en cuenta que la fusión nuclear todavía está en una etapa de desarrollo y enfrenta desafíos técnicos y de ingeniería significativos. La creación de un reactor de fusión comercial, económicamente viable es un objetivo complejo que requiere avances tecnológicos y una inversión continua en investigación y desarrollo. A pesar de estos desafíos, la fusión nuclear ofrece un gran potencial como una fuente de energía limpia, segura y abundante para el futuro.

JG: afortunadamente, la inversión del sector privado y la investigación de fusión ya están en auge, alcanzaron casi 3 mil millones de dólares solo el año pasado y hemos escuchado de profesores que el interés entre los estudiantes nunca ha sido tan alto, lo cual es excelente y es por eso que la administración de Biden-Harris tiene como objetivo capitalizar en este momento.

La inversión mundial en investigación en fusión nuclear ha ido aumentando en los últimos años debido al creciente interés y reconocimiento de su potencial como fuente de energía limpia y sostenible. Aunque los datos exactos pueden variar y es difícil obtener cifras precisas, existen varios proyectos y colaboraciones internacionales que han recibido inversiones significativas en investigación y desarrollo de la fusión nuclear.

Adicionalmente al desarrollo del LLNL descrito más arriba, Bill Gates cofundador de Microsoft y Samuel Altman CEO de

OpenAI, han invertido millones de dólares con el objetivo de utilizar la fusión nuclear para producir electricidad a bajo costo. Estas inversiones tomaron más fuerza luego de que el NIF lograra, una fusión nuclear con ganancia neta de energía.

Uno de los proyectos más destacados es el ITER (International Thermonuclear Experimental Reactor), que es un proyecto colaborativo entre 35 países. El objetivo del ITER es construir y operar un reactor de fusión experimental a escala de demostración para probar la viabilidad técnica y científica de la fusión nuclear como fuente de energía. Según los informes, el costo total del proyecto ITER se estima en alrededor de 20 mil millones de euros.

Además del ITER, varios países y organizaciones también realizan investigaciones independientes en fusión nuclear. Por ejemplo, China ha aumentado su inversión en investigación y desarrollo de fusión nuclear y está construyendo su propio dispositivo de fusión, el Reactor de Fusión Experimental Avanzado (EAST).

En cuanto a la inversión global en investigación en fusión nuclear, es difícil proporcionar una cifra exacta. Sin embargo, se estima que la inversión acumulada en investigación y desarrollo de la fusión nuclear en todo el mundo ha alcanzado varios miles de millones de dólares.

Es importante tener en cuenta que la inversión en investigación y desarrollo de la fusión nuclear varía de un país a otro y depende de los recursos disponibles, las políticas gubernamentales y las prioridades nacionales. Sin embargo, en general, la inversión en investigación en fusión nuclear ha aumentado en los últimos años debido al reconocimiento de su importancia para

abordar los desafíos energéticos y climáticos globales.

La secretaria concluyó su presentación con las siguientes palabras.

JG: El anuncio de hoy es un gran paso hacia el objetivo del presidente de lograr fusión comercial dentro de una década, pero aún queda mucho por hacer, mucho más, continuaremos trabajando hacia ese objetivo y encontraremos otras formas de progresar para alcanzar la Energía por Fusión, por ejemplo. en septiembre, el departamento de energía realizó una inversión de 50 millones de dólares para asociaciones público-privadas, para comenzar a trabajar en diseños de plantas piloto de fusión y nos estamos asociando con la oficina de políticas de ciencia y tecnología para trazar la visión audaz del presidente para impulsar esa fusión comercial en la próxima década con los más altos estándares de seguridad, con un despliegue equitativo rentable que posiciona a las empresas estadounidenses para liderar y a las comunidades para prosperar y con una fuerza laboral capacitada que es diversa e inclusiva. Gracias a la NSA (Agencia de Seguridad Nacional), a la Administración Nacional de Seguridad Nuclear y a todos los que han estado involucrados en este avance de fusión que pasará a los libros de historia.

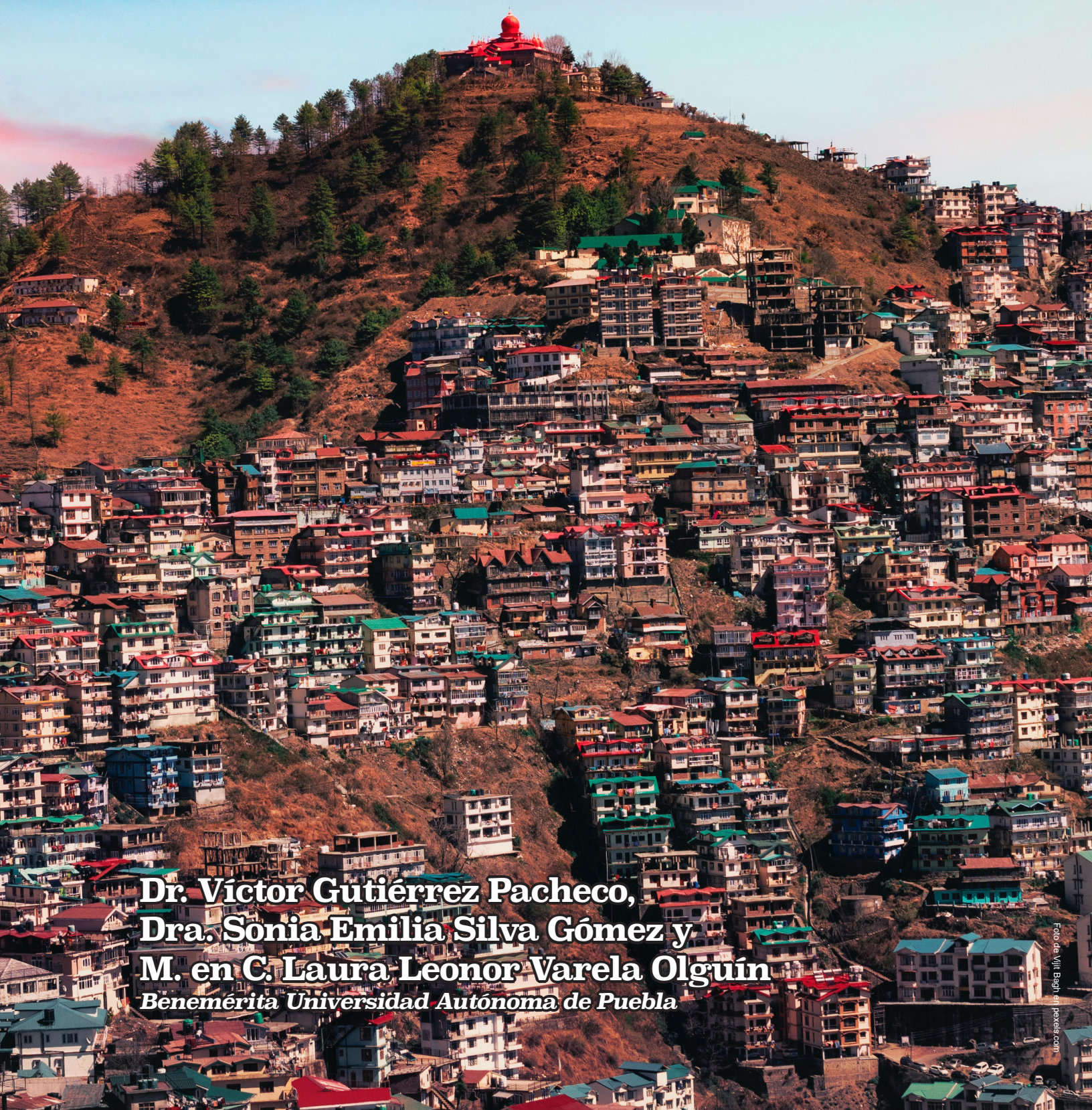
La historia continuará

Bibliografía y recursos utilizados:

- Conferencia de prensa de la secretaria de energía de EEUU, Jennifer Granholm. Video disponible en YouTube: <https://www.youtube.com/watch?v=r91Q-4dAHnUw>
- Página web del Laboratorio Nacional

- Lawrence Livermore: <https://www.llnl.gov/>
- Kevin Fernández Cosials y Alfonso Barbas Espa (coordinadores del proyecto), Curso básico de fusión nuclear, Madrid, 2017.
 - ¿Es posible desarrollar otras fuentes de energía? Unos científicos apuestan por la fusión nuclear. Por Kenneth Chang, New York Times, 16 de diciembre de 2022.
 - Laboratorio Nacional Lawrence Livermore, Wikipedia.
 - La millonaria apuesta por utilizar a la fusión nuclear para producir electricidad a bajo costo. CNN Español, 12 de mayo de 2023. <https://cnnespanol.cnn.com/video/fusion-energia-nuclear-electricidad-laboratorio-nacional-lawrence-inversiones-organismo-clix/>
 - Chat GPT.

Índice de Estado Ecosistémico de Barrancas (IEEB); una metodología para evaluar barrancas urbanas



**Dr. Víctor Gutiérrez Pacheco,
Dra. Sonia Emilia Silva Gómez y
M. en C. Laura Leonor Varela Olguín**
Benemérita Universidad Autónoma de Puebla

Resumen

Las barrancas son formaciones geológicas características de la ciudad de Puebla y de otras ciudades del Altiplano Central de México. Actualmente sufren procesos de degradación, que comprometen su viabilidad, en acciones como disposición de contaminantes sólidos y líquidos, asentamientos humanos irregulares, extracción de materiales pétreos, deforestación, invasión de especímenes exógenos y sobrepastoreo, entre otros. Esto a pesar de evidencias en el sentido de que las barrancas urbanas proveen servicios ecosistémicos a la urbe como: control de la erosión y formación de suelo, control de inundaciones, recarga de acuíferos, refugio y hábitat de especies residentes y migratorias, y regulación del clima local y global, entre otros. Para una ciudad como Puebla, con carencia de espacios arbolados y áreas de conservación ecológica, las barrancas se constituyen en los pocos espacios con potencial para contribuir a abatir dicho déficit, de ahí que se precisa actuar hacia su recuperación y conservación, para lo cual se hace necesario generar metodologías que provean información sobre las mismas. El objetivo de este trabajo fue el desarrollar una metodología de evaluación de barrancas urbanas, ante su inexistencia, que provea información sobre el estado ecosistémico en que se encuentran, así como probar dicha metodología en dos barrancas de la ciudad. A través de técnicas cualitativas multicriterio, se diseñó una metodología de diagnóstico simplificada, que conforma el Índice de Estado Ecosistémico de Barrancas (IEEB), el cual se aplicó en las barrancas Malinalli y El Conde. El IEEB quedó conformado por 9 indicadores, cuyo eje central es la evaluación del componente forestal leñoso, así como de otros elementos propios de la presencia antrópica. De acuerdo al IEEB, la barranca Malinalli

presentó un estado ecosistémico excelente, mientras la barranca El Conde un estado pobre, conforme a una escala propuesta de cinco valores. La aplicación del índice permitió observar el comportamiento independiente entre los indicadores, su capacidad para describir las condiciones de las barrancas y su sensibilidad a las diferencias ecosistémicas de las mismas. Así como contrastar las condiciones de las barrancas, producto de la actividad antrópica en los sitios.

Abstract

The ravines are characteristic geological formations of the city of Puebla and other cities of the Central Highlands of Mexico. Currently, they are suffering degradation processes, that risk their viability. Actions like disposal of solid and liquid pollutants, irregular human settlements, extraction of stone materials, deforestation, invasion of exogenous specimens and overgrazing, among others are common, despite the evidence that has shown that urban ravines provide ecosystem services to the city such as: erosion control and soil formation, flood control, aquifer recharge, refuge and habitat for resident and migratory species, and regulation of the local and global climate, among others. For a city like Puebla, with a lack of wooded spaces and ecological conservation areas, the ravines constitute the few spaces with the potential to contribute to reducing this deficit. Hence, it is necessary to act towards their recovery and conservation. For this reason, it is necessary to generate methodologies that provide information about them. The objective of this work was to develop a methodology for evaluating urban ravines, since it doesn't exist, that provides information on the ecosystem state in which they are found, as well as testing this methodology in two city ravines. Through qualitative multicri-

teria techniques, a simplified diagnostic methodology was designed, which makes up the Ravines Ecosystem State Index (RESI), which was applied in the Malinalli and El Conde ravines. The RESI was made up of nine indicators, whose central axis is the evaluation of the woody forest component, as well as other elements typical of the anthropic presence. According to the RESI, the Malinalli ravine presented an excellent ecosystem state, while the El Conde ravine a poor condition, according to a proposed scale of five values. The application of the index allowed observing the independent behavior between the indicators, their ability to describe the conditions of the ravines and their sensitivity to their ecosystem differences. As well as to contrast the conditions of the ravines, as a product of the anthropic activity in the sites.

Palabras clave

Área verde, bosque de encino, ecosistema, relicto, riqueza de especies

1. INTRODUCCIÓN

Los problemas ambientales a los que se enfrenta la humanidad requieren de una respuesta rápida y eficaz. Un principio sobre el cual se debe construir dicha respuesta es que es imperativo primero conocer lo que se tiene (Sayre, 2002).

Un instrumento estadístico, que se ha revelado como una valiosa herramienta en el proceso del conocer es el indicador, entendido este como una medida o “parámetro, o valor derivado de otros parámetros, dirigido a proveer información y describir el estado de un fenómeno” (Romanelli y Massone, 2016).

Huaico-Malhue, Pérez-Morales y Daessle

(2017) plantean que, “Un indicador o conjunto de ellos integrados en un índice, es una herramienta que adquiere utilidad para: (a) detectar áreas frágiles o propensas a sufrir degradación, (b) trazar las áreas donde la degradación ya es un problema, (c) estimar su gravedad o (d) comprender mejor los procesos asociados con la degradación”.

La ciudad de Puebla presenta un sistema de barrancas, característica compartida con otras ciudades del Altiplano Central de México, las cuales son accidentes geográficos de origen volcánico y erosión hídrica, que se presentan como formas lineales negativas del relieve, estrechas, con laderas abruptas, y que llegan a alcanzar algunos kilómetros en longitud y algunas decenas de metros en anchura y profundidad (Lugo, 2011).

En las últimas décadas estas barrancas urbanas han experimentado una degradación creciente debido a la disposición de contaminantes, a la conformación de asentamientos humanos irregulares y en general, al impacto humano negativo sobre dicho ecosistema. La preocupación por el mismo deriva del reconocimiento de que los espacios arbolados urbanos proveen múltiples servicios ecosistémicos a la ciudad: continuidad de los procesos evolutivos, control biológico de plagas, control de la erosión y formación de suelo, control de inundaciones, depuración del agua, recarga de acuíferos, reciclamiento de materiales de deshecho, refugio y hábitat de especies residentes y migratorias, y regulación del clima local y global, entre otros (Morales-Cerdas, Piedra, Romero y Bermúdez, 2018).

Inventarios florísticos recientes realizados en dos barrancas de la ciudad dan cuenta de la existencia, aún, de relicto de

bosque de encino con una importante riqueza de especies, géneros y familias, un alto componente endémico e incluso especies en la categoría de amenazadas según la NOM-059-SEMARNAT-2010: *Acacia Angustissima* (Mill.) Kuntze, *A. Schaffneri* (S. Watson) F. J. Herm, *Agave* spp., *Arbutus xalapensis* Kunth, *Dasyllirion acrotrichum* (Schiede) Zucc, *Erythrina coralloides* DC, *Juniperus deppeana* var. *deppeana* Steud, *J. fláccida* Schltdl, *Buddleja cordata* Kunth y *Prunus salicifolia* Kunth entre otras, así como múltiples herbáceas (Gutiérrez, Silva y Varela, 2021). Los bosques de encino son las comunidades vegetales más diversas de esta región, así como el soporte y refugio para otras formas de vida como aves, pequeños mamíferos, reptiles, anfibios e invertebrados (Valencia-Avalos, 2004).

La presencia de este relicto se constituye en un elemento importante a considerar en la planeación citadina, siendo cruciales estos resultados para una ciudad carente de suficientes áreas verdes (ICMA, 2020), con áreas verdes de gran pobreza específica (Gutiérrez-Pacheco, Silva-Gómez, Totxtle-Tlamaní y Hernández-Zepeda, 2015; Domínguez, Acocal, Esteban, Aguilar y Torres, 2016), y con inexistencia, dentro de la urbe, de espacios disponibles para la creación de zonas de preservación ecológica excepto, precisamente, las barrancas.

Es en este contexto, donde el estudio y evaluación del sistema de barrancas a través de indicadores, se torna en una propuesta estratégica de investigación como un paso hacia la incorporación de las mismas al inventario de áreas verdes de la ciudad de Puebla, donde actualmente no se encuentran (Ayuntamiento de la ciudad de Puebla, 2016), y la implementación de

programas para su recuperación y conservación. De ahí que se plantearon como objetivos de este trabajo la sistematización de indicadores conformados en un índice, cuyo propósito fuese la determinación del estado ecosistémico de barrancas urbanas y su implementación en dos barrancas de la ciudad de Puebla, con la premisa de que tal metodología, a la luz de las Evaluaciones Ecológicas Rápidas, debe de ser científicamente viable, aunque no lo exhaustiva y detallada como sería el ideal, de tal forma que sea relativamente fácil de implementar haciendo posible evaluar una barranca en un tiempo razonablemente corto y que no requiera de personal especializado (Sayre, 2002; Munné, Prat, Solá, Bonada y Rieradevall, 2003).

De forma general, se procedió en un primer momento a través del método hipotético-deductivo planteando que se puede probar la hipótesis de que es factible diseñar indicadores que evalúen variables clave de las barrancas y que, por lo tanto, registren de forma clara las diferencias entre una y otra dando como resultado un gradiente de estado para el sistema. Se aplicaron los indicadores a dos barrancas de la ciudad permitiendo determinar el estado ecosistémico de las mismas. Finalmente, se discurió conforme al método inductivo estableciendo que los resultados arrojados por las barrancas evaluadas son un indicativo de lo que está sucediendo en todo el sistema y que por tanto la metodología puede implementarse en otras barrancas del mismo.

2. METODOLOGÍA

En la selección y diseño de los indicadores que conforman el índice, se procedió de conformidad con la mecánica de trabajos cualitativos de evaluación multicriterio,

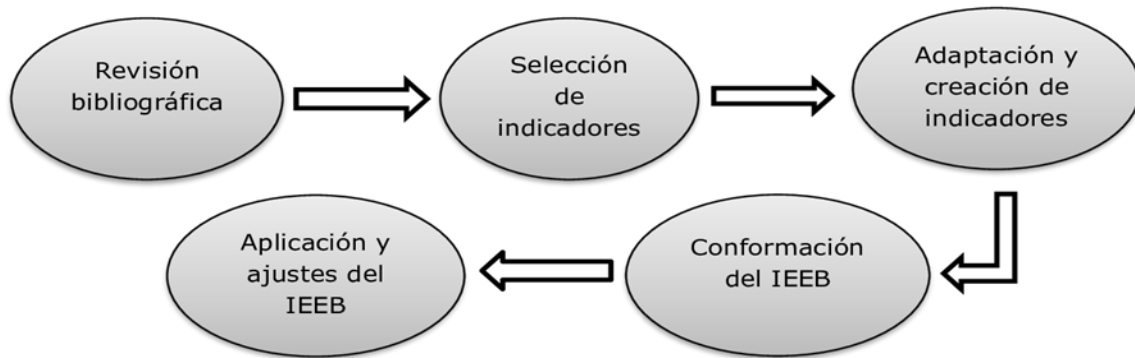


Figura 1. Metodología general para la conformación del IEEB

en los cuales se involucran problemas ambientales, sociales y de uso de recursos en general, y donde se combinan dimensiones económicas, sociales y ecológicas. Esto en correspondencia con la lógica de que son trabajos que intentan en su integralidad minimizar las consecuencias de enfoques menos amplios en la investigación de los grupos humanos y sus interacciones (Grajales-Quintero, Serrano-Moya y Hahn, 2013).

Así, para la conformación del índice se procedió a través de un conjunto de pasos secuenciales (Figura 1):

1.- Revisión bibliográfica a fin de detectar la posible existencia de una herramienta metodológica que permitiese evaluar de forma integral y rápida a sistemas como las barrancas.

2.- Ante la inexistencia de tal herramienta, búsqueda de indicadores o índices que evalúen al menos aspectos parciales presentes en las barrancas, tanto los estrictamente ecológicos, como también aquellos derivados de la presencia humana y de los impactos derivados de esta misma. Y que

pudiesen ser la base para el diseño de un índice cuyo objeto a evaluar sean las barrancas urbanas,

3.- Adaptación de los indicadores base a las necesidades del proyecto y generación de indicadores complementarios que conformaran el Índice de Estado Ecosistémico de Barrancas (IEEB).

4.- Conformación del IEEB.

5.- Aplicación del IEEB en dos barrancas de la ciudad de Puebla a fin de determinar si los indicadores propuestos se ajustaban al objeto a evaluar, hacer los ajustes pertinentes, y con ello determinar el estado ecosistémico de las mismas.

Revisión bibliográfica y selección de indicadores base: Se realizó una búsqueda bibliográfica en bases de datos como el Web of Science empleando como descriptores las palabras clave: barranca, Puebla, México, estudio, índice, diagnóstico, ravine, gully, study, index, en diversas combinaciones. La búsqueda se hizo para publicaciones en inglés y/o en español, de ahí la presencia de términos en ambos

idiomas. El periodo de prospección fue del año 2000 a la fecha. Esto permitió detectar algunos índices diseñados para evaluar diversos aspectos de cuerpos de agua lóticos. Por compartir dichos cuerpos de agua algunas características con las barrancas, se hizo una revisión de dichos índices a fin de seleccionar indicadores que fueran la base para este trabajo.

Adaptación y creación de indicadores: Para la adaptación y creación de los indicadores que conforman el IEEB, se consideró de forma importante más no limitante, la propuesta teórica-metodológica de la OCDE para la construcción de indicadores: PER (Presión-Estado-Respuesta). Tal consideración se debe a que el modelo PER se ha convertido en una herramienta analítica que trata de categorizar o clasificar la información sobre los recursos naturales y ambientales a la luz de sus interrelaciones con las actividades sociodemográficas y económicas (INEGI e INECOL, 2000; Romanelli y Massone, 2016).

Al buscar en la evaluación alcances más allá de los estrictamente ecológicos clásicos, se buscó un sustento con enfoque constructivista que se reflejara en la composición de los indicadores. Así mismo, el trabajo se apoyó en el esquema de la Comisión para el Desarrollo Sustentable de la ONU, en cuanto a los elementos que deben integrar los indicadores diseñados (INEGI e INECOL, 2000; Romanelli y Massone, 2016).

Conformación del IEEB: Definidos los indicadores, se les otorgó el peso que cada uno de ellos tiene dentro del índice, de tal manera que la puntuación final que el índice otorga a una barranca en evaluación, es la sumatoria de los valores arrojados por cada uno de los indicadores. Así mismo, se diseñó una escala de calidad con

semaforización relacionada.

Aplicación y ajustes del IEEB: Se aplicaron los nueve indicadores que conforman el IEEB a dos barrancas de la ciudad. Una con evidentes impactos antrópicos como presencia de residuos sólidos urbanos, residuos de manejo especial, aguas residuales domésticas e industriales y asentamientos humanos informales entre otros, y otra con mínima o nula presencia de tales impactos.

Los datos de las barrancas evaluadas se recabaron a través de recorridos por las mismas, haciendo mediciones, tipificación y conteos de los elementos correspondientes a efecto de determinar porcentajes, números y tipos en gabinete. Se consideraron las recomendaciones, para los efectos correspondientes, de Munné et al., (2003).

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Revisión bibliográfica: Esta actividad arrojó trabajos abocados a la creación de índices para evaluar el estado ecosistémico de ríos o arroyos, o que han utilizado índices ya existentes para los mismos fines: RFV [Riparian Forest Evaluation] (Magdaleno, Martínez y Roch, 2010), RQI [Riparian Quality Index] (García, González, Lara y Garilleti, 2006), ISC [Index of Stream Condition] (Ladson et al., 1999) y el QBR [Riparian Forest Quality] (Munné et al., 2003), de los más reconocidos.

Selección de indicadores base: En mayor o menor importancia, estos índices contemplan el bosque de galería en sus procedimientos, sin embargo, Munné et al. (2003) le dan una importancia mayor a dicho elemento, por lo que el índice QBR considera, en su propuesta, la calidad de bosque de ribera y la morfología de las riberas del canal.

De acuerdo a un criterio de pertinencia,

dadas las características de los indicadores que conforman el índice y la metodología usada para la aplicación de los mismos, a más de la amplia utilización de dicho índice en cuerpos de agua lóticos de México y de otras partes del mundo (López-Delgado, Vásquez-Ramos, Villa-Navarro y Reinoso-Flores, 2015; Rodríguez-Téllez et al., 2016), se eligieron dichos indicadores como la base sobre la cual construir el IEEB con las respectivas adecuaciones. Tal elección se hizo con base en la consideración de que esta herramienta, por una parte, pone énfasis en la importancia que tiene la vegetación como elemento articulador de todos los demás elementos a evaluar, así como del estado ecosistémico del sitio, y por la otra en que, precisamente, no se limita únicamente a los aspectos ecológicos de los ríos y arroyos, sino que considera también aspectos relacionados con la estructura del cauce y la presencia de impactos humanos en el mismo. Además, la evaluación va más allá de la composición de la flora del lugar al considerar aspectos como la estructura, calidad y cobertura de la vegetación ribereña.

Adaptación y creación de indicadores: De los cuatro indicadores que conforman el QBR, se adaptaron y rediseñaron cinco indicadores que se agruparon en el indicador compuesto del IEEB: Estado de la cubierta vegetal (Tabla 1).

Si bien es cierto que el trabajo de Muné et al. (2003), aborda en su evaluación la condición de la vegetación ribereña, la naturalidad o no del cauce y la presencia de estructuras de origen antrópico en el mismo, se consideró necesario, dadas las características particulares de las barrancas, incorporar otros indicadores que amplíen la evaluación a otras variables relacionadas con la vegetación y la interacción de los elementos biofísicos del sitio con la acción humana sobre los mismos. Por tal situación, se propusieron cuatro indicadores más que permiten evaluar variables que están distintivamente presentes en las barrancas urbanas, y que no se encuentran comúnmente en ecosistemas rurales (Tabla 1).

INDICADOR COMPUESTO	INDICADORES	DEFINICIÓN Y FORMA DE CALCULARLO
Estado de la cubierta vegetal	Calidad de la vegetación	Conteo de especies arbóreas y/o arbustivas alóctonas para determinar si son individuos aislados o están conformando comunidades
	Grado de cubierta vegetal	Porcentaje de área cubierta por árboles y/o arbustos respecto del área total
	Estructura de la cubierta	Porcentaje del área de terreno cubierta por sombra de árboles y/o arbustos respecto del área total
	Continuidad con el sistema forestal adyacente	Porcentaje del área colindante a la barranca en que el ecosistema de la barranca se mantiene
	Continuidad de la comunidad a lo largo de la barranca	Porcentaje de área dentro de la barranca donde la comunidad de bosque pierde continuidad en función del área total
-----	Grado de naturalidad del cauce de la barranca	Tipo de modificaciones al cauce de la barranca como estructuras permanentes, modificación de paredes, formación de terraplenes, y rellenado y/o canalización
-----	Actividades económicas dentro de la barranca	Tipo y porcentaje de área comprometida por actividades económicas dentro de la barranca como: pastoreo, cultivo, extracción de materiales pétreos entre otras
-----	Presencia de casas-habitación	Número de casas-habitación dentro de la barranca o porcentaje del área de la barranca comprometida por construcciones en función del área total
-----	Contaminación de la barranca	Tipo de residuos sólidos presentes en la barranca, así como de la presencia o no de aguas residuales

Fuente: elaboración propia

Tabla 1. Indicadores que conforman el IEEB

Conformación del IEEB: El IEEB presenta valores que van de 0 a 100 y es la sumatoria de los valores del indicador compuesto y de los cuatro indicadores simples. El valor total de cada indicador es la media aritmética de los valores que para el mismo se obtienen del total de fracciones o zonas de muestreo de las barrancas (Tabla 2).

El valor aportado por el indicador compuesto deriva inicialmente del valor aportado por el indicador Calidad de la vegetación. El valor puede ir de 0 a 40 puntos. Este valor inicial puede ser ajustado por los otros cuatro indicadores en valores de -10, -5, +5 y +10. El valor final para el indicador compuesto no puede ir más allá de los 40 puntos y de los 0 puntos. Esto es que si el valor final es mayor a 40 se registra como 40 puntos y si es menor de 0 se registra como 0 puntos. Valores superiores a 40 y valores negativos están excluidos (Tabla 2).

Como podemos ver, para efectos del Índice, se destaca el papel de la vegetación como elemento estructurador de los ecosistemas y se enfoca importantemente al problema que reviste la presencia de especies introducidas en los hábitats, lo que genera competencia sobre los recursos. Los indicadores adicionales se enfocan a calificar la importancia que para un ecosistema tiene la pérdida de su continuidad por su fragmentación y el efecto de isla.

Los otros cuatro indicadores que conforman el índice suponen la posible modificación de la barranca por la presencia de actividades y/o estructuras de origen antrópico en el cauce de la misma, lo cual casi siempre se traduce en impactos negativos sobre el ecosistema que por lo tanto penalizan el valor final del IEEB (Tabla 2).

Tabla 2. Conformación del IEEB y calificaciones propuestas

a).- Estado de la cubierta vegetal (Puntuación entre 0 y 40)		Suma
í).-Calidad de la vegetación		
Puntuación	Estado	
40	Solo especies arborísticas autóctonas	
30	Solo una especie arborística alóctona con especímenes aislados	
20	De dos a cinco especies arborísticas alóctonas con especímenes aislados	
10	Más de cinco especies arborísticas alóctonas con especímenes aislados	
0	Comunidades de especies alóctonas	

Los siguientes cuatro indicadores modifican el valor arrojado por el indicador anterior.

α).- Grado de la cubierta vegetal	
Puntuación	Estado
10	Cubierta vegetal al 80% (las plantas anuales no se consideran)
5	Cubierta entre el 50% y el 80%
-5	Cubierta entre el 10% y el 49%
-10	Cubierta < al 10%

β).- Estructura de la cubierta

Puntuación	Estado
10	Recubrimiento de árboles $\geq$ al 50% y de 0 a 50% de arbustos
5	Recubrimiento de árboles entre el 25% y el 49% y de arbustos de al menos el 25%
-5	Recubrimiento de árboles entre el 25% y el 49% y menos del 25% de arbustos
-10	Menos de recubrimiento del 25% de árboles, con o sin arbustos

γ).- Continuidad con el sistema forestal adyacente

Puntuación	Estado
10	Continuidad $>$ al 80%
5	Continuidad entre el 50% y el 80%
-5	Continuidad entre el 25% y el 49%
-10	Continuidad entre el 0% y el 24%

δ).- Continuidad de la comunidad a lo largo de la barranca

Puntuación	Estado
10	Uniforme y ocupando del 80% de la barranca
5	Continuidad entre el 50% y el 80%
-5	Continuidad entre el 25% y el 49%
-10	Continuidad entre el 0% y el 24%

b).- Grado de naturalidad de la barranca (Puntuación entre 0 y 10) Suma

Puntuación	Estado
10	Barranca sin modificaciones
7	Modificaciones de paredes y terraplenes
5	Presencia de estructuras rígidas aisladas
0	Canalización de la barranca o relleno

c).- Actividades económicas dentro de la barranca (Puntuación entre 0 y 10) Suma

Puntuación	Estado
10	Sin actividades económicas
8	Actividades económicas sin extracción de materiales
5	Actividades extractivas en hasta el 10% del área de la barranca
0	Actividades extractivas en más del 10% del área de la barranca

d).- Presencia de casas-habitación (Puntuación entre 0 y 20) Suma

Puntuación	Estado
20	Sin casas-habitación
15	Presencia de una casa-habitación
10	Núcleo habitacional de dos a diez casas
5	Núcleo habitacional de 11 casas hasta una ocupación de un 49% del área de la barranca
0	Núcleo habitacional en un área igual o mayor al 50 % de la barranca

e).- Contaminación de la barranca (Puntuación entre 0 y 20)		Suma
Puntuación	Estado	
20	Sin contaminación de agua y sólidos	
0	Agua contaminada c/s residuos sólidos	
	Modificaciones a la primera puntuación	
-5	Presencia de Residuos Sólidos Urbanos	
-10	Presencia de Residuos de Manejo Especial	
-15	Presencia de Residuos Peligrosos	

PUNTUACIÓN FINAL (Suma de las anteriores puntuaciones) Suma total

Fuente: elaboración propia con base en Munné et al. (2003)

En la tabla 3 se presenta la propuesta de semaforización de acuerdo a una escala de cinco niveles en que se califica el estado ecosistémico de las barrancas al aplicarse el IEEB.

Tabla 3. Estado ecosistémico de las barrancas de acuerdo al IEEB y semaforización

CALIDAD	IEEB	COLOR
Excelente	≥ 90	Verde
Buena	70-89	Azul
Regular	50-69	Amarillo
Pobre	30-49	Naranja
Mala	≤ 29	Rojo

Fuente: elaboración propia

El trabajo de campo implica tomar en cuenta las siguientes consideraciones.

En general, las barrancas suelen diferenciarse claramente del resto del territorio, sin embargo, en caso de que la transición entre zonas no sea clara, puede uno apoyarse en rasgos que indiquen la transición entre ellas, como pueden ser cambios en la vegetación y cambios en el grado de inclinación del terreno, entre otros. El diseño del trabajo de campo deberá sujetarse a las necesidades y particularidades del estudio en cuestión, y de la variabilidad que la barranca presente,

aunque se sugiere que cada lado de la barranca se tome como un ente separado uno del otro, por lo que las zonas a revisión se definan por cada lado de la barranca.

El levantamiento en campo de cada fracción de terreno, puede ser cubierto en un tiempo relativamente corto de acuerdo a las dimensiones escogidas para cada zona y de la accesibilidad del lugar. El levantamiento de la información no requiere de expertos en botánica u otras áreas, aunque si se requiere de cierto conocimiento y entrenamiento de la persona que cubra el formato respecto de los requerimientos del índice.

Aplicación y ajuste del IEEB: El trabajo se hizo en las barrancas El Conde y Malinalli (Figura 2).

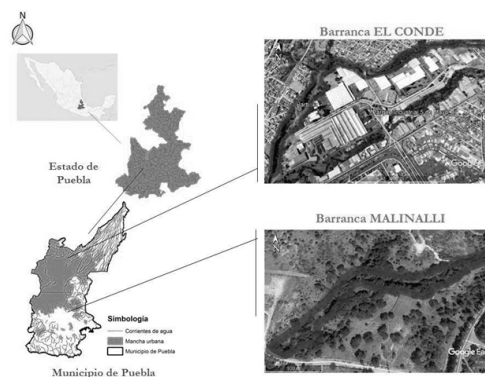


Figura 2. Zona de Estudio

La primera se ubica al norte de la ciudad, entre las coordenadas (19°09'80" N & 98°18'74" W). Presenta casas-habitación en sus orillas y cauce, y recibe descargas de aguas residuales domésticas y de aguas residuales industriales del parque industrial 5 de Mayo.

El área de estudio de dicha barranca tiene una longitud de 1 700 m, y la profundidad de la misma varía, de aproximadamente 40 m en las zonas más profundas hasta los 0 m en donde por obras de rellenado, presencia de casas en sus orillas y pavimentación de una calle que se habilitó en la misma, quedó a ras de suelo. En cuanto a su anchura, la misma varía de los 30 m en algunos sitios a los 100 m en otros.

El ecosistema originario de la barranca corresponde al bosque de encino, intercalado con claros sembrados de pasto, así como de plantas exógenas producto de la actividad silvícola humana (Gutiérrez, Silva y Varela, 2021).

La barranca Malinalli se ubica al sur de la ciudad, entre las coordenadas (18°93'93" N & 98°13'68" W). De primera impresión es una barranca en buen estado de conservación, sin contaminación evidente y con un ecosistema de bosque de encino (Gutiérrez, Silva y Varela, 2021).

El área de la barranca en estudio tiene una longitud aproximada de 750 m, y la profundidad de la misma varía a lo largo de su recorrido de los 1.30 m hasta los 12 m. En cuanto a la anchura, las variaciones van de los 8 m en los sitios más estrechos hasta los 50 m en los puntos más amplios.

La barranca El Conde se dividió en 12 fracciones, seis por ribera, de aproximadamente 290 m cada una. En la Tabla 4 se muestran los resultados de la evaluación, exhibiendo un estado ecosistémico pobre, correspondiente a un color naranja de acuerdo a la semaforización propuesta.

Indicador y puntos	Fracciones evaluadas												Med
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
a). (40)													18.8
i).	20	20	20	20	40	40	20	20	20	20	20	20	
α).	+10	+5	-5	-5	+10	+10	+10	-5	+10	-5	-10	-10	
β).	+10	-5	-5	+5	+10	+5	+10	-5	+10	-5	-10	-10	
γ).	-10	-10	-10	-10	-10	-10	-10	-10	-10	-10	-10	-10	
δ).	+10	+10	-5	-5	+10	+5	+10	-5	+10	-5	-10	-10	
Suma	40	20	0	5	40	40	40	0	40	0	0	0	
b). (10)	5	10	5	5	5	5	5	5	10	5	0	0	5
c). (10)	8	10	8	8	10	8	10	10	10	10	8	8	08.3
d). (20)	20	10	20	15	20	15	20	10	20	10	10	0	14.1
e). (20)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Total													46.2

Fuente: elaboración propia

Tabla 4. Calificaciones de la barranca El Conde a través del IEEB

La barranca Malinalli se dividió en seis fracciones, tres por ribera de 250 m cada una. En la Tabla 5 se muestran los resultados de la evaluación, exhibiendo un estado ecosistémico excelente, correspondiente a un color verde de acuerdo a la semaforización propuesta.

Indicador y puntos	Fracciones evaluadas						Media
	1	2	3	4	5	6	
a). (40)							40
i).	40	40	30	40	30	40	
α).	+10	+10	+10	+5	+5	+10	
β).	+10	+10	+10	+5	+5	+10	
γ).	+10	+10	+10	+10	+10	+10	
δ).	+10	+10	+10	+10	+10	+10	
Suma	40	40	40	40	40	40	
b). (10)	10	5	5	10	5	10	7.5
c). (10)	10	10	10	10	10	10	10
d). (20)	20	20	20	20	20	20	20
e). (20)	5	5	20	20	20	20	15
Total	85	80	95	100	95	100	92.5

Fuente: elaboración propia

Tabla 5. Calificaciones de la barranca Malinalli a través del IEEB

Dadas las dimensiones de las barrancas, no fue necesario instrumentar diseño de muestreo alguno, siendo factible el revisarlas en su totalidad.

El diseño del IEEB significa la oportunidad, en un futuro, de contar con una base sobre la cual consolidar y ampliar la evaluación de las barrancas urbanas hacia otras variables, como podrían ser los aspectos relacionados con su valor intrínseco, con la vivencia y disfrute de los habitantes hacia ese componente ciudadano, y la construcción identitaria de los ciudadanos hacia un entorno donde las barrancas han

estado muy presentes en el devenir histórico de la urbe (Rodríguez y Cubillos, 2012).

Esto podría también, constituirse en la base para que las barrancas comiencen a ser consideradas en los planes municipales de desarrollo como elementos que pueden fortalecer la política ambiental a través de integrarlas al equipamiento de áreas verdes de la ciudad, lo cual fortalecería la conservación y rescate de la biodiversidad originaria del territorio donde se asienta la ciudad, dadas las características de alta riqueza y diversidad específica de las barrancas (Gutiérrez, Silva y Varela,

2021), en contraste con la baja riqueza y diversidad específica de las actuales áreas verdes de la ciudad (Gutiérrez-Pacheco, Silva-Gómez, Toxtle-Tlamani y Hernández-Zepeda, 2015; Domínguez, Acocal, Esteban, Aguilar y Torres, 2016).

CONCLUSIONES

El IEEB, indica un estado ecosistémico pobre (46.2 puntos) para la barranca El Conde y uno excelente (92.5 puntos) para la barranca Malinalli, conforme a la escala planteada. Este resultado se considera acorde con las condiciones de las barrancas y muestra la pertinencia de la construcción y uso del IEEB. Esto en tanto indica que la evaluación de un ecosistema, sobre todo de aquellos urbanos, muy impactados y para los cuales se proponen medidas de remediación; efectivamente debe ir más allá de considerar únicamente aspectos de la comunidad biótica, como es común en la ecología clásica, y pasar a considerar otros aspectos propios de la presencia antrópica en el sistema.

Los resultados también indican que los nueve indicadores que conforman el IEEB se comportan de forma independiente unos con respecto a los otros, que son sensibles a las diferencias entre las barrancas, y que con ello su implementación permite evaluar en su máxima integralidad el sistema de acuerdo a una exhaustiva valoración de las características del mismo. Esto buscando siempre el máximo de objetividad para lograr que los mismos describan con la mayor precisión el sistema en cuestión y por el otro, tratando siempre de cumplir con uno de los criterios que definen a los indicadores y que es el de que sean lo más sintéticos posibles.

Las calificaciones que el IEEB otorga a las barrancas permiten también probar la

hipótesis de trabajo de que es posible diseñar indicadores que evalúen variables clave de las barrancas y que, por lo tanto, registren de forma clara las diferencias entre una y otra dando como resultado un gradiente de estado para el sistema.

Estos resultados ponen de manifiesto que la creación y consolidación de un sistema de indicadores para el diagnóstico de las barrancas, y en general de estudios urbanos, es la ruta pertinente a fin de facilitar el manejo de información estructurada, congruente entre sí y sistematizada de los problemas urbanos que enfrenta la metrópoli. Sistema cuyo sustento teórico-metodológico se finque en un enfoque epistemológico constructivista, que le posibilite considerar crucial, además de lo cuantitativo, la participación social y el uso de los métodos cualitativos, siempre en aras de profundizar en el diagnóstico, las explicaciones y la atención de la problemática socio-ambiental.

REFERENCIAS

- Ayuntamiento del Municipio de Puebla, 2020. *Inventario municipal de áreas verdes (IMAV)*. Puebla, México. Recuperado de <https://datos.pueblacapital.gob.mx/dataset/inventario-municipal-de-%C3%A1reas-verdes/resource/3273c82a-3474-460c-98e6-ad97a21857f7#{}>
- Domínguez, H. F., Acocal, L. J. A., Esteban, M. J., Aguilar, L. J. M. E. y Torres, V. V. (2016). Diagnóstico del arbolado de la reserva ecológica Cerro de Amalucan, ciudad de Puebla, México. *Revista Cubana de Ciencias Forestales*, 4(2), 141-148.
- García, de J. L. D., González, del T. M., Lara, G. F. y Garilleti, R. (2006). Índice RQI para la valoración de riberas fluviales

en el contexto de la directiva del marco del agua. *Ingeniería Civil*, 143, 97-108.

Grajales-Quintero, A., Serrano-Moya, E. D. y Hahn, V-H. C. M. (2013). Los métodos y procesos multicriterio para la evaluación. *Luna Azul*, 36, 285-306.

Gutiérrez-Pacheco, V., Silva-Gómez, S. E., Toxtle-Tlamani, J. S. y Hernandez-Zepeda, J. S. (2015). El arbolado de los espacios públicos abiertos de la zona de monumentos del centro histórico de la Ciudad de Puebla. En: Pulido-Flores G, Monks S, y López-Herrera M, (Eds.) *Estudios en Biodiversidad vol. 1* (págs. 161-172). Lincoln, NE: Zea Books. Disponible en: <http://digitalcommons.unl.edu/biodiversidad/15>

Gutiérrez, P. V., Silva, G. S. E. y Varela O. L. L. (2021). Flora del bosque de encino (*Quercus*: Fagaceae) de dos barrancas de la ciudad de Puebla, México. *Madera y Bosques*, 27(1), 1-15. doi: 10.21829/myb.2021.2712113

Huaico-Malhue, A., Pérez-Morales, A. y Daessle, L. W. (2017). Propuesta metodológica prospectiva para la elaboración de un índice sintético de vulnerabilidad hidrogeológica: el caso de estudio de Maneadero en México. *Ambiente y Desarrollo*, XXI(41), 107-121.

INEGI (Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática) e INECOL (Instituto Nacional de Ecología (INECOL), (2000). *Indicadores de Desarrollo Sustentable de México*. CDMX, México. Recuperado de http://www.nies.go.jp/db/sdidoc/indicadores_desarrollo_sustentable.pdf

ICMA (International City/County Management Association), (2020). *Reporte de resultados SINDES (Sistema de Indica-*

dores de Desempeño), 2° semestre 2020. CDMX, México. Recuperado de <https://www.icmaml.org/medicion>

Ladson, A. R., White, L. J., Doolan, J. A., Finlaysons, B. L., Hart, B. T., Lake, P. S. y Tilleard, J. W. (1999). Development and testing of an Index of Stream Condition for waterway management in Australia. *Freshwater Biology*, 41, 453-468.

López-Delgado, E., Vásquez-Ramos, J., Villa-Navarro, F. y Reinoso-Flores, G. (2015). Evaluación de la calidad del bosque de ribera, utilizando un método simple y rápido en dos ríos del bosque seco tropical (Tolima, Colombia). *Revista Tumbaga*, 1(10), 6-29.

Lugo H. J. (2011). *Diccionario geomorfológico*. CDMX, México: Publicaciones UNAM.

Magdaleno, F., Martínez, R. y Roch, V. (2010). Índice RFV para la valoración del estado del bosque de ribera. *Ingeniería Civil*, 157, 85-96.

Morales-Cerdas, V., Piedra, C. L., Romero, V. M. y Bermúdez, R. T. (2018). Indicadores ambientales de áreas verdes urbanas para la gestión en dos ciudades de Costa Rica. *Revista de Biología Tropical*, 66(4), 1421-1435.

Munné, A., Prat, N., Sola, C., Bonada, N. y Rieradevall, M. (2003). A simple field method for assessing the ecological quality of riparian habitat in rivers and streams: QBR index. *Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystem*, 13, 147-163.

Rodríguez, R. R. C. y Cubillos, G. A. (2012). Elementos para la valoración integral de los recursos naturales: un puente entre la economía ambiental y la economía ecológi-

ca. Una revisión de bibliografía. *Gestión y Ambiente*, 15(1), 77-90.

Rodríguez-Téllez, E., García-de Jalón, D., Pérez-López, M. E., Torres-Herrera, S. I., Ortiz-Carrasco, R., Pompa-García, M., Morales-Montes, M., García-García, D. A., Zamudio-Castillo, E. y Vásquez-Vásquez, L. (2016). Caracterización de la calidad ecológica del bosque de galería del río La Saucedá, Durango, México. *Hidrobiología* 26(1), 35-40.

Romanelli, A. y Massone, H. E. (2016). Desarrollo de indicadores ambientales e índice de calidad de lagos someros. *Tecnología y Ciencias del Agua*, VII(6), 123-137.

Sayre, R. (2002). *Un enfoque en la naturaleza: Evaluaciones ecológicas rápidas*. Arlington Virginia, USA: The Nature Conservancy.

Valencia-Avalos, S. (2004). Diversidad del género *Quercus* (Fagaceae) en México. *Revista de la Sociedad Botánica Mexicana*, 75, 33-53.

**La extraordinaria vida de
María Goeppert-Mayer y su
primer descubrimiento científico:
la absorción de dos fotones**
***The extraordinary life of Maria
Goeppert-Mayer and her first
scientific discovery: two-photon
absorption***

Fis. Raquel Baza Medina¹

Dr. Luis Guillermo Mendoza Luna^{1,2}

Dr. César Augusto Guarín Durán^{1,2}

Dr. Emmanuel Haro Poniatowski¹

Dr. José Luis Hernández Pozos¹

¹ *Departamento de Física,
Universidad Autónoma Metropolitana Iztapalapa.*

² *Investigadores por México – Departamento de Física,
Universidad Autónoma Metropolitana Iztapalapa.*

Resumen

Este texto ofrece una mirada a la vida de una científica poco conocida y que, sin embargo, hizo contribuciones importantes a la física del siglo XX: María Goeppert-Mayer. Además de poner en contexto su obra y su vida, explicamos el primer fenómeno que ella estudió durante su carrera científica, que se conoce como absorción de dos fotones. Se mencionan algunos de sus antecedentes, como la mecánica cuántica y los niveles de energía de las sustancias, y se da información sobre otros desarrollos modernos, como la invención del láser y otras aplicaciones de actualidad.

Abstract

This manuscript gives an insight into the life of a little-known female scientist who, nevertheless, made significant contributions to 20th-century physics: Maria Goeppert-Mayer. Besides putting context into her life and work, we explain the first physical phenomenon she analyzed in her scientific career, known as two-photon absorption. In addition, some background information is given, such as quantum mechanics and the energy levels of substances. Other modern developments, such as the creation of the laser and novel applications of two-photon absorption, are examined.

Palabras clave

absorción de dos fotones, IR780, láser, mecánica cuántica, óptica no lineal.

Keywords

two-photon absorption, IR780, laser, quantum mechanics, non-linear optics.

Contexto histórico:

la física en Europa en el siglo XIX

La ciencia de la física experimentó un progreso sin precedentes durante el siglo XIX [Flores Valdés, 1997]: todas sus ramas, tanto teóricas como experimentales, se desarrollaron a una velocidad vertiginosa comparada con su desarrollo anterior. Tal fue el avance que, a finales del siglo XIX, se consideraba que todos los problemas en física habían sido resueltos y que los pocos problemas que quedaban abiertos se resolverían tarde o temprano, en una lógica puramente acumulativa, y que no implicaría ningún avance conceptual o ruptura seria con los principios establecidos hasta entonces.

En esa época, Europa era el centro del mundo intelectual y científico, y fue por supuesto en donde científicos varones lograron los avances mencionados antes. La exclusión sistémica de las mujeres de la ciencia y de otras actividades era la norma general de aquella época. Como veremos más adelante, el panorama de la física (tanto científico como social) cambió notablemente en el siglo XX.

Sobre María Goeppert-Mayer

Aunque actualmente es cada vez más común que las mujeres hagan carreras en las áreas de ciencia e ingeniería, esto era extremadamente inusual a comienzos del siglo XX¹.

Es en este contexto histórico en el que María Goeppert-Mayer inició su educación y su carrera académica. María Goeppert-Mayer nació en Katowice, Alemania (actualmente parte de Polonia) en 1906,

¹ Esta situación ha sido replicada en México, pues la primera mujer titulada en física en nuestro país fue Alejandra Jáidar (1938-1988), quien se graduó en 1961; para conmemorar su vida y su carrera académica, el auditorio del Instituto de Física de la UNAM lleva su nombre.

hija de Friedrich Goeppert, profesor de Pediatría en la Universidad de Göttingen y de Maria Wolff [Nobel Prize Outreach, 2022]. Su padre siempre se preocupó por la educación de su hija María y le procuró una juventud rodeada de intelectuales y de una intensa actividad cultural, lo cual sin duda le dio un impulso a su vocación por la ciencia [Grzybowski y Pietrzak, 2013].

María ingresó a la Universidad de Göttingen en 1924 para estudiar Matemáticas; sin embargo, pronto se vio atraída a la Física. Completó sus estudios de doctorado en física teórica en 1930 [Nobel Prize Outreach, 2022]. Su tesis doctoral tuvo como resultado la predicción del llamado fenómeno de absorción de dos fotones, que será explicado en la siguiente sección y cuenta, además, con aplicaciones muy diversas que lo hacen relevante tecnológicamente.

Niveles de energía y el descubrimiento del fenómeno de absorción de dos fotones

Uno de los grandes avances en la física de principios del siglo XX fue el descubrimiento de que todas las cosas que vemos en el mundo natural están formadas por partículas diminutas que conocemos como átomos, y que éstos se combinan para formar moléculas y el resto de los objetos macroscópicos de nuestro mundo. Otro avance importante fue el descubrimiento de los electrones y su posición alrededor del núcleo atómico, así como la investigación de cómo los electrones se mueven alrededor de los átomos. Estos hallazgos conformaron la base de la (entonces nueva) ciencia de la mecánica cuántica. Sin embargo, los avances no se quedaron ahí, y todavía en la actualidad seguimos atestiguando avances en la ciencia fundamental y la tecnología, que tienen sus raíces en los descubrimientos mencionados.

Una observación hecha por los científicos en el siglo XIX es que ciertas sustancias emiten luz de ciertos colores al arder [Beauty of Science, 2016, Beauty of Science, 2017, MIT OCW, 2013]; a esta serie de colores se le llamó el espectro de emisión de la sustancia y fue algo que los físicos no entendían, puesto que estaba en contradicción con lo que se sabía sobre el comportamiento de la materia hasta entonces. Sin embargo, con la llegada de la teoría cuántica, los espectros de los átomos y, posteriormente, también de las moléculas, pudieron ser explicados satisfactoriamente. Dicha explicación emerge de manera natural, como una consecuencia de postular que los electrones en átomos y moléculas solamente poseen ciertas energías de un “catálogo” de posibles energías definidas; a dicho catálogo se le llama el conjunto de niveles de energía (o espectro) del átomo o molécula.

Dichos espectros pueden representarse como un diagrama de líneas horizontales apiladas (ver la figura 1); cada línea representa un nivel de energía permitido para el sistema (atómico o molecular). Los espacios entre líneas son representativos de las diferencias en energía entre los respectivos niveles. Cuando uno de tales sistemas recibe o libera energía (en forma de luz, calor o electricidad, por ejemplo), el estado energético del sistema puede cambiar y esto usualmente se representa mediante flechas que apuntan hacia arriba o hacia abajo, según corresponda.

La idea anterior implica una ruptura importante con la física anterior al siglo XX, pero conviene hacer una breve digresión para tratar el fenómeno de la luz.

Sobre la luz y los láseres

Una de las primeras cosas que aprendemos

sobre la luz es que es fantásticamente rápida, al punto en que es capaz de darle la vuelta 7.5 veces al planeta Tierra en tan solo un segundo [O'Donoghue, 2019]. En algún momento de nuestras vidas todos nos hemos preguntado qué es la luz. Si bien es complicado dar una respuesta simple y satisfactoria a esta interrogante, que incluso tiene implicaciones filosóficas, podemos mencionar que desde hace siglos se han realizado teorizaciones y experimentos para comprender mejor el fenómeno de la luz: los antiguos filósofos griegos dieron las primeras explicaciones al fenómeno de la luz. En tiempos más recientes, Sir Isaac Newton llevó a cabo experimentos clásicos con prismas y descubrió que la luz que pasa a través de ellos forma un arcoíris. Más tarde, en el siglo XIX, el físico James Clerk Maxwell descubrió que la electricidad y el magnetismo están íntimamente ligados a la luz. Para ampliar la discusión sobre la historia de las ideas sobre la luz, el lector interesado puede consultar [Cetto, 1987].

Los párrafos anteriores describen someramente el contexto histórico y científico de uno de los inventos más importantes del siglo XX: los láseres.

La palabra láser en realidad es un acrónimo del idioma inglés que en español significa “amplificación de luz por emisión estimulada de radiación” [Aboites, 1991]. El proceso que gobierna el funcionamiento del láser fue propuesto de forma teórica por Einstein en 1917 y solamente fue construido en un laboratorio por el científico Maiman en 1960. Para entender el funcionamiento de un láser, se requieren las ideas del espectro (o niveles de energía) de las sustancias que ya hemos estudiado, así como de algunas ideas adicionales sobre la luz introducidas por Einstein que, aunque no serán el tema de discusión aquí, referi-

remos al lector a los siguientes textos de divulgación para mayores detalles: [Aboites, 1991, Ibarra Villalón et al., 2018].

Para propósitos de nuestra exposición, es suficiente contar con la idea de que el láser es un dispositivo que emite luz muy intensa y dirigida (en línea recta, de hecho) que puede interpretarse como ondas (a veces llamadas electromagnéticas) o como partículas, según lo visto líneas arriba. En particular, nos interesa la idea de que la luz se expresa como partículas, a las que llamamos fotones. Cuando se enciende un apuntador láser, por ejemplo, éste emite una cantidad enorme de fotones, más de varios miles de millones por segundo, y cada uno de ellos tiene el color del láser (verde, rojo, azul, etc.).

Aun así, en el laboratorio de investigación necesitamos láseres más grandes y potentes para estudiar la materia y sus interacciones [Mendoza-Luna et al., 2019]. Estos equipos han evolucionado en potencia y en complejidad desde que el primer láser fue construido, al grado de que ahora cada fotón que producen es capaz de afectar la materia en el nivel fundamental, lo cual se explicará con mayor detalle en la siguiente sección, donde introduciremos la noción de la óptica no lineal, y dentro de ese contexto hablaremos sobre el tema que María Goepfert-Mayer analizó en su tesis doctoral y que más nos interesa en este artículo: la absorción de dos fotones o bifotónica.

Notas sobre la óptica no lineal y la absorción bifotónica

Una de las ramas de la física que se encuentra más en boga en la actualidad es la de la óptica no lineal. Los fenómenos que estudia esta disciplina pueden entenderse, intuitivamente, como los que ocurren cuando los fotones que impactan sobre una muestra tienen tanta energía como

para afectar la estructura interna de las sustancias y que no ocurren cuando fotones de baja intensidad (como los de las fuentes de luz distintas al láser) interactúan con la materia.

Los fenómenos no lineales fueron observados en el laboratorio tan pronto como el primer láser funcional fue demostrado experimentalmente por Maiman en 1960 [Aboites, 1991]. En 1961, los científicos Kaiser y Garrett de los Laboratorios Telefónicos Bell observaron por primera vez la absorción de dos fotones en un sistema de cristales que contienen el elemento europeo [Kaiser y Garrett, 1961]. Desde entonces, este fenómeno se ha observado en multitud de sustancias y sistemas.

Para explicar el fenómeno, retomemos la idea del espectro, pero uno de un sistema muy simple: pensemos en un átomo que tiene dos niveles representados en la figura 1 por dos líneas horizontales. Pensemos que la separación entre ellos es 3 eV (se lee tres electrones-volt); por el momento, la unidad de medida de la energía es irrelevante. En la figura 1 también aparece una línea horizontal punteada. Si el sistema se encuentra en el nivel inferior, marcado como A, e incide sobre dicho sistema un fotón de 1 eV, entonces dicho fotón no será absorbido; tampoco un fotón de 2 eV sería absorbido, ni tampoco uno de 4 eV: para que un fotón sea absorbido, debe tener una energía exactamente de 3 eV, y solamente de esa manera el sistema llegará al estado B.

Sin embargo, pensemos por un momento en la siguiente posibilidad ilustrada en la figura 1: ¿qué pasa si dos fotones de 1.5 eV cada uno inciden al mismo tiempo sobre el sistema cuando éste se encuentra en su estado A? Lo que ocurre entonces es, precisamente, el fenómeno de absorción de

dos fotones. En este caso, el sistema absorbe ambos fotones (con una energía total de 3 eV) y el sistema pasa al estado B. Podemos pensar en que el sistema pasa del estado A al estado representado por la línea punteada y que, inmediatamente después, debido al segundo fotón (que, recordemos, incide al mismo tiempo que el primer fotón), el sistema pasa del nivel de la línea punteada al estado B.

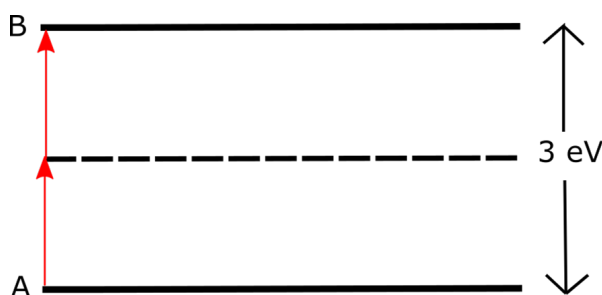


Figura 1. Esquema genérico de la absorción de dos fotones. Un fotón de 3 eV puede hacer que el sistema pase del estado A al estado B; también es posible que dos fotones de 1.5 eV cada uno (flechas rojas) consigan la misma transición de A a B. Esto último se conoce como absorción de dos fotones.

A manera de analogía, imaginemos el juego de feria llamado martillo. Este juego se muestra en la figura 2. Requiere que una persona golpee con fuerza en la base para impulsar un bloque que tiene como objetivo llegar a la parte más alta; si una persona golpea con fuerza apenas suficiente para llegar solo a la mitad del camino, necesitará la ayuda de una persona más que al golpear con la misma fuerza le imprima el impulso suficiente para que, sumada con la fuerza de la primera persona, el bloque llegue a la cima del juego y ambos participantes ganen el juego. En este ejemplo, cada persona representa a un fotón: por separado, cada uno puede llegar solo a la mitad del camino (ver la figura 1), pero si ambos fotones se absorben, los dos juntos

tendrán suficiente energía para llegar al nivel superior.

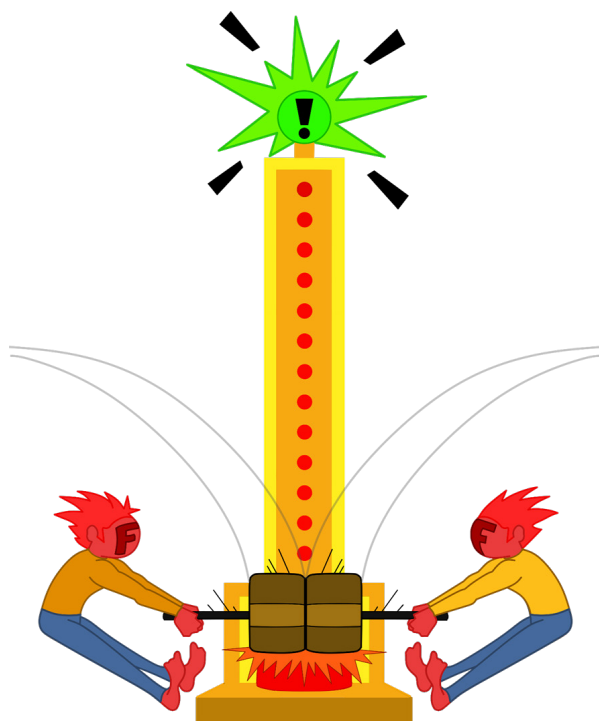


Figura 2. El juego del martillo como analogía para entender el fenómeno de la absorción de dos fotones.

La absorción de dos fotones tiene varias propiedades importantes; comencemos nuestra exposición enfocándonos en lo siguiente: al ser expuestas a una intensidad de luz lo suficientemente alta, no todas las sustancias presentan la misma disposición de absorber dos fotones de la manera en que lo hemos discutido hasta ahora. En otras palabras, hay algunas sustancias más propensas a absorber dos fotones que otras. Más aún: el color de la luz (es decir, de los fotones) que impacta sobre el sistema es otro factor que determina cuán viable sea la absorción de dos fotones.

A partir de las consideraciones anteriores, conviene hablar de la probabilidad de la absorción de dos fotones, la cual depende

del color de los fotones incidentes, la intensidad de la luz, así como de la naturaleza de la sustancia misma. Esta probabilidad recibe el nombre técnico de “sección eficaz de absorción de dos fotones” y es una propiedad muy importante de las sustancias.

Otra propiedad de la absorción de dos fotones que es clave para comprender las aplicaciones es la siguiente: para observar la absorción de dos fotones es necesario producir intensidades de luz muy altas y hemos señalado a los potentes láseres de los laboratorios de investigación como los responsables de lograr tales intensidades. Sin embargo, también es preciso concentrar toda esa energía utilizando una lente (que es similar a una lupa) en un espacio muy pequeño para alcanzar las intensidades necesarias. Cuando eso ocurre, la región que contiene luz con suficiente intensidad para iniciar el fenómeno se vuelve realmente pequeña, en especial cuando se le compara con la región de enfoque de una luz en el régimen lineal. Esta propiedad, que a primera vista parece una curiosidad, es de singular importancia en ciertas aplicaciones, puesto que permiten que la reacción de dos fotones ocurra en una región minúscula del espacio.

Si bien el fenómeno que nos ocupa tiene numerosas aplicaciones en varios campos de la ciencia y la tecnología, por cuestiones de espacio vamos a mencionar solamente un par de aplicaciones de la absorción de dos fotones.

En primer lugar, destaca la microscopía de fluorescencia. Usualmente, durante el estudio de un tejido biológico, las moléculas que forman dicho tejido (ADN, aminoácidos, melanina, etc.) podrían ser excitadas por luz ultravioleta o visible. Una vez que las moléculas absorben la energía deben libe-

rar parte de ésta al entorno, y muchas veces lo hacen generando luz, la cual es conocida como luz fluorescente o fluorescencia. Sin embargo, como las moléculas pueden ser dañadas cuando se iluminan con luz ultravioleta, ésta se sustituye por luz infrarroja. Si este tipo de luz infrarroja proviene de un láser y posee una cantidad elevada de fotones, entonces aumenta la probabilidad de que la absorción simultánea de dos fotones ocurra, permitiendo ciertas ventajas sobre la microscopía de fluorescencia, como no ser destructiva para el tejido biológico (ya que los tejidos biológicos absorben menos la luz infrarroja que la ultravioleta), tener una mayor profundidad de penetración en el mismo y la posibilidad de obtener imágenes con mayor resolución. Ver la figura 3.

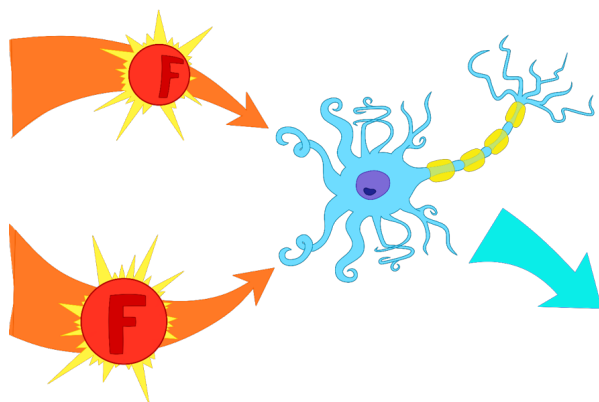


Figura 3. En esta representación esquemática, dos fotones en el infrarrojo son absorbidos por el tejido biológico de la neurona y éstos emiten fluorescencia (luz) de color verde agua, la cual puede detectarse con un microscopio convencional. Entre las ventajas que ofrece esta técnica se encuentran un menor riesgo de dañar la muestra a estudiar.

Por otra parte, la polimerización de dos fotones (2PP por sus siglas en inglés) es una

tecnología actual que también aprovecha la absorción de dos fotones [Saldaña López et al., 2020]. En la 2PP se inicia la síntesis de materiales poliméricos² después de que una molécula aumenta su energía por absorción simultánea de dos fotones. En esta técnica, las propiedades de un material cambian solamente en la región localizada donde se da la absorción de luz; dichas regiones son volúmenes bastante pequeños, del orden de los femtolitros (un femtolitro es la milmillonésima parte de la millonésima parte de un litro), como se mencionó en la sección anterior. La 2PP ha permitido avanzar en tecnologías relacionadas tanto con la fabricación de materiales como aplicaciones en la electrónica.

En la UAM-Iztapalapa contamos con un láser lo suficientemente intenso como para explorar los fenómenos no lineales [Mendoza-Luna et al., 2019]. En él estudiamos diversas propiedades de la materia, siendo una de ellas la probabilidad de que una sustancia en particular pueda absorber dos fotones (la ya nombrada sección eficaz de absorción de dos fotones). Una de las sustancias que hemos investigado es conocida como IR780 [Guarín et al., 2021, Alves et al., 2018], a veces también llamado heptametina cianina. Nos encontramos realizando estudios similares en otras sustancias.

El IR780 es una molécula orgánica que se usa normalmente como colorante. Esta molécula ha sido investigada como auxiliar en la terapia fotodinámica y fototérmica para el tratamiento del cáncer [Wang et al., 2016]. Además, esta molécula tiene otros usos en la investigación científica, pero ellos no serán explorados en este do-

² Un polímero es una cadena formada por moléculas (llamadas monómeros) que están unidas entre sí; el proceso de polimerización consiste en cambiar la estructura del polímero para poder unir nuevos eslabones haciendo que la cadena original cambie y se transforme en una más grande y con nuevas propiedades.

cumento. Después del trabajo experimental y de algunos cálculos en Yoltla, el clúster de cómputo de la UAM, concluimos que el IR780 cuenta con una gran habilidad para absorber dos fotones cuando éstos se encuentran en la parte infrarroja del espectro (específicamente en 875 nm). Esto tiene posibles implicaciones como un material útil para las aplicaciones discutidas anteriormente.

María Goeppert-Mayer después de la absorción de dos fotones

El descubrimiento de la absorción de dos fotones fue el primer trabajo científico de María de Goeppert-Mayer (ver figura 4) y el producto de su investigación doctoral. Durante el periodo en que ella estaba inmersa en este trabajo, contrajo matrimonio con Joseph Edward Mayer, con quien decidió migrar a Estados Unidos, en donde trabajó como docente e investigadora en diversos establecimientos científicos [Nobel Prize Outreach, 2022]; parte de sus actividades en este tiempo comprendieron su trabajo en el proyecto Manhattan, que condujo a la creación de la bomba atómica [Grzybowski y Pietrzak, 2013].



Figura 4. María Goeppert-Mayer. Imagen del dominio público tomada de [Nobel Prize Outreach, 2022].

En 1946, María Goeppert-Mayer y su esposo se establecieron en Chicago, donde ella desarrolló algunos trabajos teóricos

que le valdrían el Premio Nobel de Física de 1963; ella es, además, la segunda mujer en obtener esta distinción (Marie Curie fue la primera, Donna Strickland y Andrea Ghez son la tercera y la cuarta, respectivamente). Tristemente, después de una carrera científica llena de logros y descubrimientos, María Goeppert-Mayer falleció el 20 de febrero de 1972.

Epílogo y conclusiones

En este breve artículo hemos expuesto una serie de ideas que conciernen a la física moderna y contemporánea: desde el concepto de espectro de una sustancia hasta las ideas básicas detrás de la moderna óptica no lineal.

La absorción de dos fotones es un fenómeno no lineal descubierto tempranamente en el marco de la mecánica cuántica, de hecho, tres décadas antes de la creación del primer láser. Hemos aprendido el principio físico detrás de este fenómeno y hemos explorado brevemente sus aplicaciones, las cuales siguen siendo materia de investigación y desarrollo tecnológico. Es de esperar que en el futuro cercano se encuentren nuevos materiales con propiedades favorables de absorción de dos fotones, así como nuevas aplicaciones del mismo fenómeno. En la UAM-Iztapalapa continuamos con nuestros estudios sobre absorción de dos fotones, en particular, y sobre fenómenos no lineales, en general, hasta donde nos lo permite la actual situación de pandemia.

A lo largo de este artículo se ha expuesto una idea científica, la absorción de dos fotones, pero también se ha hablado de la científica detrás de este descubrimiento. Este escrito refuta la concepción de que la ciencia es una actividad fría y desapasionada: antes, al contrario, hemos demostrado que la ciencia es una actividad

humana y que, como tal, no es ajena a los vicios y problemas que aquejan a éstas.

La vida de María Goeppert-Mayer refleja una situación histórica complicada para las mujeres en la ciencia, en la que no era sencillo para una mujer tratar de incursionar en el mundo de la ciencia e, incluso, cuando ella ya se encontraba inmersa en ese mundo, usualmente se le marginaba a tareas o temas de importancia secundaria o empleos sin remuneración [Nobel Prize Outreach, 2022, Grzybowski y Pietrzak, 2013]. María Goeppert-Mayer contó con el apoyo decisivo de sus padres para impulsar su formación, y es posible especular que no habría conseguido sus logros sin su apoyo. En México ha habido y todavía existen mujeres que no explotan su potencial debido a la falta de apoyo y oportunidades, lo cual es una gran pérdida personal y para la humanidad en su conjunto.

Incluso en la actualidad, la cantidad de mujeres dedicadas a la ciencia es muy baja comparada con la de los hombres: solo un 30% del total de la participación en las carreras de ciencia, tecnología, ingeniería y matemáticas a nivel mundial [UNESCO, 2021]. La discusión sobre por qué las mujeres no siguen carreras de ciencia y tecnología es muy amplia y sería imposible abordarla en algunos renglones. Sin embargo, el ejemplo de grandes científicas como María Goeppert-Mayer refleja la capacidad y logros que las mujeres pueden obtener en las ciencias, a pesar de los prejuicios y la discriminación que todavía existen, incluso en los círculos intelectuales y científicos.

Agradecimientos

Los autores agradecen a la Universidad Autónoma Metropolitana las facilidades para realizar este trabajo, así como a LANCAD por otorgar recursos de cómpu-

to (Yoltla) a través del proyecto 26-2022. LGML y CAGD agradecen al CONACYT el financiamiento a través del programa Investigadores por México (antes Cátedras CONACYT).

Referencias

- [Aboites, 1991] Aboites, V. (1991). El láser. Fondo de Cultura Económica, primera edición.
- [Alves et al., 2018] Alves, C. G., Lima-Sousa, R., de Melo-Diogo, D., Louro, R. O., and Correia, I. J. (2018). IR780 based nanomaterials for cancer imaging and photothermal, photodynamic and combinatorial therapies. *International Journal of Pharmaceutics*, 542(1-2):164–175.
- [Beauty of Science, 2016] Beauty of Science (2016). Envisioning chemistry: Elemental burning. <https://vimeo.com/186409285>. Visto: 15-02-2022.
- [Beauty of Science, 2017] Beauty of Science (2017). Envisioning chemistry: Elemental burning II. <https://youtu.be/qJauE-3QYHgw>. Visto: 15-02-2022.
- [Cetto, 1987] Cetto, A. M. (1987). La luz en la naturaleza y en el laboratorio. Fondo de Cultura Económica, primera edición.
- [Flores Valdés, 1997] Flores Valdés, J. (1997). I: Niels Bohr: Puente entre la física clásica y la moderna. En *Niels Bohr: Científico, filósofo, humanista*. Fondo de Cultura Económica, segunda edición.
- [Grzybowski y Pietrzak, 2013] Grzybowski, A. and Pietrzak, K. (2013). Maria Goeppert-Mayer (1906-1972): two-photon effect on dermatology. *Clinics in dermatology*, 31(2):221–225.

[Guarín et al., 2021] Guarín, C. A., Mendoza-Luna, L. G., Haro-Poniatowski, E., and Hernández-Pozos, J. L. (2021). Two-photon absorption spectrum and characterization of the upper electronic states of the dye IR780. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 249:119291.

[Ibarra Villalón et al., 2018] Ibarra Villalón, H. E., Pottiez, O., and Gómez-Vieyra, A. (2018). El camino hacia la luz láser. *Revista Mexicana de Física E*, 64 (Diciembre):100–107.

[Kaiser y Garrett, 1961] Kaiser, W. and Garrett, C. G. (1961). Two-photon excitation in $\text{CaF}_2:\text{Eu}^{2+}$. *Physical Review Letters*, 7(6):229–231.

[Mendoza-Luna et al., 2019] Mendoza-Luna, L. G., Guarín, C. A., Haro, E., and Hernández, J. L. (2019). El nuevo sistema láser de pulsos ultracortos de la UAM Iztapalapa. *Boletín de la Sociedad Mexicana de Física*, 33(1):31–41.

[MIT OCW, 2013] MIT OCW (2013). Elements on fire — MIT chemistry behind the magic. https://youtu.be/_erP4SBOXRI. Visto: 15-02-2022.

[Nobel Prize Outreach, 2022] Nobel Prize Outreach (2022). Maria Goeppert Mayer – Biographical. NobelPrize.org. Nobel Prize

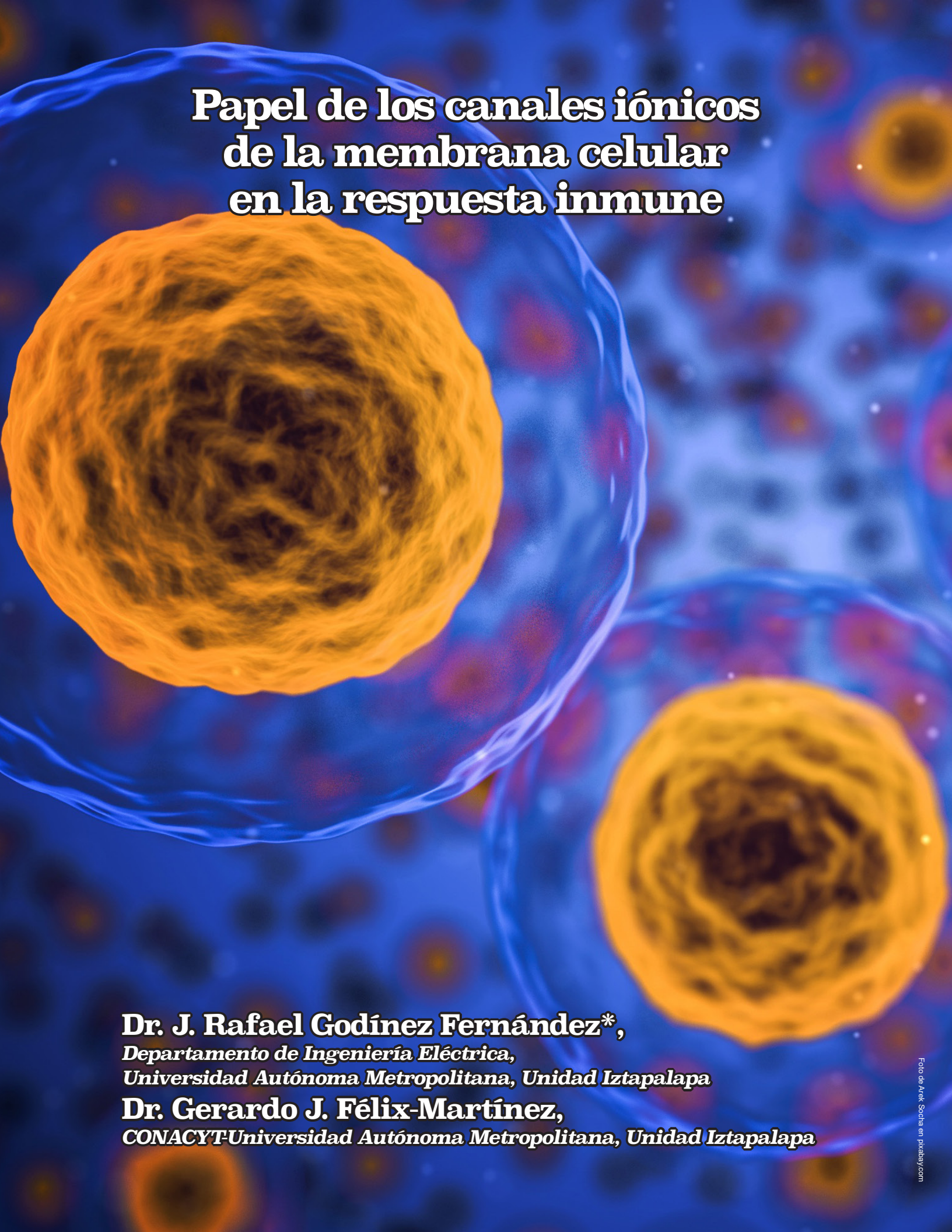
Outreach AB 2022. <https://www.nobelprize.org/prizes/physics/1963/mayer/biographical>. Visto: 14-02-2022.

[O'Donoghue, 2019] O'Donoghue, J. (2019). Light speed – fast, but slow. <https://twitter.com/physicsJ/status/1178674298141020161?s=20>. Visto: 22-12-2021.

[Saldaña López et al., 2020] Saldaña López, A., Maibohm, C., Silvestre, O. F., and Nieder, J. B. (2020). Polimerización de dos fotones, una tecnología interdisciplinar: de la innovación en investigación biomédica a los dispositivos fotónicos integrados. *Revista Española de Física*, 34(2):23–28.

[UNESCO, 2021] UNESCO (2021). Just 30% of the world's researchers are women. What's the situation in your country? <https://en.unesco.org/news/just-30-world'sresearchers-are-women-whats-situation-your-country>. Visto: 17-02-2022.

[Wang et al., 2016] Wang, K., Zhang, Y., Wang, J., Yuan, A., Sun, M., Wu, J., and Hu, Y. (2016). Self-assembled IR780-loaded transferrin nanoparticles as an imaging, targeting and PDT/PTT agent for cancer therapy. *Scientific Reports*, 6(March):1–11.



Papel de los canales iónicos de la membrana celular en la respuesta inmune

Dr. J. Rafael Godínez Fernández*,

*Departamento de Ingeniería Eléctrica,
Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Iztapalapa*

Dr. Gerardo J. Félix-Martínez,

CONACYT Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Iztapalapa

Abstract

Ion channels are ubiquitous membrane transport proteins key for a myriad of physiological processes involving both excitable and non-excitable cells. While the role of ion channels for the functional properties of excitable cells has been widely known for decades, the study of their involvement on the activity of non-excitable cells has been somewhat relegated. This is the case of immune cells, such as B and T lymphocytes, whose viability and regulation during a immune response heavily relies on the activity of ion channels. In this article, we provide a general overview of the importance of ion channels for the immune response, the experimental techniques used to study them, the cellular processes involved and how they become altered in pathological scenarios such as the nutritionally acquired immunodeficiency syndrome.

Resumen

Los canales iónicos son proteínas de membrana ubicuas, clave para una gran variedad de procesos fisiológicos que involucran células excitables y no excitables. Mientras que el papel de los canales iónicos en las propiedades funcionales de las células excitables ha sido conocido por décadas, el estudio de su participación en la actividad de células no excitables ha sido hasta cierto punto relegado. Este es el caso de las células inmunes, como los linfocitos B y T, cuya viabilidad y regulación durante la respuesta inmune depende en gran medida en la actividad de los canales iónicos. En este artículo describimos de manera general la importancia de los canales iónicos para la respuesta inmune, las técnicas experimentales utilizadas para su estudio, los procesos celulares involucrados, y cómo se ven alterados en escenarios patológicos como la inmunodeficiencia adquirida por desnutrición.

Palabras clave: canales iónicos, linfocitos, respuesta inmune, desnutrición

Keywords: ion channels, lymphocytes, immune response, malnutrition

Introducción

Los canales iónicos han sido ampliamente estudiados en una gran diversidad de tipos celulares. Su estudio inició de manera natural al tratar de dilucidar las propiedades eléctricas de las células excitables, o sea, aquellas capaces de generar actividad eléctrica en forma de potenciales de acción. Actualmente se tienen bien identificados los canales iónicos que participan en la generación de potenciales de acción en células como las de los músculos esquelético, cardíaco y liso; asimismo, de las células nerviosas y de las glándulas liberadoras de hormonas, por citar algunos ejemplos. Producto de estos estudios quedó claro que los potenciales de acción de las células excitables son producto de la apertura de canales iónicos localizados en la membrana celular con características únicas como, permanecer cerrados y abrirse sólo ante cambios de voltaje favorables en la membrana celular generando así corrientes iónicas que disparan los potenciales de acción. A este tipo de canales se les denominó *voltaje dependientes*. Además, se encontró que poseen una gran selectividad iónica, que en otras palabras, significa que los canales permiten el paso de sólo una especie iónica, excluyendo a las demás. Por ejemplo, los canales de sodio (Na^+) y de potasio (K^+) sólo permiten el paso a través de ellos de los iones Na^+ y K^+ respectivamente (Hille, 2001).

Otro producto importante de estos estudios fue el hallazgo de los canales iónicos que no se abren por voltaje, sino por ligando; esto es, los canales cuya apertura es promovida por la unión selectiva de una molécula o ion, por lo cual se les conoce como canales *dependientes*

de ligando. Ahora sabemos que el papel de los canales iónicos dependientes de ligando en las células excitables es la de modular la actividad eléctrica de las células. La presencia de este tipo de canales amplió el estudio de los canales iónicos a otros tipos celulares, ya no sólo las células excitables, pensando que los canales iónicos dependientes de ligando podrían disparar y modular la respuesta celular en las células no excitables. Estudiando una gran diversidad celular se concluyó que los canales iónicos de la membrana celular son ubicuos y desempeñan un papel importante en la función y/o en el mantenimiento de su viabilidad celular (Hille, 2001).

Con estos antecedentes inició el estudio de los canales iónicos en las células no excitables como las del sistema inmune, y en particular, en los *linfocitos T* y *linfocitos B*, que tienen un rol clave en la respuesta inmune. Los linfocitos han sido ampliamente estudiados por diferentes disciplinas como la inmunología, bioquímica, biología molecular, etc., lo que ha permitido obtener un conocimiento importante del sistema inmune, destacando la descripción detallada de su activación por la presencia del antígeno y las cascadas moleculares que se disparan para iniciar y modular la respuesta inmune (Abbas et al., 2021). El estudio biofísico de los canales iónicos de los linfocitos T y B llegó tarde con respecto al resto de las disciplinas que tradicionalmente estudian la inmunología, y tal vez por esta razón no se le ha dado la importancia debida al papel que juegan los canales iónicos en la respuesta inmune (Lewis and Cahalan, 1995). En este artículo se pretende mostrar la importancia de los canales iónicos en la respuesta inmune, describiendo en particular su acción en los linfocitos T. Resultados equivalentes han sido reportados para el caso de los linfocitos B.

Técnicas electrofisiológicas para el estudio de los canales iónicos.

Antes de iniciar la descripción de los canales iónicos en los linfocitos T y su papel en la respuesta inmune, conviene describir brevemente una de las técnicas electrofisiológicas ampliamente utilizada para el estudio del comportamiento de los canales iónicos. Denominada *Fijación del Voltaje*, la técnica consiste en mantener el potencial de membrana en valores seleccionados por el usuario y por el tiempo que desee (Hille, 2001). Existen dos variedades de la técnica de fijación de voltaje, denominadas de *célula completa* y de *registro de canal unitario*. En la variedad de fijación del voltaje de célula completa (Fig. 1) se cambia el voltaje de la membrana celular para inducir la apertura de los canales iónicos de la membrana celular. Como resultado, se obtienen corrientes macroscópicas en el rango de varios cientos de picoamperes a nanoamperes (Fig 1).

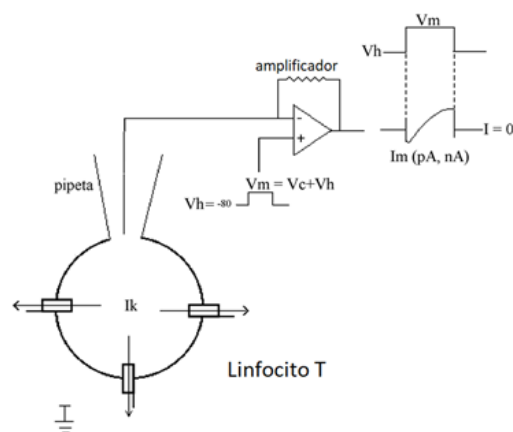


Fig. 1. Técnica de Fijación del Voltaje en su variedad de Célula Completa. Con la pipeta de registro se rompe la membrana celular, dializando el interior celular con la solución electrolítica que contiene la pipeta. La ruptura de la membrana permite además tener acceso eléctrico de tal manera que es posible polarizar la membrana a un voltaje, V_h , al cual se encuentran cerrados los canales. Posteriormente, se cambia el voltaje de la membrana (V_m) al aplicar pulsos rectangulares de voltaje (V_c) a través de un amplificador, que simultáneamente mide la corriente iónica total (I_m) producida por la apertura de los canales al cambiar el voltaje de la membrana.

Un ejemplo de la variedad de registro de canal unitario se muestra en la Fig. 2. En esta configuración, la pipeta de registro se coloca en la superficie de la membrana celular atrapando un canal iónico. En este caso no se rompe la membrana celular y es posible medir la corriente iónica de un solo canal iónico (corriente unitaria), cuya magnitud depende del tipo de canal y fluctúa entre cientos de femtoamperes hasta varios picoamperes (Hille, 2001).

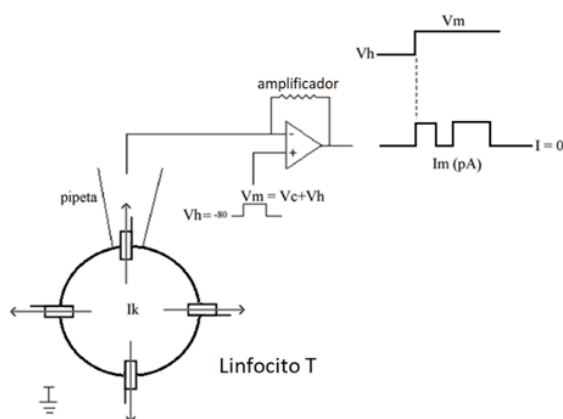


Fig. 2. Técnica de Fijación del Voltaje en su variedad de Registro de Canal Unitario.

La pipeta de registro se coloca sobre la superficie del linfocito T atrapando un canal iónico. A través del amplificador se fija un potencial de mantenimiento (V_h) y se cambia el potencial de membrana (V_m) aplicando un escalón de voltaje (V_c) que promueva la apertura del canal. Simultáneamente, el amplificador mide la corriente (I_m) de un sólo canal iónico.

Las técnicas anteriores han sido fundamentales para el estudio de los canales iónicos en los linfocitos T. A manera de ejemplo, en la Fig. 3 se muestran registros de corrientes de K^+ obtenidas en el Laboratorio de Biofísica e Ingeniería de Tejidos de la Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Iztapalapa. En la Fig. 3a se mues-

tra una familia de trazos de la corriente de K^+ obtenidas de linfocitos T de sangre periférica de rata Wistar. Para inducir las corrientes se aplicaron pulsos de fijación del voltaje (V_c) de diferente magnitud a partir de un potencial de mantenimiento (V_h) al cual están cerrados los canales. Cada trazo de corriente de K^+ superpuesta corresponde a la inducida por un pulso rectangular de voltaje (como se expuso en la Fig. 1) como resultado de la apertura de los canales de K^+ . Al incrementar la amplitud de los pulsos de voltaje, la corriente de K^+ aumenta, como se observa en la Fig. 3b, en donde se muestra el valor máximo de cada trazo corriente de K^+ en función del potencial de membrana que indujo dicha corriente. Podemos observar que el incremento de la corriente de K^+ con respecto al cambio en el potencial de membrana no es lineal.

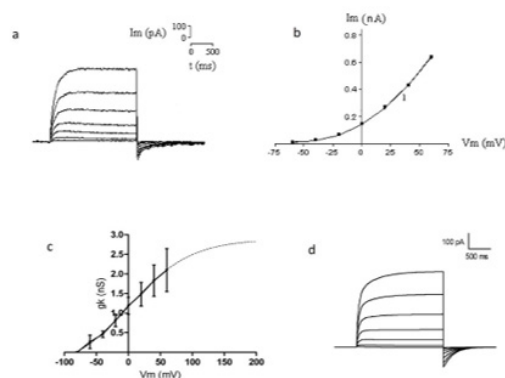


Fig 3. a) Familia de trazos de la corriente macroscópica de K^+ (IK^+) obtenida con la técnica de Fijación del Voltaje en su variedad de célula completa. b) Gráfica IK^+ vs V_m . Se observa que la magnitud de la IK^+ no es lineal con respecto a V_m . c) Curva g_K vs V_m . Se muestran los valores promedio con su desviación estándar ($n=5$). El trazo discontinuo corresponde al ajuste de la función de Boltzmann a los datos experimentales. d) Reconstrucción teórica de las corrientes de K^+ a partir del análisis de los datos mostrados en a), b) y c). Los registros en a) se obtuvieron de un linfocito T de sangre periférica de rata Wistar.

En la Fig 3c se muestra la curva de conductancia al K^+ (gK^+) con respecto al potencial de membrana (gK^+ vs V_m). La conductancia se obtiene a partir de los datos de la curva corriente de K^+ vs V_m (Fig. 3b). Con los datos de las Figs. 3a-c es posible obtener un modelo teórico de la apertura de los canales de K^+ que reproduce el curso temporal de la corriente de K^+ y la corriente máxima que se obtiene para cada pulso de voltaje (Fig. 3d), esto es:

$$IK^+ = gK^+(V_m, t) \cdot (V_m - V_k)$$

En la ecuación anterior, la conductancia al K^+ (gK^+) es función del voltaje de membrana V_m y del tiempo t y V_k indica el potencial de equilibrio del K^+ . La metodología para obtener $gK^+(V_m, t)$ a partir de los datos experimentales es estándar y se realiza de rutina por los biofísicos experimentales que estudian a una determinada población de canales iónicos (Hille, 2001).

La metodología de fijación del voltaje para la obtención de la corriente iónica que ha sido descrita brevemente, que nos lleva a la construcción de gráficas como las mostradas en la Fig. 3 y la generación de modelos cuantitativos a partir de los datos experimentales, ha sido empleada también para el estudio de las diversas poblaciones de canales iónicos presentes en los linfocitos T, además de los canales de K^+ .

Canales iónicos en los linfocitos T no activados (vírgenes).

Los linfocitos T vírgenes son aquellos que no han sido activados por la presentación de algún antígeno (Zweifach and Lewis, 1993). Estos presentan varios tipos de canales iónicos en la mem-

brana celular entre los que destacan los canales de K^+ denominados $K_{v1.3}$ como se ilustra en el esquema de la Fig. 4. Asimismo, en menor proporción, la membrana celular presenta otra población de canales de K^+ denominada resistente a Charibdotoxina (ChTX) ya que, a diferencia de los canales $KV1.3$, no son bloqueados por el fármaco ChTX. Los canales $KV1.3$ y ChTX-resistentes se encuentran abiertos permitiendo el paso de K^+ a través de ellos, lo que origina un voltaje de membrana negativo denominado potencial de reposo (V_r) cuyo valor promedio es de -60 mV (Lewis and Cahalan, 1995).

Los linfocitos T presentan además canales de K^+ activados por calcio (Ca^{++}), que comúnmente se designan como $K(Ca^{++})$. Como se muestra en la Fig. 4, los canales de $K(Ca^{++})$ se encuentran normalmente cerrados impidiendo el paso de K^+ . Estos canales se abren por ligando al unir iones Ca^{++} del lado citoplasmático del canal. Ya que la concentración de Ca^{++} intracelular $[Ca_i^{++}]$ es muy baja, alrededor de 10^{-7} Molar, la probabilidad de unión del Ca_i^{++} al canal para su apertura es muy baja y como consecuencia el canal permanece cerrado. Otro canal presente en la membrana celular del linfocito T es el canal de Ca^{++} denominado CRAC, que también permanece cerrado impidiendo el paso de Ca^{++} a través de él. La apertura del canal CRAC es dependiente de dos factores: el V_m y un ligando. En cuanto al V_m , el canal se encuentra cerrado al potencial de membrana de reposo de -60 mV, valor común en un linfocito T que no ha sido activado por la presencia de algún antígeno, y se abre cuando el linfocito T se hiperpolariza. El ligando, denominado STIM1, es una molécula mensajera que se produce cuando

los depósitos intracelulares de $[Ca^{++}]_i$ se agotan (Zweifach and Lewis, 1993).

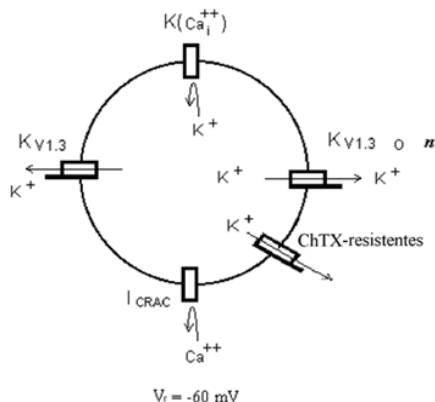


Fig 4. El esquema ilustra los canales iónicos localizados en la membrana celular en un linfocito T no activado. Contiene tres tipos de canales de K^+ $KV_{1.3}$ resistentes al bloqueador de canales de K^+ Charibdotoxina y el canal de $K(Ca^{++})$. Además, presenta el canal de Ca^{++} CRAC activado por voltaje y ligando.

Eventos intracelulares durante la fase inicial de la activación del linfocito T

Un linfocito T virgen inicia una cascada de eventos intracelulares cuando une de manera específica su antígeno como se ilustra en la Fig. 5. Los linfocitos T exhiben en su superficie un receptor específico (RTC) para su antígeno (Ag), que es presentado por otras células del sistema inmune denominadas células presentadoras de antígeno. Los antígenos son trozos moleculares de agentes infecciosos. ¿Cómo es que estos trozos moleculares o antígenos son presentados a los linfocitos T? Los eventos son los siguientes: cuando un agente infeccioso ingresa al organismo, células del sistema inmune inespecífico, como los macrófagos, fagocitan al agente invasor, destruyendo al microorganismo en su interior. Trozos moleculares del agente patógeno (antígeno) ahora son presentados por los macrófagos a los linfocitos T para iniciar su activación.

Una vez que el Ag se une al RTC se activa la enzima fosfolipasa C- γ , que actúa sobre el sustrato 4,5 bifosfato de fosfatidilinositol (FIB) para descomponerlo en DG e IP₃. Por otro lado, los linfocitos T tienen un retículo endoplásmico (RE) que actúa como un almacén intracelular de Ca^{++} debido a las bombas de Ca^{++} en su membrana que permiten la entrada y acumulación del Ca^{++} en su interior. El IP₃ que se formó por la unión del Ag al RTC, actúa sobre el RE abriendo los canales de Ca^{++} presentes en su membrana. Como resultado, el Ca^{++} saliente del RE hacia el citoplasma incrementa la concentración de Ca^{++} intracelular $[Ca^{++}]_i$. Se sabe que este incremento inicial del Ca^{++}_i es crucial para el inicio de la activación del linfocito T; sin embargo, la activación requiere de un incremento sostenido del Ca^{++}_i , lo que hace a los depósitos intracelulares de Ca^{++}_i insuficientes al agotarse rápidamente (Fomina et al., 2000; Zweifach and Lewis, 1993).

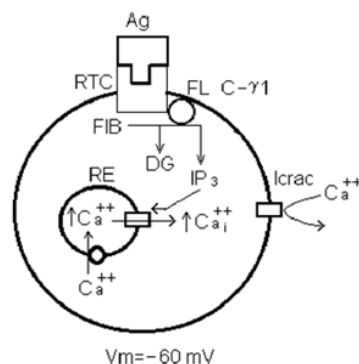


Fig. 5. El esquema muestra a un linfocito T que une de manera específica el antígeno Ag a su receptor antigénico RTC, la unión activa la enzima fosfolipasa $FLC-\gamma 1$ que produce diacilglicerol (DG) y trifosfato inositol (IP₃) a partir del bifosfato de fosfatidilinositol (FIB). El IP₃ actúa como un mensajero intracelular que induce la apertura de los canales de Ca^{++} localizados en la membrana del retículo endoplásmico (RE). El resultado final es la salida de Ca^{++} del RE hacia el citoplasma, incrementando así la $[Ca^{++}]_i$.

El incremento sostenido del Ca_i^{++} indispensable para la activación del linfocito T es debido a la entrada de Ca^{++} extracelular por la apertura de los canales CRAC de Ca^{++} . El mecanismo para la apertura de los canales CRAC es el siguiente (Fig. 6): El incremento inicial de la $[Ca_i^{++}]$, que como ya se comentó, proviene del retículo endoplásmico (RE), abre el canal de $K(Ca^{++})$ que produce un potencial de membrana más negativo que el potencial de reposo V_r , adquiriendo un valor de -80 mV. Esta hiperpolarización es indispensable para la apertura del canal CRAC pero insuficiente. La apertura del canal CRAC se da finalmente por la acción concertada de la hiperpolarización y el mensajero intracelular STIM1 que se produjo al agotarse el RE de Ca^{++} . El linfocito T se activa apropiadamente al mantener elevada la $[Ca_i^{++}]$ de manera sostenida, producto de la entrada de Ca^{++} vía los canales de Ca^{++} CRAC abiertos, produciendo la corriente de Ca^{++} ICRAC (Fomina et al., 2000; Zweifach and Lewis, 1993).

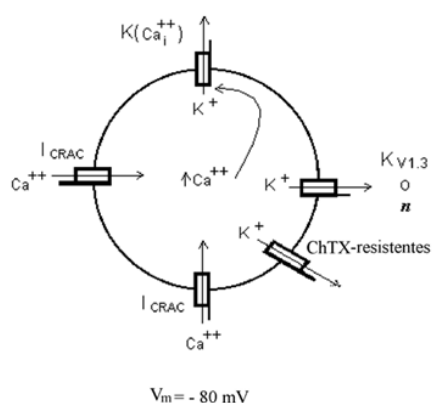


Fig. 6. El incremento de la $[Ca_i^{++}]$ por la acción del IP3 (Fig.5) favorece la unión del Ca_i^{++} al canal de $K(Ca_i^{++})$ permitiendo el paso de K^+ que ocasiona una hiperpolarización tornando el potencial de membrana V_m más negativo ($V_m = -80$ mV). La hiperpolarización abre los canales de Ca^{++} CRAC generando la corriente de Ca^{++} entrante ICRAC que incrementa de manera sostenida la $[Ca_i^{++}]$

Como podemos observar, los canales iónicos son fundamentales en la activación de los linfocitos T, etapa inicial de la respuesta inmune ante la presencia de antígenos. La alteración de los mecanismos descritos puede redundar en una activación pobre o nula de los linfocitos T. Como un ejemplo importante de falla en el proceso de activación de los linfocitos T se encuentra la inmunodeficiencia adquirida por la desnutrición grave.

Immunodeficiencia Adquirida por la Desnutrición Grave y los Canales iónicos

Desde antes de la medicina moderna se sabía que las hambrunas en las poblaciones humanas las hacían más susceptible a padecer infecciones mortales (Beatty y Dowdle, 1978; Blair et al., 2002). Actualmente, diversas disciplinas científicas han puesto de manifiesto una diversidad de factores que alteran e inhiben la respuesta inmune durante la desnutrición grave (Chandra, 1999); sin embargo, uno que no se había planteado, es si la desnutrición grave podría afectar a los canales iónicos, que como se describió, son fundamentales para la activación del linfocito T. Es natural proponer que la desnutrición grave los afecte ya que la pobre ingesta de proteínas y calorías afectaría la producción de las proteínas que funcionan como canales iónicos en los linfocitos T. En particular, como se comentó, los canales de K^+ son claves para hiperpolarizar la membrana celular y hacer posible la apertura de los canales de Ca^{++} CRAC para el incremento sostenido de Ca_i^{++} que sucede durante la activación. Una población de canales de K^+ disminuida reduciría la conductancia al K^+ , imposibilitando la hiperpolarización y la activación del linfocito T. Este sería otro factor más que se sumaría a los ya descritos en la desnutrición grave. En la

Fig. 7 se muestran los trazos de corriente de K^+ de un linfocito T obtenido de ratas Wistar con desnutrición grave. En ella podemos observar que las corrientes de K^+ están muy disminuidas al compararlas con el caso control mostrado en la Fig 3a.

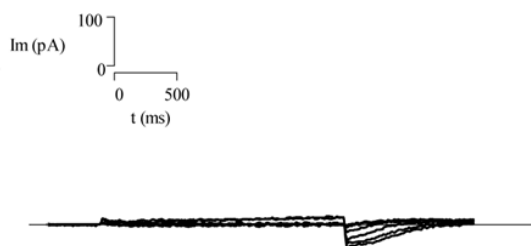


Fig 7. Corriente de K^+ en un linfocito T de sangre periférica de una rata con desnutrición grave. Note la gran disminución de la corriente de K^+ , la cual es apenas perceptible.

Con este resultado, se muestra que otro factor importante en la respuesta inmune deficiente durante la desnutrición grave, es la disminución en la conductancia al K^+ , que imposibilitaría la hiperpolarización necesaria para la activación de los canales CRAC que mantienen elevada la $[Ca^{++}]_i$ indispensable para la activación del linfocito T. El resultado es la incapacidad de respuesta del sistema inmune específico ante agentes infecciosos, aumentando la probabilidad de muerte por infección.

Conclusión

Los canales iónicos son fundamentales para la activación de los linfocitos T (Cahalan y Chandy, 2009). La activación de los linfocitos T es la etapa de arranque de la respuesta del sistema inmune a la presencia de antígenos, los cuales son componentes moleculares de agentes patógenos de tipo infeccioso. Esta etapa es crítica para una respuesta inmune adecuada, la cual culmina con la destrucción de agentes infecciosos. Como se comentó, en esta etapa los canales iónicos juegan un rol im-

portante y la alteración de su función puede afectar la activación linfocitaria impidiendo o limitando la respuesta inmune. Existen en la actualidad una diversidad de agentes farmacológicos conocidos como inmunomoduladores que se emplean en la clínica para incrementar la respuesta inmune y para disminuir la respuesta inmune como en el caso de las enfermedades autoinmunes. Por otro lado, la biofísica de canales iónicos ha mostrado cómo el comportamiento de diferentes poblaciones de canales iónicos puede cambiar por la acción de diferentes agentes farmacológicos. Estos hallazgos tienen el potencial de ser empleados en la clínica para modular la actividad de los canales iónicos y a su vez, la respuesta inmune. En otras palabras, el conocimiento de los canales iónicos en la respuesta inmune abre la posibilidad de emplear otra batería de fármacos que afecten a los canales iónicos de tal manera que harían posible modularla, aumentando su acción en el caso de infecciones graves o tratamiento del cáncer (Ginefra et al., 2021) y limitando su acción en el caso de las enfermedades autoinmunes.

Referencias

- Abbas, A., Lichtman, A., Pillai, S. Cellular and Molecular Immunology, Elsevier, Philadelphia, 2022.
- Beatty, D. y Dowdle, E. The effects of Kwashiorko serum on lymphocyte transformation "in vitro". Clin. Exp. Immunol. [32], pp. 134-143, 1978.
- Blair, S., Carmona, J. y Correa, A. Malaria en niños: relaciones entre nutrición e inmunidad. Rev. Panam. Salud Pública [11], pp. 5-14, 2002.
- Cahalan, M. and Chandy, K., The functional network of ion channels in T lym-

- phocytes. *Immunol. Rev.* [231(1)], pp. 59–87, 2009
- Chandra, R. Nutrition and the Immune System: an introduction. *Am. J. Clin. Nutr.* [66(2)], pp. 460S-463S, 1997.
- Fomina, A., Fanger, C., Kozak, J. y Cahalan, M. Single channel properties and regulated expression of Ca^{2+} release-activated Ca^{2+} (CRAC) channels in human T cells. *J. of Cell Biol.* [150], pp. 1435-1444, 2000.
- Ginefra, P., Carrasco, H., Spagna, M., Zecchillo, A., y Vannini, N. Ionic Regulation of T-Cell Function and Anti-Tumor Immunity. *Int. J. Mol. Sci.*[22], pp. 13668, 2021.
- Hille, B. *Ion Channels of Excitable Membranes*, Sinauer Associates Inc. Publishers Sunderland, Massachusetts, 2001.
- Lewis, R. y Cahalan, M., Potassium and calcium channels in lymphocytes. *Annu. Rev. Immunol.* [13], pp. 623-653, 1995.
- Zweifach, A. y Lewis, R. Mitogen-regulated Ca^{2+} current of T lymphocytes is activated by depletion of intracellular Ca^{2+} stores. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA.* [90], pp. 6295-6299, 1993.

A collection of various pills and capsules scattered on a yellow background. The pills include white round tablets, a white capsule, a red oval pill, a yellow oval pill, and several grey speckled tablets. Some pills are whole, while others are broken or partially visible.

¿Por qué los fármacos son contaminantes del ambiente?

Dra. Araceli Tomasini¹
César Macías Paredes²

¹Departamento de Biotecnología, División de Ciencias Biológicas y de la Salud. Universidad Autónoma Metropolitana-Unidad Iztapalapa.

²Licenciatura en Ingeniería Bioquímica Industrial del Departamento de Biotecnología, División de Ciencias Biológicas y de la Salud. Universidad Autónoma Metropolitana-Unidad Iztapalapa.

Resumen

En este estudio se explica brevemente que los compuestos activos farmacéuticos (CAFs) son las moléculas que contienen los medicamentos. Se menciona de donde se obtienen y el beneficio de estos compuestos en la vida actual. En realidad, ya es impensable imaginarnos la vida sin la ayuda de los medicamentos, ya que sirven para curar, tratar, controlar enfermedades y molestias. Se menciona cual es la vía que siguen los CAFs dentro del organismos humanos y /o animal hasta ser excretado y finalmente el destino de estos compuestos hasta llegar a fuentes naturales de aguas. Finalmente se explica porque la presencia de estos compuestos en las fuentes de aguas naturales se consideran contaminantes. Se menciona la toxicidad que causan los CAFs a diversas especies de organismos acuáticos, como malformaciones, problemas de reproducción e incluso la muerte.

Abstract

This study briefly explains that the pharmaceutical active compounds (PhACs) are the molecules that contain the medicines. It is mentioned where they are obtained from and the benefit of these compounds in today's life. In fact, it is unthinkable to imagine life without the help of medicines, since they are used to cure, treat, control diseases and pain. It is mentioned which is the pathway that PhACs follow within human and/or animal organisms until they are excreted and finally the fate of these compounds until they reach natural water sources. Finally, it is explained why the presence of these compounds in natural water sources are considered pollutants. The toxicity caused by PhACs to various species of aquatic organisms is mentioned, such as malformations, reproductive problems and even death.

Introducción

Los fármacos o medicamentos son productos de amplio uso humano y veterinario, para curar o controlar enfermedades. Estos medicamentos contienen, en su formulación, compuestos activos farmacéuticos (CAFs) que son los encargados de combatir infecciones, curar, modificar el metabolismo cuando este es alterado, eliminar el dolor, etc. Los CAFs son moléculas diseñadas con el fin de mantener su estructura química por periodos de tiempo muy largos, para ejecutar su función terapéutica dentro de los organismos. Por esta razón dichos compuestos son recalcitrantes, es decir son persistentes, no biodegradables y por la tanto bioacumulables o acumulables en el ambiente. En este artículo nos enfocaremos a explicar cómo los CAFs se convierten en contaminantes en el ambiente.

Compuestos Activos de los Productos Farmacéuticos

Los compuestos activos farmacéuticos (CAFs) son las moléculas que actúan dentro del organismo para tratar una enfermedad o dolor. Los CAFs son moléculas con estructuras químicas muy diversas. Una característica importante de estos compuestos es que son muy resistentes, es decir conservan su estructura y función por mucho tiempo. Esto ha permitido que los medicamentos tengan un tiempo de 24 meses o más de anaquel, es decir que duren mucho tiempo antes de su venta y uso. Los medicamentos son producidos en sus diversas presentaciones, vía oral (jarabe, tabletas, cápsulas), inyectable, cutánea (cremas, ungüentos) externa (soluciones oftálmicas, óticas) todos ellos llevan el compuesto activo y dependiendo de la presentación y hacia dónde va dirigido contiene otras sustancias que le dan características específicas de liberación en el

organismo, adsorción en diferentes órganos, distribución por vía sanguínea, hasta que es excretado y sale del organismo.

Los compuestos con actividad farmacéutica se han utilizado desde épocas antiguas, para aliviar el dolor y tratar de curar las enfermedades. Inicialmente se usaban plantas y o sus extractos que poseían propiedades específicas para dolores y ciertos males.

Con el avance de la ciencia y la tecnología se fueron conociendo los compuestos que contenían estas plantas, conocidos ahora como los principios activos. También se empezaron a conocer muchos otros compuestos con propiedades importantes, producidos por microorganismos. A partir de estos avances, en la actualidad los CAFs se obtienen mediante tres procesos, los que se producen directamente por microorganismos o se extraen de planta, los obtenidos por biosintéticos y los producidos por síntesis química.

1. Naturalmente, muchos de los CAFs son producidos por microorganismos, es decir por biotecnología, como es el caso de los antibióticos o por plantas como los esteroides.
2. Biosíntesis química, algunos son bio-sintetizados, en este caso se utiliza una molécula obtenida naturalmente por algún microorganismo, a esa molécula se le hace alguna modificación química y se obtiene otro CAF distintito al original.
3. Por síntesis química, este proceso consiste en sintetizar algún compuesto con actividad farmacéutica, generalmente se busca reproducir alguno que ya existe en la naturaleza, con algunas modificaciones en su molécula. Son moléculas sintetizadas por reacciones químicas y con aplicación farmacéutica.

Beneficios de los fármacos

Los fármacos han ayudado a evitar la muerte de millones de personas, actualmente es impensable una vida sin estos compuestos ya que brindan bienestar y mejoran la calidad de vida de las personas al controlar o curar muchas enfermedades y quitar dolor o molestias físicas. También han tenido un papel importante en el incremento de la vida media de las personas, en México la esperanza de vida en 2016 fue de 78 años para las mujeres y de 73 años para los hombres (Quiroga, 2020).

Los fármacos. Así mismo han ayudado a la economía de los agropecuarios dedicados a la cría de animales para consumo humano. Los fármacos son administrados para mantener sanos a los animales y evitar pérdidas económicas (Valladares et al., 2019).

El consumo de productos farmacéuticos a nivel mundial ha aumentado con el transcurso de los años. En un estudio Pérez & Quiroga (2013) reportaron los datos indicadores de la industria farmacéutica en México en el año 2012, el consumo fue de 13,663 millones de dólares representando un porcentaje menor al de 3.3% del consumo mundial. Este valor es muy bajo en comparación con países como: China, Estados Unidos, Japón, Francia y Bélgica, los cuales representan aproximadamente el 63% del consumo mundial. Se pronosticó que para el año 2020 a nivel global se llegará a 2,184 miles de millones de dólares. Los países desarrollados tienen mayor acceso y por lo tanto consumo de medicamentos en comparación con países menos desarrollados, como en Latinoamérica, donde el consumo de los fármacos es limitado debido al alto costo de estos productos.

El consumo mundial de estos compuestos aumenta cada año, debido al incremento

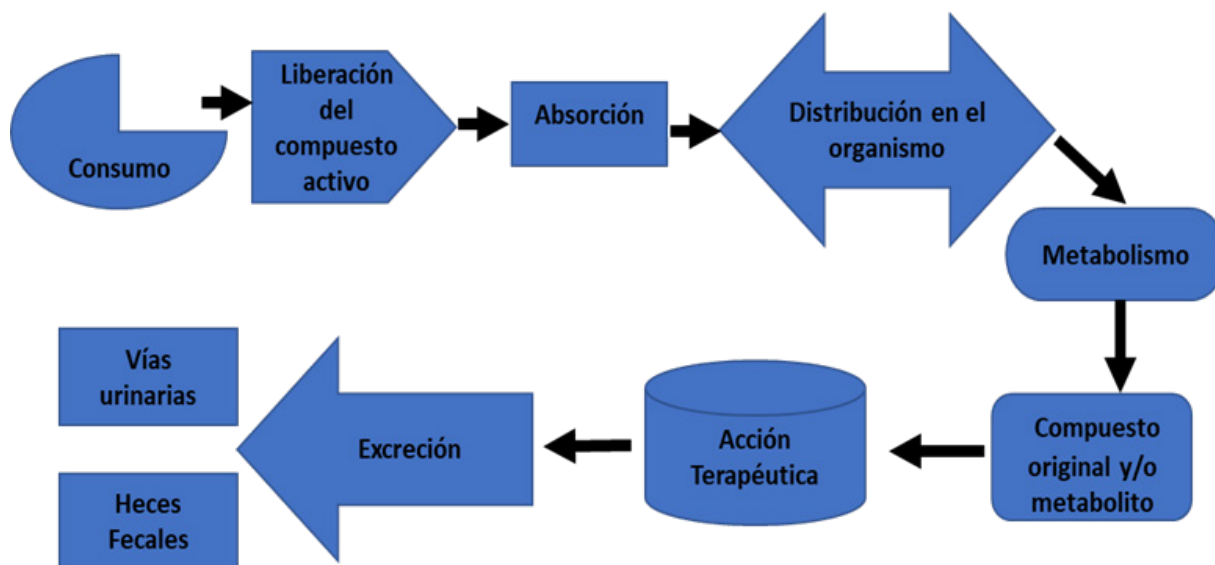


Figura 1. Ruta del principio activo farmacéutico del medicamento desde que es ingerido por el humano hasta que sale del organismo.

de la población y de la cría de animales, lo que ha ocasionado un problema de contaminación ambiental reciente.

Existe gran variedad de CAFs, y se agrupan de acuerdo con su uso terapéutico por ejemplo analgésicos/antiinflamatorios, antibióticos, anticancerígenos, psiquiátricos, hormonas, antihipertensivos, reguladores de lípidos, anti-diuréticos, anti-epilépticos, anti-diabéticos, radiología de contraste, antivirales, anti-histamínicos, entre otros. Todos son usados ampliamente y ayudan a mejorar la calidad de vida actual de la población mundial.

Los fármacos dentro del organismo y su eliminación

Los medicamentos pueden ser administrados de varias formas, las más comunes son por vía oral, intramuscular, intravenosa y cutánea. Dentro de los organismos los CAFs son distribuidos por el torrente sanguíneo, metabolizados, absorbidos y excretados. En la figura 1 se muestra la ruta que siguen los CAFs en el organismo humano, desde su consumo hasta la excreción.

Ya liberado el fármaco dentro del organismo es absorbido y distribuido hasta alcanzar el objetivo terapéutico. El compuesto activo puede actuar directamente o bien ser metabolizado para producir un compuesto con mayor actividad, y así llevar a cabo la acción terapéutica. Una vez que ya realizó esta acción, se eliminan por medio de los órganos que metabolizan y excretan los fármacos, el hígado y los riñones. Por último, los CAFs o sus metabolitos producidos durante el metabolismo, después de realizar su acción terapéutica los CAFs, son liberados del organismo a través de las vías urinarias, sudor, saliva y heces fecales, como se muestra en la figura 1 (Armijo, 2014).

Los Fármacos como contaminantes del ambiente

Los fármacos presentes en las aguas residuales, como contaminación, provienen principalmente del consumo humano, del consumo animal, ya sea veterinario y/o cría de animales como alimento para el hombre, y de los medicamentos cuya fecha de caducidad venció. También las industrias que producen los

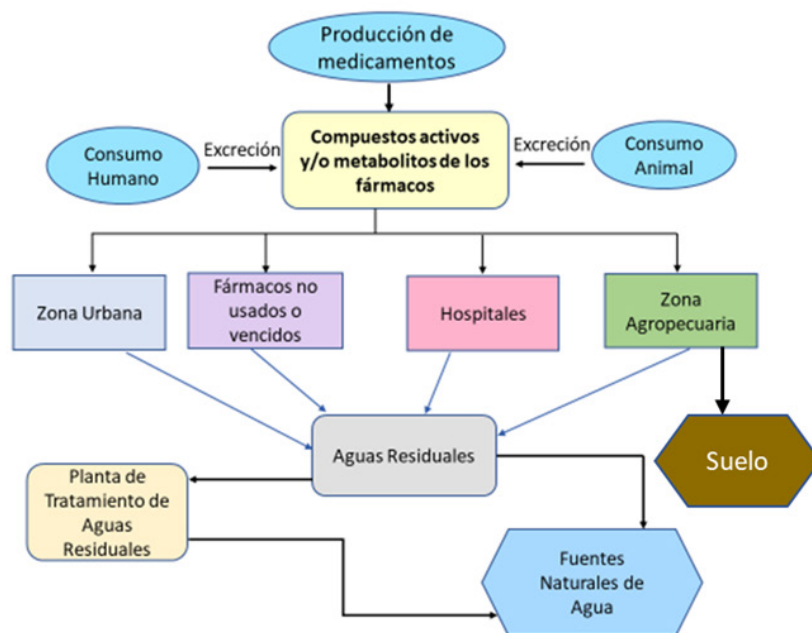


Figura 2. Origen y destino de los fármacos en el medio ambiente

CAFs o las farmacéuticas que las envases pueden ser fuentes de contaminación, aunque estas a niveles muy bajo, prácticamente no desechan estos compuestos por el estricto control de calidad que manejan (Figura 2).

En las zonas urbanas los CAFs, al ser eliminados por los humanos y animales (uso veterinario), llegan a las aguas residuales (Figura 1). También los medicamentos que desechamos, porque ya no los utilizamos o están caducos se van a la basura y o directamente al caño. Los que se tiran al caño llegan directamente a las aguas residuales, los que están en la basura llegan al suelo, por lixiviación que es la fase líquida de la basura y pueden llegar a aguas profundas. Las aguas residuales pueden ser tratadas o descargadas directamente a las fuentes naturales de aguas. En el caso de que el agua residual sea tratada, al salir de la planta generalmente aun contiene los CAFs o sus metabolitos, ya que las plantas de tratamiento de aguas no están diseñadas para remover estos compuestos. Algunos CAFs quedan retenidos en los lodos activados de las plantas de tra-

tamiento de aguas. En México las aguas tratadas se utilizan para riego, llevando así los CAFs a suelo y fuentes superficiales de agua, como los ríos y aguas costeras.

En las zonas agropecuarias los animales eliminan los CAFs directamente al suelo y o aguas superficiales. De ahí pueden migrar hacia diversas aguas superficiales y subterráneas o quedar absorbidos en el suelo.

El agua sin tratar o tratada contienen los CAFs y así llegan a las fuentes naturales de agua, como mares, ríos y fuentes de agua subterráneas, incluso se han detectado en el agua potable. Es así como estos compuestos presentes en las diversas fuentes de aguas se convierten en contaminantes ambientales. Son llamados contaminantes emergentes o microcontaminantes, debido a que se encuentran en concentraciones muy pequeñas, de nanogramos a microgramos por litro (Figura 2).

Los CAFs detectados con mayor frecuencia y concentración como contaminantes

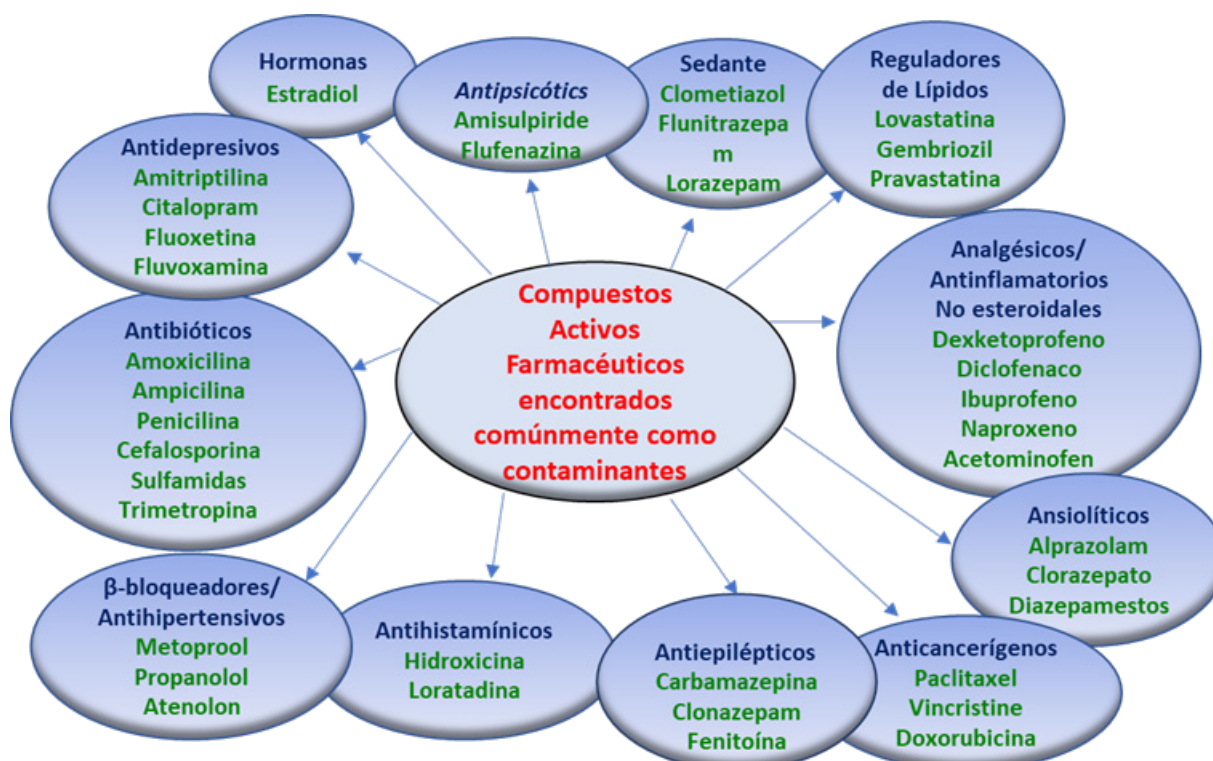


Figura 3. Algunos de los compuestos activos farmacéuticos, agrupados por uso terapéutico, encontrados frecuentemente en las aguas residuales y en las diversas fuentes de aguas naturales como contaminantes.

del ambiente son los analgésicos/antiinflamatorios, los antibióticos, los anticancerígenos, los antihipertensivos, los psiquiátricos, las hormonas, los reguladores de lípidos entre otros (figura 3). Se ha demostrado que la presencia de CAFs en las fuentes naturales de aguas tienen efectos dañinos, a continuación, se mencionan algunos de estos efectos en organismos acuáticos.

Toxicidad de los CAFs

Por la concentración en que se encuentran los CAFs en las fuentes de aguas, hasta el momento no han afectado la salud humana. Entonces, ¿por qué se consideran contaminantes? Es debido a que se ha demostrado que la presencia de los CAFs en ríos y mares tiene efectos tóxicos en algunos organismos acuáticos, como en peces, algas, crustáceos, moluscos. La

toxicidad depende del tipo y concentración de los fármacos, así como de las especies de organismos que viven en los ríos y mares. Es así como estos compuestos presentes en las diversas fuentes de aguas se convierten en contaminantes ambientales. Es decir, los CAFs son absorbidos o consumidos por organismos acuáticos, quienes no son los organismos objetivos para los cuales fueron diseñados o producidos los CAFs. Estos compuestos se bioacumulan en los organismos causando diversos daños (Santos et al., 2009).

Entre los principales efectos dañinos se puede mencionar que disminuyen la reproducción de los organismos. En peces como la trucha, el pez japonés medaka y el pez dorado, se ha demostrado que causan efectos teratogénicos, es decir malformaciones, alteraciones morfoló-

gicas y/o funcionales (Figura 4). Se ha encontrado diclofenaco en branquias y riñones de peces.

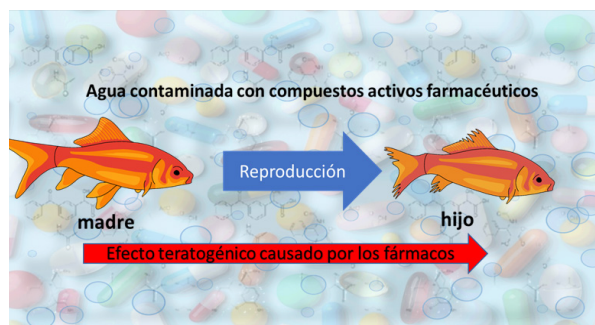


Figura 4. Malformaciones de un pez que nació de una madre que vive en agua contaminada por CAFs. Las aletas deformes y menos número de aletas, así como el tamaño del pez.

Algunos fármacos son disruptores endócrinos, es decir actúan como compuestos que alteran el sistema hormonal de los peces. Se ha demostrado que estos compuestos causan feminización de los peces, afectando de esta forma su reproducción. Los CAFs inhiben la biosíntesis de clorofila de las microalgas, provocando daños severos e incluso a muerte. Cuando llegan a estar en concentraciones un poco mayor, los CAFs pueden tener efectos letales. La dosis letal es la cantidad de una sustancia o de un agente químico o físico (radiación) que mata al 50% de los organismos de una población bajo un conjunto de condiciones definidas.

Otro problema gran problema observado, es que los antibióticos presentes, en concentraciones pequeñas, en las diversas fuentes de aguas naturales están causando que muchos microorganismos, especialmente bacterias patógenas, desarrollen resistencia a estos compuestos. Esto puede originar un problema de salud mundial, si la mayoría de las bacterias crean resistencia hacia los antibióti-

cos. En ese momento, no habrá forma de controlar las infecciones que estos organismos causan, tanto en humanos como en animales de cría.

Conclusiones

Es importante reflexionar sobre el uso de los medicamentos y tener claro que son productos indispensables en la vida actual y principalmente que en este trabajo no se busca dejar de consumirlos. Todos necesitamos de los medicamentos y en la mayoría de las veces nos curan y/o alivian el dolor. El objetivo de este trabajo es informar cómo los CAFs se convierten en contaminantes cuando llegan a las fuentes de agua y son absorbidos o ingeridos por organismos acuáticos. Ya se mencionó que los CAFs que llegan a las fuentes naturales de agua provienen primordialmente del consumo humano, uso veterinario y desecho de medicamentos, a través de las aguas residuales tratadas o no tratadas. También son vertidos directamente al suelo yaguas superficiales por las excreciones de animales de cría, es decir por la actividad agropecuaria. En las fuentes naturales de aguas estos CAFs se convierten en compuestos tóxicos para los organismos que viven en esos ecosistemas, produciéndoles principalmente mal formaciones, problemas de reproducción e incluso la muerte, por lo que no si no se toman medidas necesarias para eliminarlos, antes de que lleguen a las fuentes de agua naturales, podrían causar en un futuro próximo la extinción de las especies acuáticas que resultan más sensibles a la presencia de estos compuestos. El grupo de los antibióticos también causa que las bacterias desarrollen resistencia, lo que puede llegar a ser un problema de salud mundial,

Referencias

1. Armijo, J.A., Absorción, distribución y eliminación de los fármacos. Farmacología humana / Jesús Flórez (dir.), ISBN

978-84-458-2316-3, p. 46-71, 2014.

[http://www.pdcorynthia.sld.cu/Documentos/estudiantes/Absorci%F3n%20distribuci%F3n%20y%20eliminaci%F3n%20de%20los%20f%](http://www.pdcorynthia.sld.cu/Documentos/estudiantes/Absorci%F3n%20distribuci%F3n%20y%20eliminaci%F3n%20de%20los%20f%20)

2. Pérez, G., Quiroga, G. Industria Farmacéutica. Secretaría de Economía, 2013. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/62881/130820_DS_Farmacutica_ESP

3. Quiroga, R. Mujeres tienen previsión de cinco años más. Esperanza de vida en México creció a 76.6 años, informa la OMS. El Economista. 2020 [https://www.eleconomista.com.mx/arteseideas/Esperanza-de-](https://www.eleconomista.com.mx/arteseideas/Esperanza-de-vida-en-Mexico-crecio-a-76.6-anos-informa-la-OMS-20200513-0144.html)

[vida-en-Mexico-crecio-a-76.6-anos-informa-la-OMS-20200513-0144.html](https://www.eleconomista.com.mx/arteseideas/Esperanza-de-vida-en-Mexico-crecio-a-76.6-anos-informa-la-OMS-20200513-0144.html)

4. Santos, L.H., Araújo, A.N., Fachina, A., Pena, A., Delerue-Matos, C., Montenegro, M.C., Ecotoxicological aspects related to the presence of pharmaceuticals in the aquatic environment. J. Hazard Mater. 175, 45-95, 2010. doi: 10.1016/j.jhazmat.2009.10.100.

5. Valladares, B., Velázquez, V., Zaragoza, A., Bedolla, C., Rivero, N., Felipe, Y., Efecto Perjudicial en Salud Pública. BM editores, 2019. <https://bmeditores.mx/ganaderia/uso-de-anabolicos-en-la-produccion-animal-efecto-perjudicial-en-salud-publica/>

**La diversidad taxonómica,
filogenética y funcional:
un acercamiento al caso
de “El Arca de Noé”**

***Taxonomic, phylogenetic
and functional diversity.
An approach to the case
of “Noah’s Ark”***



M. C. Alexis Arriaga Ramírez
Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo

Resumen:

Utilizando el evento bíblico de “El Arca de Noé” se hacen una serie de planteamientos enfocados en introducir al lector en diferentes conceptos utilizados en la actualidad en ecología de comunidades. También se introduce al lector una serie de planteamientos relacionados con la aplicación de estos temas en la conservación de la biodiversidad.

Palabras clave:

Rasgos funcionales, árboles filogenéticos, conservación, Arca de Noé

Abstract:

Using the biblical event of “Noah’s Ark”, a set of proposals are made focused on introducing the reader to different concepts currently used in community ecology. The reader is also introduced to the application of these issues in conservation of species issues.

Key words:

Functional traits, phylogenetic trees, conservation, Noah’s Ark

El Arca de Noé es uno de los relatos más populares de la Biblia, en el que se narra cómo, por orden de Dios (Yahvé o Jehová), el patriarca Noé decidió construir una embarcación para la salvación de aquellos que creyeran en la “promesa del diluvio universal”. No obstante, la narración del evento expone que solo fue Noé, su familia y siete parejas de cada animal “puro” (kosher, del hebreo ‘apto’ o ‘adecuado’) y una pareja de cada animal “no puro” (no kosher) quienes abordaron el arca. Todos ellos, preservados del diluvio universal, podrían repoblar la Tierra con su descendencia.

La Real Academia Española (RAE), ha definido el concepto de “biodiversidad” como la “variedad de especies animales y vegeta-

les en su medio ambiente”. Sin embargo, el concepto de biodiversidad tiene su origen en el año de 1980. Lovejoy, quien realizaba un estudio para el Fondo Mundial para la Naturaleza (WWF, por sus siglas en inglés), escribió en su reporte acerca de la diversidad biótica o biológica, y a pesar de que no dio una definición puntual de la misma, utilizó este concepto para referirse al número de especies presentes en un sitio (Núñez et al., 2003). Actualmente, el concepto de biodiversidad se ha utilizado ampliamente para hacer referencia a la variedad de la vida en todos los niveles de organización, clasificada tanto por criterios evolutivos (filogenéticos), como ecológicos (funcionales).

Históricamente, los esquemas de conservación en el mundo han tenido como meta la preservación del mayor número de especies en un área determinada, priorizando de esta manera a la diversidad de especies sobre otros componentes de la biodiversidad. En la actualidad, se presenta un interesante auge por tomar en cuenta otras dimensiones, como la funcional o la filogenética, o una combinación de estas. Dichos componentes de la biodiversidad se relacionan con la productividad primaria de los ecosistemas, el ciclaje de nutrientes y la resiliencia de las comunidades naturales a la invasión por especies exóticas, entre otros procesos. Además, estos componentes tienen implicaciones para diseñar acciones de conservación y manejo de recursos naturales, así como para seleccionar especies para la restauración ecológica de sitios perturbados.

En ese sentido, y tomando como modelo de estudio el acercamiento que tuvo Noé a la hora de seleccionar especies para contener la mayor biodiversidad posible en su arca (sensu lato Perry, 2010), surge el siguiente cuestionamiento: ¿cómo hubiese hecho Noé

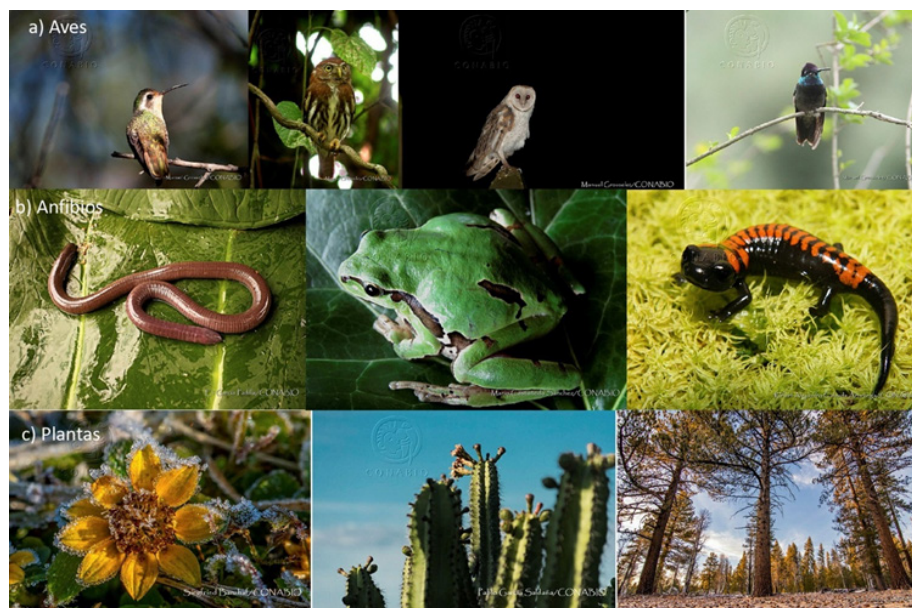


Figura 1. Representación de la diversidad biológica de diferentes grupos de organismos.

para llevar en su arca la mayor cantidad de diversidad taxonómica, funcional y filogenética? Bueno, pues tratemos de darle claridad a cada enfoque en las siguientes secciones.

1) De diversidades taxonómicas...

La diversidad taxonómica, ha sido definida por los científicos como la media y la varianza del número de especies por género, y de especies por familia (Neeson et al., 2013). Es decir, la diversidad taxonómica representa el número y la variedad de formas de seres vivos que habitan en un área geográfica determinada (ver figura 1).

La “diversidad” en biología, ha sido uno de los términos mayormente utilizados para hacer referencia a otro concepto importante, la “complejidad ecológica” presente en la estructura de una comunidad. Es decir, la presencia de diferencias entre los elementos que componen una colección de especies. Para medir la biodiversidad, se han utilizado una serie de índices que, en general, tratan de describir de manera matemática (y relativamente sencilla)

la complejidad ecológica que presenta un conjunto de especies. Entre los índices más populares utilizados por los ecólogos para medir la diversidad podemos encontrar: el Índice Shannon, el exponencial del índice de Shannon, el índice de Ginni-Simpson, el inverso del índice de Ginni-Simpson, la riqueza de especies, entre otros.

Sin embargo, dichas medidas no proporcionan información acerca de las relaciones a nivel evolutivo y con el medio ambiente que presentan las comunidades de organismos. En la taxonomía encontramos un marco normativo que nos permite identificar, cuantificar y evaluar el estado de la biodiversidad de una comunidad. Esto, a su vez, nos permite establecer prioridades de conservación, y, por lo tanto, se constituye como una piedra angular en la conservación de la biodiversidad.

En Levítico 11 y Deuteronomio 14, se describen una serie de mandatos taxonómicos supuestamente propuestos por Dios, el cual postula la existencia de animales “puros”

y “no puros”. En síntesis, los animales terrestres puros eran considerados aquellos rumiantes que tuvieran pezuña hendida (dividida), por lo que algunos ejemplos de animales puros se encontraban representados en la res, el antílope, la cabra, el venado; mientras que ejemplos de animales terrestres no puros podrían ser los conejos y los cerdos. Dentro de los animales acuáticos puros se consideraban aquellos que tenían aletas y escamas, por lo que ejemplos de animales acuáticos puros, dentro de esta construcción teocentrista (Dios como el centro del universo), serían los pargos, los róbalo, el bacalao, el salmón; mientras que ejemplos de animales acuáticos no puros podrían ser la langosta, el cangrejo y el camarón.

Esta diferenciación taxonómica inverosímil entre animales “puros” y “no puros”, según el relato bíblico, era bien conocida por Noé antes de que tuviera lugar el diluvio universal, el cual fue el criterio de selección con el que éste resguardó a las especies por mandato divino, ¿Cuántos seres vivos puros e impuros transportaría la supuesta arca? es en realidad un misterio. En ese sentido, uno de los debates creacionistas más destacados ha sido utilizar el concepto de “baramin” o “tipos” en lugar de especies. Un “baramin” (del hebreo bara: creado, min: tipo), según los creacionistas, es una unidad de vida originalmente creada por Dios, el problema fundamental que engloba este concepto es que dentro de cada “tipo” hay un potencial muy grande de variación (Moore, 1983). Este concepto conduce a una diferenciación muy abstracta entre las unidades bióticas que podrían abordar la supuesta arca, haciendo que se presenten estimaciones numéricas muy dispares entre creacionistas con respecto al número de “tipos” que podrían existir, que van desde los 1,544 hasta 50,000 tipos que se presume iban a bordo de la misma (Moore, 1983).

Actualmente sabemos que se han descrito taxonómicamente alrededor de 1.2 millones de especies eucariotas, y se predice la existencia de unas 8.7 millones en el planeta (Mora et al., 2011). Esto obviamente representa un problema mayúsculo en el mito de Noé, ya que se presume que el arca tenía una extensión limitada de 155 metros de largo por 26 de ancho y 25 m de alto, lo cual equivale aproximadamente al largo de un campo de fútbol y la altura de la gran esfinje de Giza. Una embarcación de estas dimensiones podría tener aproximadamente un volumen de 40,000 metros cúbicos (m³), la cual de ninguna manera podría albergar a 9 millones de especies, ni la combinación de siete parejas de organismos puros, por una pareja de no puros.

Solo para poner un poco de contexto, tomando las 1.2 millones de especies descritas taxonómicamente actualmente, considerando que la mitad fuesen “puras” (8,400,000 individuos), y la otra mitad fuesen “no puras” (1,200,000 individuos), nos da un total de 9,600,000 individuos, eso dividido entre los 40,000 m³ que es el volumen del arca, da como resultado un espacio de 0.0041 m³ para cada individuo (ignorando el hecho de que Noé debía destinar un espacio en la embarcación para un año de víveres con los que alimentaría a todos los pasajeros del arca). El volumen que ocupa una caja para transportar una cebra promedio es de aproximadamente 2.2 m³, el de una jirafa promedio es de 2.8 m³, el de un hipopotamo de 6.0 m³ (Moore, 1983). Bajo este contexto, el arca que diseñó Noé en aproximadamente 100 años, debería tener dimensiones mucho más amplias para albergar a quizás millones de individuos, tal vez el arca debería tener el tamaño de algunos países pequeños como San Marino o Tuvalu.

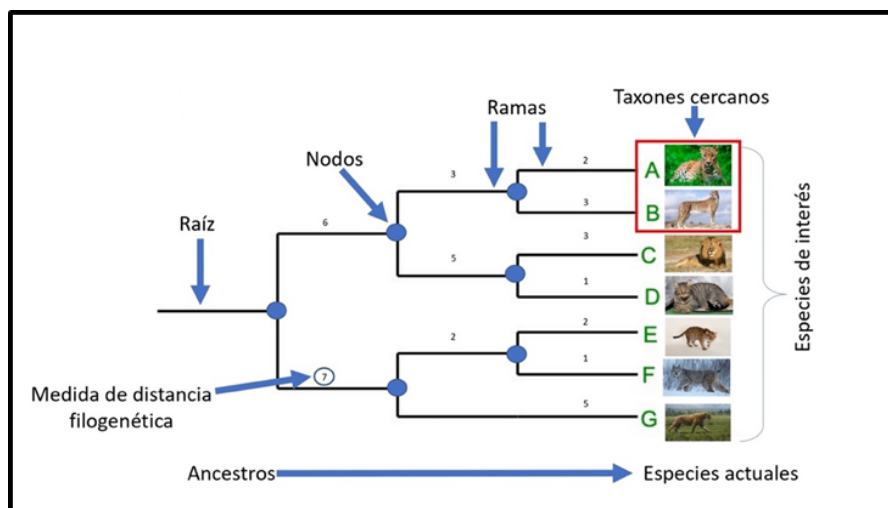


Figura 2. Ejemplo de un árbol filogenético y sus componentes principales para el caso de los felinos.

2) De diversidades filogenéticas...

A diferencia de la diversidad taxonómica, que nos permite conocer la variedad y el número de especies presentes en un sitio, la diversidad filogenética tiene como objetivo principal medir la biodiversidad tomando en cuenta el factor evolutivo, es decir, la diversidad de características que las especies han adquirido en términos de su historia evolutiva (Rivera, 2020).

Usualmente, los científicos determinan la diversidad filogenética mediante el uso de árboles filogenéticos, que son representaciones gráficas (parecidas a un tipo de cuadro sinóptico) en el que se muestran las relaciones de parentesco entre una agrupación de especies y/o taxones (ver figura 2). Un árbol filogenético es una hipótesis científica sobre las relaciones evolutivas de un conjunto de especies, no es un hecho definitivo. En ese sentido, la métrica de diversidad filogenética (PD) de Faith (1992, p. 4), la cual, es quizás la más utilizada actualmente; se calcula mediante la suma de las longitudes de las ramas del camino mínimo que une un conjunto de taxones en un árbol filogenético (ver figura 2). Es decir, esta métrica

mide la historia evolutiva compartida entre taxones que son parte de una muestra.

En los últimos 30 años, la biología de la conservación ha ampliado la calidad de sus horizontes de información para poder tomar decisiones puntuales, motivada principalmente por la grave crisis global de extinción de especies provocada por el hombre. Ante este escenario, la diversidad filogenética se ha presentado como una nueva herramienta para la conservación, que considera la evolución y la acumulación de características adquiridas a través del tiempo. Una de las principales ideas para usar a la diversidad filogenética como un criterio para la conservación de la biodiversidad, surge detrás de reconocer su valor intrínseco, en donde, al salvaguardar este componente se garantiza la protección de millones de años de evolución (Rivera, 2020). Además, se le ha relacionado con diversos procesos como la productividad de los ecosistemas y la resistencia de las comunidades a la invasión por especies exóticas, los cuales resultan criterios relevantes para llevar a cabo objetivos de conservación precisos.

Volviendo al punto de los baramines o “tipos”, como señala Moore (1983, p. 7), existen problemas genéticos puntuales detrás de esta clasificación con la cual Noé conformó su arca. Tomando el ejemplo de los caninos, en donde los creacionistas han puesto a lobos, perros, coyotes, dingos, fennecs, etc; se necesitarían conjuntos de cromosomas gigantes con una cantidad bestial de alelos (cada una de las formas en que puede manifestarse de un gen) que albergaran la inmensa variedad de rasgos como el tipo de pelaje, el color de los ojos, la forma de la cabeza, y/o el tamaño de la dentadura, que pudiesen manifestar las diferentes especies que se encontraban englobadas en una población de solo siete parejas de animales puros y una pareja de no puros, lo cual resulta prácticamente inviable.

En los milenios posteriores al diluvio, los animales que bajaron del arca debieron repoblar la tierra diversificando su descendencia en todas las especies de las comunidades naturales que conocemos hoy en día. Esto, como señala Moore (1983, p. 7) tiene como trasfondo, un dilema genético circunstancial a la hora de elegir a los individuos de cada “baramin”, es decir, ¿Qué individuos elegiría Noé del baramín canino para englobar la inmensa diversidad filogenética contenida en los caninos? ¿Un coyote macho y una hembra de lobo siberiano?, o en el caso del baramín felino, ¿un macho león y una hembra de gato doméstico? ¿Cómo podría Noé saber todo esto?

Las parejas de animales no puros (solo hembra y macho por baramín) debían contener toda la información genética de su grupo en solo dos individuos. Esto, obviamente, lleva consigo problemas filogenéticos y genéticos importantes como el entrecruzamiento consanguíneo entre los descendientes, la deriva genética (cambios en la frecuencia

de aparición de las variedades que puede tener un mismo gen), mutaciones deletéreas (alteraciones genéticas que aumentan la probabilidad de padecer ciertas afecciones), y problemas de cuello de botella (reducción de la variabilidad genética debido a un tamaño poblacional reducido).

En fin, en la actualidad el uso de la diversidad filogenética en la toma de decisiones relacionadas con la conservación aún sigue siendo un tema a discutir. Esto en gran medida, de la biodiversidad que hasta hace un par de décadas eran completamente ignorados. Seguro que este tipo de herramientas le hubiese sido de gran utilidad a Noé para conformar un arca con miras a preservar no solo un gran número de especies, sino también una serie de procesos evolutivos asociados a las mismas. Los científicos siguen trabajando para desarrollar mejores metodologías enfocadas en resolver las diferentes problemáticas que tiene el mundo actual, como es el caso de las grandes extinciones de especies.

En el futuro cercano, como señala Rivera (2020, p. 274), es casi seguro que seguirán surgiendo nuevas incógnitas a las cuales los científicos deberán enfrentarse, como: ¿Qué debemos priorizar como sitios destinados a conservación, áreas con alta concentración de especies o áreas con alta diversidad de características o historia evolutiva? ¿Qué componentes de la biodiversidad se ven salvaguardados con las legislaciones que buscan proteger los ecosistemas? ¿Qué debería ser prioridad para conservación, aquellas áreas en donde se han originado múltiples especies afines entre sí o aquellas en donde se refugian linajes antiguos y lejanamente emparentados?

3) De diversidades funcionales...

Recientemente, los científicos han introdu-

cido en ecología el concepto de “diversidad funcional”, para hacer referencia a otro componente de la biodiversidad. Este concepto, se centra en describir las funciones que desempeñan los organismos en una comunidad o ecosistema, por medio del estudio de la variedad de “rasgos funcionales”. En el caso de las plantas, los rasgos funcionales son características morfológicas (p. e. altura, diámetro a la altura del pecho, longitud de la raíz, etc.) (ver figura 3), fisiológicas (p. e. potencial hídrico de las hojas, carbohidratos solubles totales, conductividad electrolítica, etc.) y fenológicas (p.e. tiempo de retención de las hojas, peso de biomasa aérea, etc.); que impactan directamente sobre la capacidad de adaptación, sobrevivencia y la producción de descendientes de las especies.

La manera más sencilla de describir la diversidad funcional de un sitio es separando a las especies por “grupos funcionales”. Es decir, se fragmenta un grupo de especies en subconjuntos o colecciones de organismos que comparten características que les hacen desempeñar funciones similares en el ambiente, por ejemplo: plantas, herbívoros y carnívoros. Además, existen al menos cuatro componentes principales de la diversidad funcional en ecología, que son: la riqueza, la equitatividad, la divergencia y la especialización. Estos cuatro componentes ayudan a los científicos a examinar con mayor detalle los mecanismos y procesos que relacionan a la diversidad con el funcionamiento de los ecosistemas (Córdova-Tapia & Zambrano, 2015, p. 81).

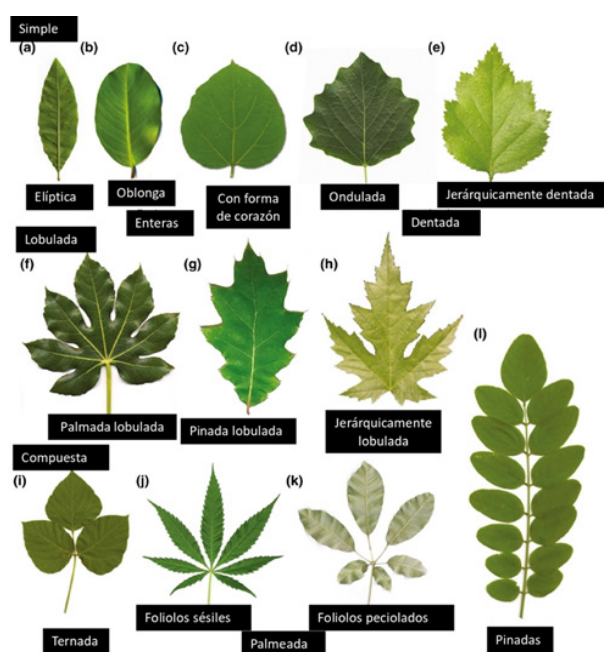


Figura 3. Ejemplos de diferentes formas y tipos de hojas, estas características pueden representar adaptaciones que les ayudan a las plantas a desarrollar diferentes funciones en el ecosistema, como: una mayor / menor captación de luz, mayor / menor retención de agua, mayor / menor captación de CO₂, etc. Imagen modificada de Runions et al., (2017, p. 2).

El funcionamiento del ecosistema, se ha vuelto una prioridad en asuntos relacionados con la conservación, debido a que muchos servicios ecosistémicos con valor de uso para el ser humano, como el almacenamiento de carbono y la producción de alimentos, se encuentran asociados directamente con el funcionamiento, y por lo tanto, existen fuertes incentivos económicos para conservarlos (Cadotte et al., 2011, p. 1085).

Para pensar en la metáfora del Arca de Noé desde esta perspectiva, hay que considerar que en la preservación de grupos funcionales existen especies que son decisivas, aquellas con funciones únicas que ninguna o muy pocas especies llevan a cabo. Estos grupos funcionales con una sola o muy pocas especies, son puntos estratégicos de conservación, y a menudo son conocidos como “especies clave”. Uno de los ejemplos más populares de especies clave es el caso de las abejas, las cuales utilizan el néctar de muchas flores e indirectamente transportan polen para ayudar al proceso de reproducción de muchas

plantas que el ser humano suele consumir en su alimentación. Por lo que, la conservación del grupo funcional de los polinizadores y en especial de las abejas, es de suma importancia desde el punto de vista económico y ecológico.

Esto, como señala Perry (2010, p. 479), implica para Noé la creación de un “ecosistema de funcionamiento” en el arca, en el cual estuviesen representadas todas las funciones que se desarrollan en los diversos ecosistemas que existen en el planeta Tierra. Por lo que, retornando al asunto de los baramines o tipos, ¿Noé habría construido el arca pensando en las diferentes funciones que presentarían los ecosistemas, luego de que los tipos puros y no puros que seleccionó bajasen del arca?, ¿Priorizaría Noé la preservación de especies funcionalmente clave a la hora de ponerlas a bordo?

Al tratar de responder estas preguntas, intuitivamente, el relato de Noé presenta muchos huecos de información desde el punto de vista de la diversidad funcional en ecología. Lo cual, por supuesto, debilita en muchos aspectos la creencia del relato bíblico de la conformación de un arca “perfecta”, que ayudase a Noé a preservar todas las especies y a los procesos ecosistémicos en las que éstas participarían.

Hoy en día y en la práctica, cada vez son más las estrategias de restauración y conservación que priorizan el uso de la diversidad funcional a nivel comunitario. El objetivo de estos proyectos es generar y/o mantener ecosistemas estables y funcionales (Cadotte et al., 2011, p. 1085). La diversidad funcional es una herramienta muy valiosa, la cual puede ayudarnos a resolver preguntas importantes con respecto a las diferentes problemáticas que pudie-

ran surgir en un futuro, a corto plazo, relacionadas con la pérdida de biodiversidad.

Conclusiones

La ecología de comunidades ha abierto las puertas para discutir nuevas visiones relacionadas con el manejo y conservación de la biodiversidad. A través de los años, la diversidad taxonómica ha cobrado una importante relevancia para diseñar herramientas orientadas a realizar acciones de conservación. Sin embargo, en la actualidad y debido al avance en diferentes campos de la ciencia como los sistemas de información geográfica, la ecofisiología, la bioestadística, y la genética, se ha logrado tener un panorama mucho más profundo acerca de los diferentes componentes de la biodiversidad, surgiendo de esta manera los enfoques filogenético y funcional.

La pérdida de biodiversidad que se encuentra íntimamente relacionada con el desarrollo de actividades humanas nos ha planteado nuevos retos de cómo entender la naturaleza. Las extinciones masivas de especies son un problema real al que nos enfrentamos como sociedad, no es un simple cuento popular o una saga surrealista de improbabilidades, como es el caso del Arca de Noé. Pero compareciendo ante las analogías, tal vez, si existiera un arca ésta sería el planeta Tierra, y solo tal vez, este barco que compartimos con las diferentes especies que coexistimos debiésemos conservarle y cuidarle mucho más para que llegue a buen puerto, porque al parecer el diluvio ya está ocurriendo

Referencias

Cadotte, M. W., Carscadden, K., y Mirotchnick, N., Beyond species: Functional diversity and the maintenance of ecological processes and services, *Journal of Applied*

Ecology, 48[5], pp. 1079–1087, 2011.

Córdova-Tapia, F., y Zambrano, L., Functional diversity in community ecology, *Ecosistemas*, 24[3], pp. 78–87, 2015.

Faith, D., Conservation evaluation and phylogenetic diversity, *Biological Conservation*, 61[1], pp. 1–10, 1992.

Moore, R., The Impossible Voyage of Noah's Ark, *Creation/Evolution Journal*, 4[1], pp. 1-39, 1983.

Mora, C., Tittensor, D. P., Adl, S., Simpson, A. G. B., y Worm, B., How many species are there on earth and in the ocean?, *PLoS Biology*, 9[8], pp. 1–8, 2011.

Neeson, T. M., Van Rijn, I., y Mandelik, Y., How taxonomic diversity, community structure, and sample size determine the reliability

of higher taxon surrogates, *Ecological Applications*, 23[5], pp. 1216–1225, 2013.

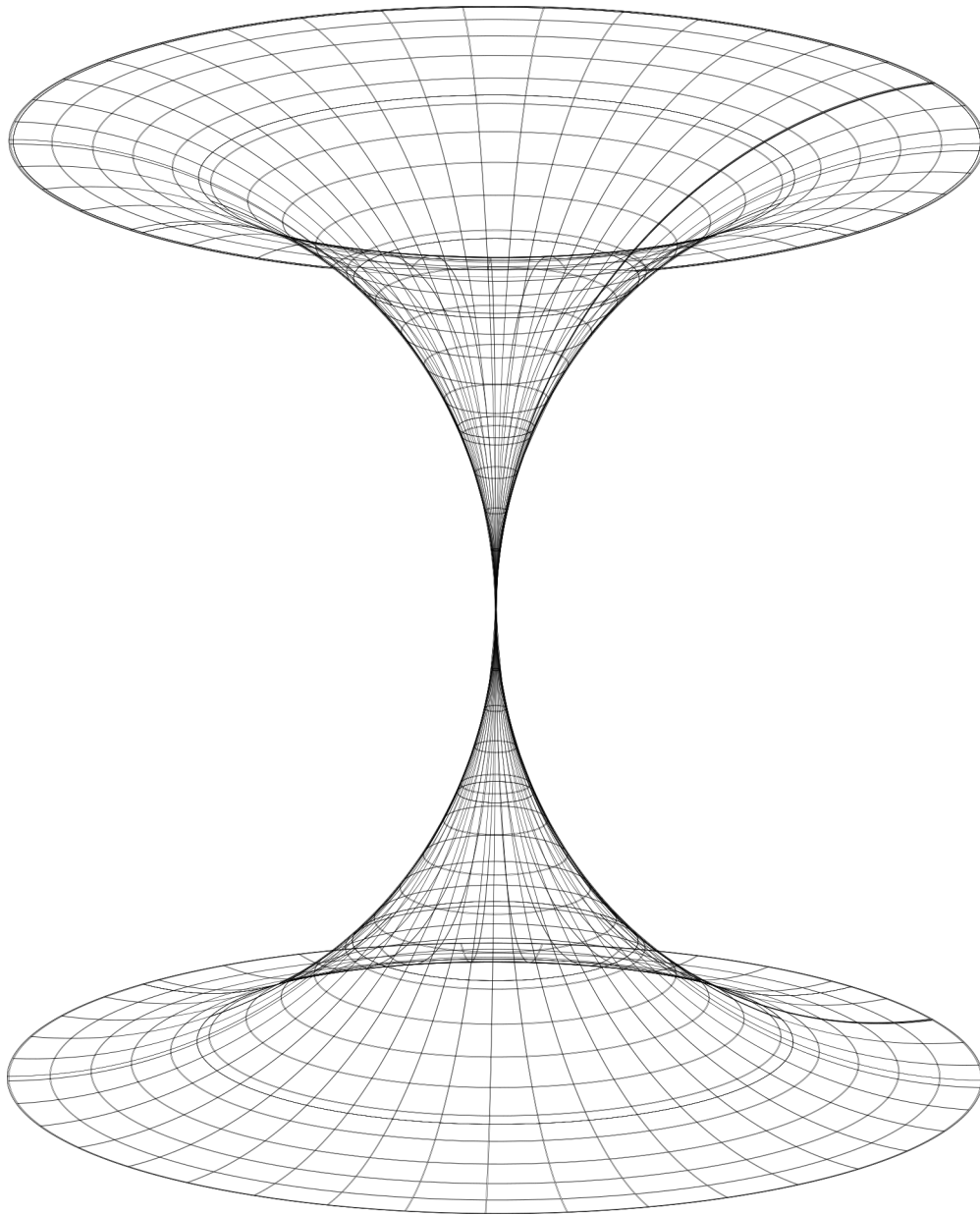
Núñez, I., González-Gaudiano, É., y Barahona, A., La biodiversidad: Historia y contexto de un concepto, *Interciencia*, 28[7], pp. 387-393, 2003.

Perry, N., The ecological importance of species and the Noah's Ark problem, *Ecological Economics*, 69[3], pp. 478–485, 2010.

Rivera, R., Diversidad filogenética : una forma de medir la historia evolutiva de la biodiversidad, *Desde el Herbario CICY*, 275 [December], pp. 270–275, 2020.

Runions, A., Tsiantis, M., y Prusinkiewicz, P., A common developmental program can produce diverse leaf shapes, *New Phytologist*, 216[2], pp. 401–418, 2017.

Método Montante:
Una alternativa para la solución
en la intercepción de dos
ecuaciones lineales dentro
de método gráfico



Mtro. Marco Antonio González Morales
Departamento de Ciencias Tecnológicas del Centro Universitario
de la Ciénega de la Universidad de Guadalajara

Resumen

El uso de modelos matemáticos para la toma de decisiones en el ámbito de la planeación de las empresas, es una aportación que ayuda a la gerencia para pronosticar un mejor manejo de los recursos disponibles dentro de las empresas, ya sean de carácter material, humano o financiero. Es por ello que el uso correcto de los diversos métodos disponibles, ayudan a la administración a una mejor optimización de dichos recursos, con dos finalidades primordiales, la de minimizar el costo para la transformación de esos recursos en productos y/o servicios, y la de maximizar el margen de utilidad o ganancia.

Es por esto, que este trabajo se abordará un método poco conocido y difundido (Montante) para aplicarse dentro del método gráfico para encontrar la solución de una intercepción de un sistema de ecuaciones lineales, el cual representaría una posible solución óptima para su análisis en la toma de decisiones.

Palabras claves. *modelo, método, variables, optimización, investigación, operaciones.*

Abstract

The use of mathematical models for decision making in the field of business planning is a contribution that helps management to forecast a better management of available resources within companies, whether they are material, human or financial. That is why the correct use of the various methods available, help the administration to better optimize these resources, with two main purposes, to minimize the cost of transforming these resources into products and/or services, and the to maximize profit or profit margin.

For this reason, this work will address a little-known and widespread method (Mon-

tante) to be applied within the graphical method to find the solution of an intercept of a system of linear equations, which would represent a possible optimal solution for its analysis in the decision making.

Keywords. *model, method, variables, optimization, research, operations.*

Introducción

La Investigación de operaciones, aunque originalmente no se llamó así, es de origen relativamente reciente. Los principios fundamentales de ésta surgieron por dos razones; la primera está relacionada con la oportunidad que los científicos tuvieron de atacar nuevos problemas del campo militar durante la Segunda Guerra Mundial, y la segunda fue la necesidad del estudio científico de los problemas de administración y mejorar la optimización de los recursos limitados dentro de los entes económicos (empresas) hasta el día de hoy. Estas dos causas se combinaron para producir la investigación de operaciones como al día de hoy se la conoce. (Taha, 2012)

En otras palabras, la investigación de operaciones trata de suministrar información analizada y significativa sobre cuestiones tales como “cómo”, “cuándo” y “qué ocurriría si ...”, que tradicionalmente se dejaban a las corazonadas, la intuición, el criterio y las suposiciones afortunadas. Es un enfoque al análisis operacional que permite a los gerentes mejorar la optimización de los recursos disponibles y la habilidad para tomar mejores decisiones.

Hasta el día de hoy, cada vez es más frecuente que los administradores se vuelvan hacia métodos cuantitativos y computadoras para llegar a la solución óptima de problemas que involucran un gran número de alternativas. El estudio de diversos métodos y la forma en que los administrado-

res los usan en el proceso de decisión es la esencia de la ciencia de la administración, entre ellos se encuentra un método poco difundido en México en esta rama de las matemáticas, el método Montante.

Método Montante

En la actualidad hablar de programación lineal e investigación de operaciones u operativa, implica la aplicación de diferentes métodos matemáticos con la finalidad de optimizar los recursos de una empresa o proyecto, en relación a estos métodos matemáticos existe un método poco difundido en la educación de pregrados, pero de gran eficacia en relación a la obtención de resultados dentro de los métodos para la solución de un sistema de ecuaciones lineales, este método es conocido como el método Montante, el cual fue creado por el **Dr. René Mario Montante Pardo** (1933 - 2019), Catedrático Emérito de la Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica de la UANL¹, quien en la entrevista para la revista CIENCIA UANL², menciona lo siguiente: *“En 1973 comencé a tratar de resolver determinantes con un método que fuera con puros enteros y lo encontré y le llamé Método Montante. Luego ese mismo método resolvió sistemas de ecuaciones lineales y la inversa de una matriz, calculó la matriz adjunta, resolvió determinantes, sistemas de ecuaciones homogéneas, el Método Montante hizo muchas cosas”* y agregó *“Yo pensé que eran puros determinantes. Pero cuando vi que resolvía ecuaciones lineales y con números enteros,*

dije: esto va a llegar muy lejos. Y ahora anda en todo el mundo. En la computadora es el más exacto del mundo”., propuso una manera diferente con el fin de simplificar el área de álgebra matricial, con la obtención de los mismos resultados de un sistema de ecuaciones lineales mediante la combinación de los procedimientos de la eliminación de Gauss-Jordan³ y la regla de Cramer⁴.

Una de las ventajas primordiales del método Montante es que, dentro de sus operaciones básicas, todas se basan en hacer cálculos por medio de determinantes, y en donde no se tiene que realizar operaciones para convertir en la unidad a los valores que serán pivotes y ceros el resto de los valores dentro de la matriz por cada columna como en Gauss-Jordan. Este método nace en el año de 1973 y fue publicado hasta 1976 una vez que se había utilizado para resolver sistemas de ecuaciones lineales. Actualmente el método se usa en diferentes aspectos del álgebra matricial, y es uno de los dos métodos principales que se utilizan, el otro es la eliminación de Gauss-Jordan, pero a diferencia de este método, Montante converge más rápido en sus operaciones, además es más eficiente en sus operaciones en comparación a otros métodos como la regla de Cramer, eliminación de Gauss-Jordan, suma y resta, sustitución, igualación, entre otros.

El método es de gran ayuda para encontrar raíces de varias variables de una forma más convergente en sus cálculos para la

¹ Universidad Autónoma de Nuevo León.

² Entrevista al doctor René Mario Montante Pardo por Edmundo Derbez García. Revista CIENCIA UANL / VOL. V, No. 1, ENERO-MARZO 2002. Pág.20.

³ En matemáticas, la eliminación de Gauss-Jordan, llamada así debido a Carl Friedrich Gauss y Wilhelm Jordan, es un algoritmo del álgebra lineal para determinar las soluciones de un sistema de ecuaciones lineales, encontrar matrices e inversas.

⁴ La regla de Cramer es un teorema del álgebra lineal que da la solución de un sistema lineal de ecuaciones en términos de determinantes. Recibe este nombre en honor a Gabriel Cramer (1704 - 1752).

⁵ Publicado en la editorial McGraw-Hill en un libro titulado “Métodos numéricos”. Tomado de la revista CIENCIA UANL / VOL. V, No. 1, ENERO-MARZO 2002. Pág.21.

toma de decisiones, pero de poca difusión, este método ayudaría a toda aquella organización que le implica tomar decisiones para realizar proyectos más concretos en relación a su organización.

Pero, así como tiene sus ventajas muy significativas en su procedimiento, cuenta con una limitación, la cual consiste en que solo se aplica para sistemas de ecuaciones cuadráticas, es decir, sistemas de ecuaciones que tengan el mismo número de ecuaciones que variables (2x2, 3x3, 4x4, etc.).

El modelo matemático en la toma de decisiones

Las técnicas matemáticas constituyen una parte principal de lo que se conoce como Investigación de Operaciones, las cuales son la base para una buena toma de decisión; sin embargo, esto no significa que los estudios prácticos sobre la Investigación de Operaciones, sean en esencia ejercicios de matemáticas. De hecho, con frecuencia el análisis matemático sólo representa una pequeña parte del trabajo que se requiere para la toma de decisiones.

(Thierauf, 1984) menciona que la Investigación de Operaciones hace gran uso de diversos modelos matemáticos. Por lo general, un modelo se define como una *representación o abstracción de un objeto real o de una situación real*. El modelo muestra las relaciones (directas e indirectas) y las interrelaciones de acción y reacción desde el punto de vista de causa y efecto. Ya que un modelo es una abstracción de la realidad, puede parecer menos complejo que la realidad misma. El modelo, para estar completo, debe ser representativo de los aspectos de la realidad que se estén investigando.

Una de las principales razones para desarrollar modelos es descubrir cuáles son las

variables importantes o adecuadas. El descubrimiento de las variables adecuadas está estrechamente ligado con la investigación de las relaciones que existen entre las variables. Para investigar estas relaciones, se utilizan técnicas cuantitativas como la estadística y la simulación para la resolución de problemas en las empresas.

Etapas en la formulación del modelo

Establecer la formulación de modelo general dentro de la Investigación de operaciones, el cual sea representativo de un sistema en estudio, con el cual se busca una solución “óptima” dentro del marco de los parámetros del problema, de tal manera que sea útil, siempre y cuando sea realista y simplifique la realidad, (Anderson, Sweeney, Williams, Camm, & Martin, 2011) hacen mención que debe comprender tres etapas para su formulación:

- 1) Análisis de los datos
- 2) Desarrollo del modelo
- 3) Validación del modelo

Los cuales, para su implementación dentro de la Investigación de Operaciones en la práctica, (Taha, 2012) menciona que se deben desarrollar en cinco fases principales que son:

1.- Definición del problema: La primera fase del estudio necesita de una definición del problema, esto indica 3 aspectos principales:

- a) Una descripción de la meta o el objetivo de estudio.
- b) Una identificación de las alternativas de decisión del sistema.
- c) Un reconocimiento de las limitaciones, restricciones y requisitos del sistema.

2.- Construcción del modelo: La segunda fase corresponde a la construcción del mo-

delo dependiendo de la definición del problema. Tal modelo deberá especificar expresiones cuantitativas para el objetivo y las restricciones del problema en función de sus variables de decisión.

3.- Solución del modelo: En modelos matemáticos esto se logra usando técnicas de optimización bien definidas y se dice que el modelo proporciona una solución óptima.

4.- Validación del modelo: Un modelo es válido sí, independientemente de sus inexactitudes al representar el sistema puede dar una predicción confiable del funcionamiento del sistema. Un método común para probar la validez de un modelo es comparar su funcionamiento con algunos datos pasados disponibles del sistema actual.

5.- Implantación de los resultados: Trata sobre la implantación de los resultados probados del modelo. La tarea de aplicar estos resultados recae principalmente en los investigadores de operaciones. Esto básicamente implicaría la traducción de éstos resultados en instrucciones de operación detallada emitidas en una forma

comprensible a los individuos que administran y operan el sistema después.

El método gráfico y la aplicación del método Montante para la toma de decisiones -

Maximización de utilidades

Supongamos el siguiente ejercicio, el cual se definirá el modelo matemático, la solución gráfica y la aplicación del método Montante para encontrar la solución óptima para maximizar las utilidades.

La Compañía CICSA tiene una pequeña planta ubicada en cierta ciudad importante del país. Su producción se limita a dos productos industriales. El alfa (A) y la beta (B). El departamento de Contabilidad ha calculado que las contribuciones unitarias (precio de venta por unidad menos costos variables por unidad) para cada producto, fueron de \$10 para el producto alfa y \$12 para el producto beta. Cada producto pasa por tres departamentos del área de producción, la cual está formada por 3 líneas de producción. Los requerimientos de tiempo para cada producto y el tiempo total disponible en cada departamento, son los siguientes:

HORAS REQUERIDAS			HORAS DISPONIBLES
LINEA	Producto alfa (x)	Producto beta (y)	Este mes:
1	2	3	1500
2	3	2	1500
3	0	1	400
UTILIDAD	\$ 10	\$ 12	

Por lo que se desea encontrar la combinación óptima de producción para maximizar la utilidad.

Expresando estos requisitos en términos matemáticos, CICSA desea maximizar la contribución total de ambos productos, definiendo como variables de decisión:

x = el número de unidades para el producto alfa

y = el número de unidades para el producto beta

Con lo cual podemos definir la función objetivo.

Función objetivo (contribución total)

$$\text{Maximizar } Z = \$10x + \$12y$$

Las restricciones (capacidades relativas a la producción).

Sujeto a:

$$2x + 3y \leq 1500$$

$$3x + 2y \leq 1500$$

$$y \leq 400$$

Y finalmente la condición de no negatividad.

Donde:

$$x, y \geq 0$$

Aplicación del método gráfico

Para la aplicación del método gráfico, solo se van a graficar las dos restricciones, lo que significa que la solución deberá encontrarse en el primer cuadrante de la gráfica (x y y) en donde los valores a analizar siempre serán positivos o ceros.

Solución gráfica:

Para la primera restricción ($2x + 3y \leq$

1500) sus puntos a graficar $P_1(0,500)$ y $P_2(750,0)$ quedaría de la siguiente manera usando la herramienta GeoGebra⁶.

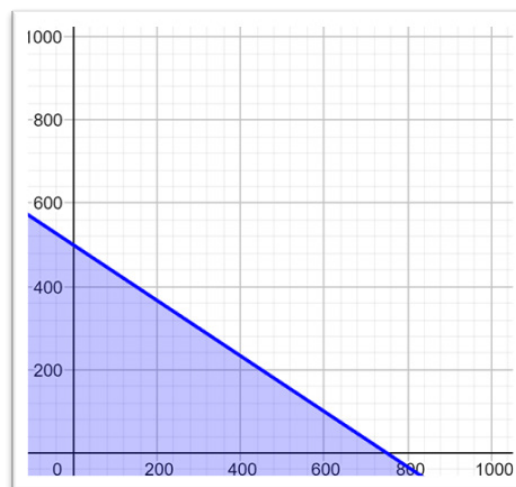


Fig. 1: Representación gráfica de la herramienta GeoGebra de la ecuación lineal $2x + 3y \leq 1500$

Mientras que la segunda restricción ($3x + 2y \leq 1500$) sus puntos a graficar $P_3(0,750)$ y $P_4(500,0)$, y su gráfica sería:

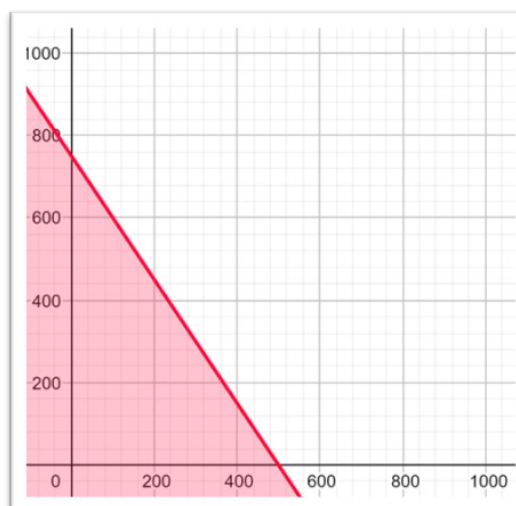


Fig. 2: Representación gráfica de la herramienta GeoGebra de la ecuación lineal $3x + 2y \leq 1500$

⁶ GeoGebra software matemático dinámico para todos los niveles educativos que reúne geometría, álgebra, hojas de cálculo, gráficos, estadísticas y cálculo en un solo motor. (<https://www.geogebra.org/about>).

Para la tercera restricción ($y \leq 400$) su punto a graficar $P_5(0,400)$, y su grafica sería:

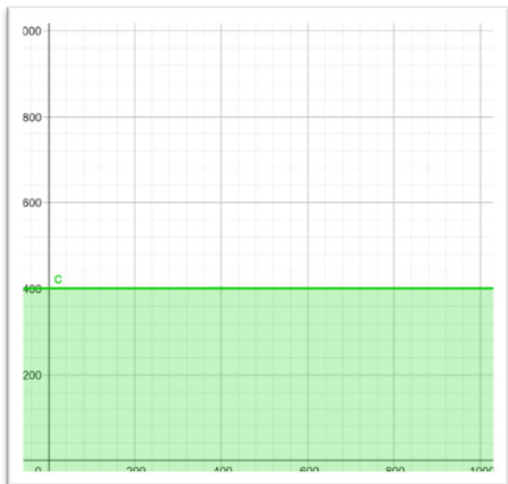


Fig. 3: Representación gráfica de la herramienta GeoGebra de la ecuación lineal $y \leq 400$

Ya graficadas las tres ecuaciones lineales (restricciones), podemos observar que dentro de la región factible existen dos cruces (intercepciones), la cuales denominaremos como P_a y P_b , de las cuales al punto P_a le aplicaremos el método de sustitución y al P_b el método de Montante para encontrar los valores de dichas intercepciones.

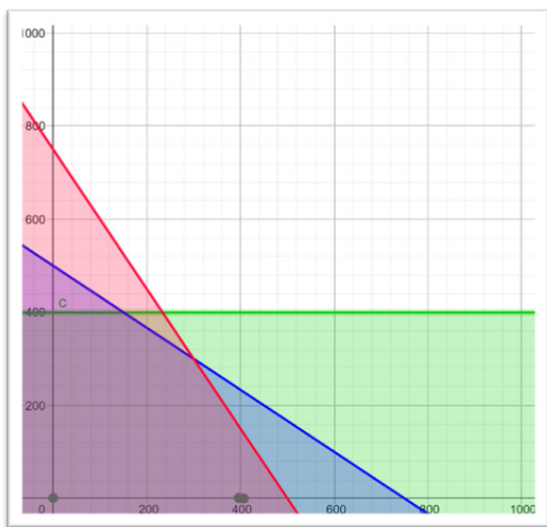


Fig. 4: Representación gráfica de la herramienta GeoGebra con las tres ecuaciones lineales

Aplicando el método de Sustitución para el punto P_a :

En donde las ecuaciones (restricciones) que se cruzan en este punto a, son las ecuaciones:

$$\begin{aligned} 2x + 3y &\leq 1500 \\ y &\leq 400 \end{aligned}$$

Al sustituir el valor de la variable y de la segunda ecuación en la primera ecuación, se obtienen los siguientes valores $P_a(150,400)$.

Los cuales al ser sustituidos en la función objetivo $Z = \$10x + \$12y$, se tendrá una utilidad de \$6300.00.

Para la solución del punto P_b :
Las ecuaciones lineales (restricciones) que se cruzan en este punto a, son:

$$\begin{aligned} 2x + 3y &\leq 1500 \\ 3x + 2y &\leq 1500 \end{aligned}$$

En las cuales aplicaremos el método de Montante, el cual contempla el siguiente procedimiento:

Teniendo como Sistema de ecuaciones:

$$\begin{aligned} 2x + 3y &= 1500 \\ 3x + 2y &= 1500 \end{aligned}$$

Pasaremos los coeficientes para crea la Matriz Aumentada del Sistema de ecuaciones

$$\left[\begin{array}{cc|c} 2 & 3 & 1500 \\ 3 & 2 & 1500 \end{array} \right]$$

Empezamos en la primera columna, en donde vamos a convertir el 2 en la unidad (1) para que sea nuestro primer pivote y el 3 de esa columna en cero (0) sin ninguna operación, pero procurando pasar el resto

de los valores de la primera fila igual, es decir el 3 y el 1500 pasan igual. Quedando de la siguiente manera nuestro ejercicio:

$$\left(\begin{array}{cc|c} 1 & 3 & 1500 \\ 0 & 2 & 1500 \end{array} \right)$$

Ahora para encontrar los valores que van a sustituir los de la segunda fila (2 y 1500), vamos a aplicar determinantes como Cramer de la siguiente manera.

De los datos originales, vamos a seleccionar la primera y segunda columna, en donde aplicaremos la forma de obtener una determinante (multiplicaciones cruzadas), de la siguiente manera solo con los valores seleccionados.

$$\left(\begin{array}{cc|c} 2 & 3 & 1500 \\ 3 & 2 & 1500 \end{array} \right) \rightarrow (2 \times 2) - (3 \times 3) = -5, \text{ el cual sustituirá el valor de } 2 \text{ en la matriz.}$$

Quedando en la nueva matriz de la siguiente manera.

$$\left(\begin{array}{cc|c} 1 & 3 & 1500 \\ 0 & -5 & 1500 \end{array} \right)$$

De la misma manera, pero ahora extendiendo la selección de valores, procedemos a obtener el otro valor que sustituirá el de 1500 del segundo reglón y tercera columna, el cual solo usaremos los valores de la primera y tercera columna para obtener la nueva determinante de la siguiente manera:

$$\left(\begin{array}{cc|c} 2 & 3 & 1500 \\ 3 & 2 & 1500 \end{array} \right) \rightarrow (2 \times 1500) - (3 \times 1500) = -1500, \text{ y este valor sustituirá el valor de } 1500 \text{ en la matriz.}$$

Y nos quedaría en esta primera iteración la siguiente matriz aumentada, con la primera columna resuelta:

$$\left(\begin{array}{cc|c} 1 & 3 & 1500 \\ 0 & -5 & -1500 \end{array} \right)$$

Para resolver la segunda columna, vamos a repetir el paso en donde el valor de la segunda columna que debe ser pivote en este caso el -2 sea la unidad (1) y el valor de 3 de esa columna será cero (0) y repite el -1500. Quedando de la siguiente manera:

$$\left(\begin{array}{cc|c} 1 & 3 & 1500 \\ 0 & -5 & -1500 \end{array} \right) \rightarrow \left(\begin{array}{cc|c} 1 & 0 & 1500 \\ 0 & 1 & -1500 \end{array} \right)$$

Ahora buscaremos el nuevo valor de **1500** del primer reglón y de la tercera columna, el cual lo vamos a obtener de la siguiente manera:

De los valores de la matriz, vamos a seleccionar solo los valores de la segunda y tercera columna, para mediante una determinante, pero ahora empezando las operaciones de Cramer con el valor que se hizo pivote (-2).

$$\left(\begin{array}{cc|c} 1 & 3 & 1500 \\ 0 & -5 & -1500 \end{array} \right) \rightarrow (-5 \times 1500) - (3 \times -1500) = -3000$$

Dicho valor de -3000, en esta segunda iteración se deberá dividir entre el primer número que convertimos pivote, el cual fue el valor de 2, quedando como valor: $-3000 / 2 = -1500$.

La cual quedaría la Matriz Identidad de la siguiente manera con valores en la tercera columna de **-1500** y **-1500**.

$$\left(\begin{array}{cc|c} 1 & 0 & -1500 \\ 0 & 1 & -1500 \end{array} \right)$$

Finalmente, para encontrar los valores reales de x y y , estos valores obtenidos en la tercera columna de **-1500** y de **-1500**, se deberán ser dividir entre el último valor que convertimos en Pivote, es decir el **-5**.

Quedando los resultados finales de la siguiente manera:

$$\begin{aligned} \text{Para } x &= \frac{-1500}{-5} = 300 \\ \text{para } y &= \frac{-1500}{-5} = 300 \end{aligned}$$

Para obtener los valores del $P_b(300,300)$, los cuales al ser sustituidos en la función objetivo $Z = \$10x + \$12y$, se tendría una utilidad de **\$6600.00**.

Discusión y análisis de resultados

Por lo que la combinación óptima de producción para maximizar la utilidad, sería el punto de $P_b(300,300)$, el cual al compararlo con el $P_a(150,400)$, se tendría mayor producción y mayor ganancia con la producción de **300 unidades** de ambos productos (*alfa y beta*), con la cual se tendrá una utilidad máxima de **\$6600.00**, y se aprovecharía al máximo las horas disponibles de cada línea de producción, las cuales se puede comprobar sustituyendo en cada restricción valores de x y y del punto $P_b(300,300)$, del cual obtenemos las siguientes comprobaciones:

Para la restricción que representa la línea de producción 1.

$$\begin{aligned} 2x + 3y &\leq 1500 \rightarrow 2(300) + 3(300) \leq 1500 \\ 600 + 900 &\leq 1500 \\ 1500 &\leq 1500 \\ 0 &\leq 0 \\ &\text{(Diferencia 0 horas)} \end{aligned}$$

Por lo que No sobrarían horas de la línea 1.

Para la restricción que representa la línea de producción 2.

$$\begin{aligned} 3x + 2y &\leq 1500 \rightarrow 3(300) + 2(300) \leq 1500 \\ 900 + 600 &\leq 1500 \\ 1500 &\leq 1500 \\ 0 &\leq 0 \\ &\text{(Diferencia 0 horas)} \end{aligned}$$

Por lo que No sobrarían horas de la línea 2.

Y para la restricción que representa la línea de producción 3.

$$\begin{aligned} y &\leq 400 \rightarrow (300) \leq 400 \\ 300 &\leq 400 \\ 0 &\leq 100 \\ &\text{(Diferencia de 100 horas)} \end{aligned}$$

Sobrarían 100 horas en la línea 3.

Conclusión

Se puede demostrar que la consideración en la enseñanza y la aplicación del método Montante en problemas para la solución de un sistema de ecuaciones lineales en el ámbito académico, que representan una intercepción de dos restricciones en la gráfica del método gráfico, sería una alternativa para encontrar de manera más rápida, para la comparación de puntos a analizar en región factible de la gráfica a analizar, y por ende de gran utilidad para el uso de los diversos métodos enseñados durante la formación educativa de pregrado. La idea principal u objetivo de este documento, es dar a conocer que existen dentro de nuestro académicos e investi-

gadores, herramientas alternativas más simplificadas para afrontar la correcta toma de decisiones en la optimización de los diversos recursos de las empresas.

Bibliografía

Anderson, D. R., Sweeney, D. J., Williams, T. A., Camm, J. D., & Martin, K. (2011). *Métodos cuantitativos para los negocios* (Undécima ed.). México: CENGAGE Learning.

Hillier, F. S., & Lieberman, G. J. (2010).

Investigación de Operaciones (Novena ed.). México: McGraw-Hill.

Render, B., Stair Jr., R. M., & Hanna, M. E. (2012). *Métodos Cuantitativos para los Negocios* (Undécima ed.). México: PEARSON.

Taha, H. A. (2012). *Investigación de Operaciones* (Novena ed.). México: PEARSON.

Thierauf, R. (1984). *Introducción a la Investigación de Operaciones*. México: LIMUSA.

