

Contactos, Revista de Educación en Ciencias e Ingeniería

Enero - Marzo 2022

ISSN: 2683-2607

No. 123



Biodiversidad: patrones, niveles y problemática

La agonía de los bosques de La Malinche

Importancia de los niveles adecuados de Vitamina D y la depresión en tiempos de pandemia por SARS-CoV-2



Contenido

Contactos, Revista de Educación en Ciencias e Ingeniería

No. 123 Enero - Marzo 2022

Editorial	3	<i>Receptores elípticos de membrana: la clave para una absorción efectiva</i>	42
		Lic. Jason Brandon Peña Muñoz Dr. Leonardo Dagdug Lima	
<i>Biodiversidad: patrones, niveles y problemática</i>	5	<i>Importancia de los niveles adecuados de Vitamina D y la depresión en tiempos de pandemia por SARS-CoV-2</i>	58
Dr. Jaime Manuel Calderón Patrón		M. C. y P. Jennifer Román Santillán D. en C. María de la Luz Sevilla González	
<i>Carbón mineral y biocarbón: de la revolución industrial a la captura de carbono</i>	15		
Dra. Elizabeth Chávez-García			
<i>La agonía de los bosques de La Malinche</i>	29		
Dra. Bárbara Cruz Salazar M. en C. Saúl George Miranda Biól. Aidee Tlapa Haro			

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



CONACYT
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. Juan José Ambriz García.

Director de la División de Ciencias Básicas e Ingeniería

Dr. Jesús Alberto Ochoa Tapia.

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. Juan José Ambriz García,

Dr. Jesús Alberto Ochoa Tapia,

Dr. José Luis Gómez Olivares.

UAM- Iztapalapa

Editora en Jefe:

M. C. Alma Edith Martínez Licona.

Comité Editorial por CBS:

Dra. Edith Arenas Ríos, Dra. Laura Josefina 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. 123,

Enero - Marzo 2022, 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. San Rafael Atlixco No. 186, Edificio T174, Col. Vicentina, Alcaldía Iztapalapa, C. P. 09340, México, Ciudad de México, Tel. 5804 – 4634 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 31 de Marzo de 2022. Tamaño del archivo 39,4 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: Enero - Marzo de 2022.

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, T – 174, Tel. 5804-4634

Av. San Rafael Atlixco No. 186, C. P. 09340, CDMX.

Apartado Postal 55 -534

<https://contactos.izt.uam.mx/> e-mail cts@xanum.uam.mx

Editorial

Comenzamos el año con un número formado de artículos, que además de interesantes, nos hacen reflexionar sobre el desgaste actual de los recursos naturales con los que contamos, algunos de estos artículos lo son “Biodiversidad: patrones, niveles y problemática” en el cual el autor trata de hacernos reflexionar sobre el problema de la conservación de la biodiversidad, la cual esta relacionada con los recursos naturales y la ecología, por otro lado, tenemos el artículo “Carbón mineral y biocarbón: de la revolución industrial a la captura de carbono” donde la autora menciona que estas piedras podrían volverse piedras angulares para mitigar los efectos del cambio climático global y recuperar sitios degradados.

En “La agonía de los bosques de La Malinche” los autores nos hacen ver cómo es la pérdida anual de las superficies de los bosques por actividades humanas. Nos dan a conocer que en el volcán La Malinche hay más de 937 especies (muchas de ellas endémicas de la Faja Volcánica Transmexicana (FVT) y otras en alguna categoría de riesgo) las cuales están amenazadas por el uso descontrolado de los recursos forestales.

Al lado de estos artículos encontrarán otros de igual interés, invitamos al lector a sumergirse en la lectura de este número deseando que encuentren información de su interés.

Atentamente

MC Alma E. Martínez L.
Editora en Jefe



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 en 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 Copenhague (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 Time 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, T-174,

Información: cts@xanum.uam.mx, tel. 5804-4634

Av. San Rafael Atlixco, 186, C. P. 09340,

CDMX. A.P. 55-534

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.

Biodiversidad: patrones, niveles y problemática

Dr. Jaime Manuel Calderón Patrón
Instituto Tecnológico de Huejutla

Resumen

La biodiversidad es uno de los bienes más preciados de nuestro planeta, su acervo es tan grande que su conocimiento aún está muy lejos de completarse y desafortunadamente su conservación está siendo amenazada por múltiples causas. En este artículo proporcionamos algunas cifras de la diversidad biológica global y hablamos brevemente de algunos patrones y procesos que causan la diversidad alfa y beta, con la finalidad de que lectores de diversos ámbitos se interesen y se motiven para generar información científica, técnica y/o social que enriquezca su conocimiento actual y conduzca al diseño de estrategias de uso y manejo para su conservación.

Palabras clave

Amenazas, diversidad biológica, conservación, patrones-procesos.

Abstract

Biodiversity is one of the most precious assets on our planet, its collection is so great that its knowledge is still far from complete and, unfortunately, its conservation is being threatened by multiple causes. In this article we provide some numbers on global biological diversity and briefly talk about some patterns and processes that cause alpha and beta diversity, with the aim that readers from various fields are interested and motivated to generate scientific, technical and/or social information that enriches their current knowledge and leads to the design of use and management strategies for their conservation.

Keywords

Biological diversity, conservation, patterns-processes, threats.

La biodiversidad: niveles y atributos

El término biodiversidad es comúnmente en el medio relacionado con los recursos naturales y la ecología. Sin embargo, debido a su importancia planetaria, es cada vez más utilizado en ámbitos diferentes como la política, la economía, el desarrollo social y urbano entre otras. El concepto fue acuñado por Walter G. Rosen en 1985 durante la primera reunión para planear el Foro Nacional sobre la Diversidad Biológica de Estados Unidos. Posteriormente, la memoria de este evento fue editada en 1988 bajo el título Biodiversidad por Edward O. Wilson (1929 -2021), quién fuera un destacado entomólogo de la Universidad de Harvard y prolífico escritor sobre el tema de conservación, lo que contribuyó a su difusión para su utilización general (Nuñez *et al.*, 2003).

Existen muchas definiciones sobre la diversidad biológica, una de las más aceptadas menciona que es la variedad de la vida, es decir, las especies de plantas, animales, hongos y microorganismos que viven en un espacio determinado, abarcando varios niveles de organización, desde su variabilidad genética, a los ecosistemas de los cuales forman parte estas especies y hasta los paisajes o regiones en donde se ubican los ecosistemas (Conabio 2021). En cada uno de los niveles (genético, poblaciones-especies, comunidades ecosistemas y paisajes), podemos reconocer tres atributos: composición, estructura y función (Noss, 1990). La composición es la identidad y variedad de los elementos que están presentes (especies) y cuántas hay. La estructura es la organización física del sistema, que incluye la abundancia relativa o biomasa de las especies, la abundancia relativa de los ecosistemas,

grado de conectividad, etc.) y la función son los procesos ecológicos y evolutivos que llevan a cabo los organismos, incluye a la depredación, competencia, parasitismo, dispersión, polinización, simbiosis, ciclo de nutrientes, perturbaciones naturales, etc. (Noss, 1990).

Actualmente en todo el planeta (medio terrestre y marino) se conocen aproximadamente un total de 1, 438, 769 especies de seres vivos, de los cuales 1, 124, 516 son animales, 44, 368 son hongos, 224, 244 son plantas, 16, 236 son protozoarios, 17, 892 son Chromistas (algas pardas y formas similares), 11, 010 son bacterias y 503 son arqueobacterias (Mora *et al.*, 2011). Estos números todavía están muy lejos de la cifra real de especies existentes, ya que el conocimiento de algunos grupos de organismos como las algas, hongos, bacterias, virus, invertebrados, entre otros, se encuentra rezagado en comparación con otros grupos bien conocidos como los vertebrados y las plantas (Mora *et al.*, 2011).

Existen zonas que poseen una riqueza biológica extraordinaria, estas zonas han sido denominadas como hot spots o puntos calientes de biodiversidad por (Myers, 1988 citado por Mittermeier *et al.*, 2011). Actualmente se reconocen más de 34 puntos calientes que en conjunto poseen aproximadamente el 50 % de las plantas vasculares y el 42 % de los vertebrados terrestres (anfibios, mamíferos, aves y reptiles) del planeta en el 2,3 % de la superficie terrestre (3,4 millones de km²) cuando su extensión original era de 23,5 millones de km², o 15,7 % (Mittermeier *et al.*, 2011). México se encuentra en un lugar privilegiado, con una gran diversidad de fauna y flora y forma parte de los países conocidos como megadiversos, ya que, junto con Colombia, Brasil,

Madagascar, Zaire, China, Indonesia, India, Filipinas y Australia, poseen alrededor de 70 % de todas las especies terrestres del planeta. Se calcula que la biodiversidad de México es tan elevada que mantiene alrededor del 10 % de todos los organismos de la Tierra, ocupando el primer lugar en riqueza de reptiles (804 especies), el segundo o tercero en especies de mamíferos terrestres (488 especies), el cuarto sitio tanto en anfibios (361 especies) como en plantas vasculares (25 000 especies) y el decimoprimer lugar en aves (1 096 especies) (Llorente-Bousquets y Ocegueda, 2008).

Desafortunadamente, existen muchas limitaciones para contabilizar la biodiversidad mundial, por lo tanto, han tratado de cuantificar esta riqueza biológica mediante estimaciones indirectas realizadas a partir del número de especies conocidas en la actualidad, las tasas de descripción de nuevos taxones, entre otras. Los resultados de estos esfuerzos han proporcionado cifras que oscilan entre los 3 y los 100 millones de especies, por ejemplo Mora *et al.*, (2011) estiman un total de 10, 960, 000 (8.7 millones de especies en la superficie terrestre y 2. 2 millones en el océano), lo que significa que se conoce únicamente al 15.97 % de las especies del planeta y se calcula que para completar este inventario se requiere un período de 1, 200 años, y de 303, 000 taxónomos que realicen estas descripciones, resultando en un costo aproximado de 363 billones de dólares (Mora *et al.*, 2011).

Los patrones de la diversidad biológica

Una de las características más notables de la biodiversidad es que no se distribuye de manera homogénea alrededor del planeta.

por ejemplo las selvas tropicales y los arrecifes de coral suelen poseer una cantidad elevada de especies e individuos, mientras que en los desiertos y las regiones polares ocurre lo contrario. Estas diferencias han llevado a los ecólogos y biogeógrafos a estudiar la diversidad biológica a escalas continentales y planetarias para tratar de encontrar las causas de estas diferencias (Gaston, 2000). Algunas de estas irregularidades en la distribución espacial de la biodiversidad se repiten constantemente en diferentes grupos de organismos, continentes y eras geológicas (Rosenzweig, 1995). Sin embargo, se han encontrado algunas regularidades en la distribución espacial de la diversidad, éstas son llamadas patrones, y ocurren constantemente en diferentes taxones, continentes y eras geológicas (Rosenzweig, 1995). Algunos de los patrones espaciales de diversidad que han sido registrados para la mayor parte de los grupos biológicos son: 1) la relación especies-área; 2) los gradientes latitudinales; 3) las relaciones especies-diversidad de hábitat; 4) el gradiente altitudinal de biodiversidad; y 5) la relación biodiversidad-productividad. Los cuales abordaré de una manera más detallada y con algunos ejemplos para México.

1) La relación especies-área: de acuerdo con este patrón existe una relación positiva entre el número de especies de una región y su área. Es decir, que a mayor área mayor número de especies, por ejemplo, se ha comprobado que una isla grande posee más especies que una isla pequeña (Figura 1A). Este patrón se ha comprobado para diferentes grupos de plantas, invertebrados y vertebrados (Rosenzweig, 1995).

2) Gradientes latitudinales: se ha observado que la mayor riqueza de especies se encuentra en la zona intertropical

(latitudes por debajo de los 30 grados), y conforme nos alejamos del Ecuador, ya sea hacia el norte o el sur hacia los polos, la riqueza disminuye gradualmente, aunque hay algunos taxones donde no se cumple este patrón (Rosenzweig, 1995; Figura 1B).

3) Las relaciones especies-diversidad de hábitat (heterogeneidad ambiental), las cuales son una respuesta a la heterogeneidad del paisaje, en donde a mayor diversidad de hábitats, mayor riqueza de especies (Rosenzweig, 1995; Figura 1C).

4) Gradiente altitudinal de biodiversidad, se ha registrado que la biodiversidad es más elevada al nivel del mar y disminuye conforme la altitud aumenta, aunque se han encontrado algunas excepciones para taxones en particular (Rosenzweig, 1995; Figura 1D).

5) La relación biodiversidad-productividad, que indica que a mayor productividad del ecosistema (la tasa a la cual la energía fluye en un ecosistema) mayor diversidad biológica, es decir, que la biodiversidad aumenta conforme aumenta la productividad del área de estudio. Un ejemplo se presenta con los coleópteros del género *Epicauta* (Meloidae) donde su riqueza aumenta conforme se incrementa la evapotranspiración potencial, un estimador de la productividad (Gaston, 2000).

En nuestro país se ha demostrado que grandes patrones de riqueza de especies observados a escala mundial se mantienen (Koleff *et al.*, 2008). Por ejemplo, hay un mayor número de especies por unidad de área hacia el sur, en el trópico húmedo, y también se ha observado que en una cadena montañosa existe un mayor número de especies al pie de ésta que en su cima

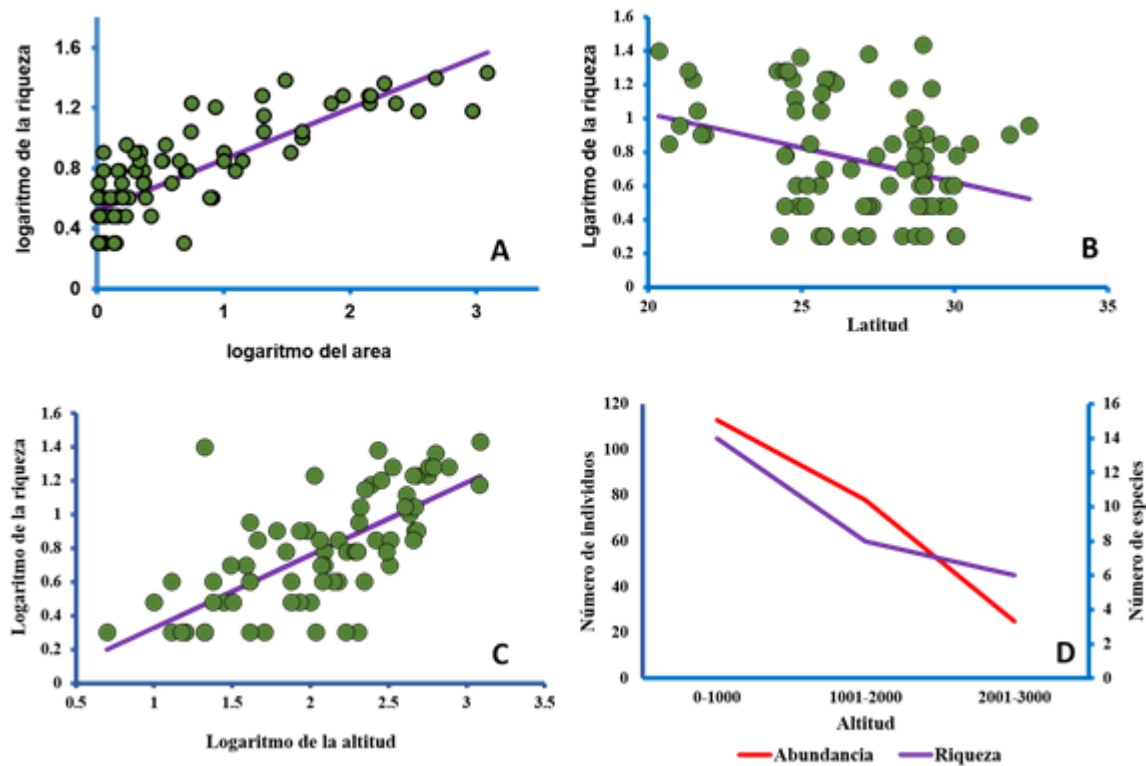


Figura 1A. Relación especies área. Se observa como la riqueza de la herpetofauna de las islas de México se incrementa conforme aumenta el área de las mismas (Tomado de Calderón-Patrón, 2007).

Figura 1B. Gradiente latitudinal de diversidad. En este ejemplo se muestra que conforme aumenta la latitud disminuye la riqueza de los reptiles de las islas de México (Tomado de Calderón-Patrón, 2007).

Figura 1C. Relación especies y diversidad de hábitats. En este caso la diversidad de los reptiles de las islas de México se incrementa conforme se incrementa la altura de las islas. La altura de los árboles ha sido utilizada es un indicador de la heterogeneidad ambiental y en este caso es la medida en metros de la base a la punta más alta de la isla y a mayor altura aumenta la diversidad de hábitats para los reptiles (Tomado de Calderón-Patrón, 2007).

Figura 1D. Gradiente altitudinal de diversidad. En este ejemplo se muestra que en el caso de los murciélagos de la Sierra Norte del estado de Oaxaca tanto el número de especies como el de individuos disminuyen conforme aumenta la altitud (Modificado de Calderón-Patrón, 2003).

(Koleff *et al.*, 2008).

Actualmente, aún existe controversia respecto a si en realidad existen o no leyes o patrones en ecología, ya que aparentemente se cumplen únicamente bajo ciertas circunstancias o factores, debido a que un mismo patrón puede surgir a partir de diferentes mecanismos o una misma causa puede producir patrones distintos. Sin embargo, en nuestro país estos patrones de riqueza de especies observados a escala mundial también se mantienen (Koleff *et al.*, 2008). Por ejemplo, hay un mayor número de especies por unidad de área hacia el sur, en el trópico húmedo, y también se ha observado que en una cadena montañosa existe un mayor número de especies en su base y partes bajas que en su cima (Koleff *et al.*, 2008).

Los niveles jerárquicos de la biodiversidad

Uno de los primeros investigadores en comprender que el estudio de la biodiversidad representa una elevada complejidad fue Robert Whittaker, quien para medir la diversidad vegetal en un gradiente altitudinal de la cordillera de las Great Smoky Mountains, en el sureste de Estados Unidos, consideró necesario establecer un ordenamiento jerárquico de esta diversidad, siendo el pionero en incorporar al marco teórico de la ecología y la biodiversidad las escalas espaciales. Whittaker (1960) postuló que, para conocer el número total de especies de estas montañas, era necesario conocer la riqueza de varios tipos de vegetación distribuidos a lo largo de la cordillera, ya que había encontrado que la riqueza de especies se incrementaba desde la costa hacia el interior del continente. Este cambio en la composición de especies, de acuerdo con Whittaker (1960), era producto de dos

factores: de la diversidad de sitios individuales y de la diferenciación relativa de los patrones de diversidad de la vegetación a lo largo de una mezcla de gradientes topográficos de humedad. Por tal motivo, Whittaker (1960) propuso tres conceptos de diversidad (diversidad alfa, beta y gamma) que tienen que ver con la escala espacial de trabajo y/o con la heterogeneidad ambiental del sitio: diversidad alfa (α) como la diversidad de especies de un sitio, localidad o tipo de vegetación; diversidad beta (β) o la magnitud de cambio en la composición de las comunidades, o el grado de diferenciación entre comunidades, con relación a un gradiente ambiental complejo o a patrones ambientales, y la diversidad gamma (γ) o la diversidad de especies presente en un paisaje, gradiente o mosaico de varios hábitats (Figura 2).

La diversidad beta

Diversos factores han sido mencionados como los responsables de crear un recambio en la composición de especies o diversidad β . Por un lado, están factores ambientales y su heterogeneidad y, por otra parte, se mencionan factores que están directamente relacionados con las especies que componen a las comunidades, tales como las capacidades de dispersión y niveles de tolerancia a los diversos factores ambientales presentes (limitación de nicho) y factores históricos (Calderón-Patrón *et al.*, 2012).

La escala o la ventana observacional a la cual observamos la diversidad también tiene un efecto sobre la diversidad beta. Se ha demostrado que las áreas extensas, estudiadas con baja resolución (en un grano grueso), tienden a presentar tasas más bajas de recambio de especies que las mismas áreas estudiadas con alta resolución. Esto

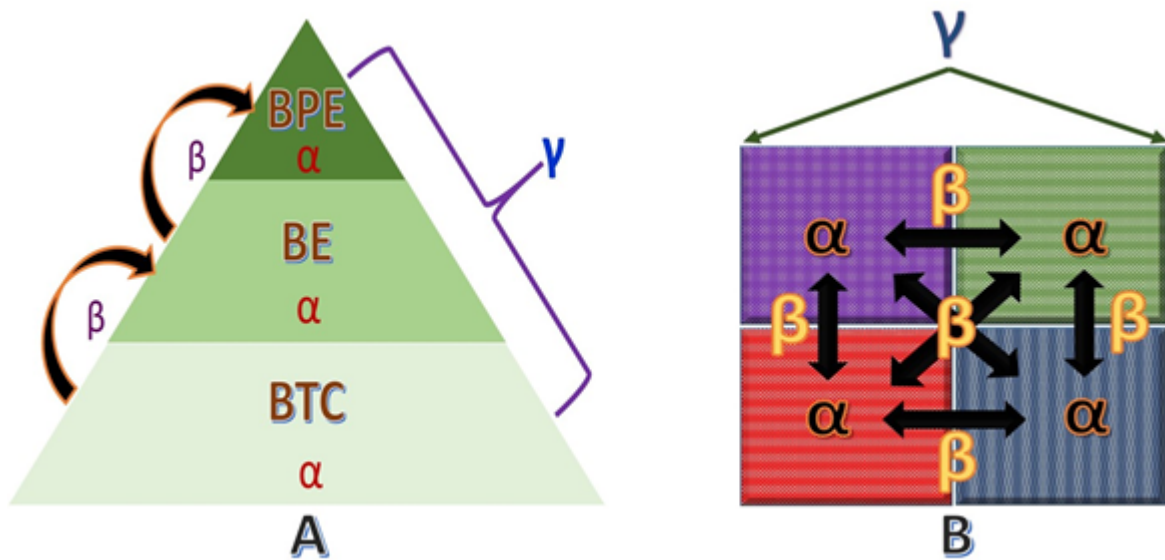


Figura 2. Se ejemplifican los tres conceptos de diversidad propuestos por Whittaker (1960): A) a través de un gradiente altitudinal que presenta tres tipos de vegetación (BPE: bosque de pino-encino, BE: bosque de encino y BTC: bosque tropical caducifolio) y B) en un paisaje (o mosaico) compuesto por cuatro unidades ambientales diferentes. La diversidad alfa es la que se registra en cada tipo de vegetación (α), mientras que la diversidad beta (β) es el cambio en la composición de especies entre diferentes tipos de vegetación o unidades ambientales y la diversidad gamma (γ) es la diversidad total en este caso de los cuatro tipos de vegetación en conjunto o de todos los mosaicos del paisaje.

puede presentarse porque el número de especies compartidas se incrementa conforme se disminuye la resolución, porque las áreas grandes tienen más especies, o porque se reduce el grado de agregación de la distribución de las especies (Koleff *et al.*, 2008).

En un análisis realizado a nivel nacional sobre la diversidad beta de los vertebrados terrestres, los anfibios y los reptiles presentan el mayor cambio en la composición de especies, seguido de los mamíferos, y las aves presentaron una magnitud menor (Koleff *et al.*, 2008), estos resultados están relacionados con el tamaño promedio del área de distribución, ya que a mayor promedio del tamaño del área de distribución, se presenta una menor diversidad beta (Koleff *et al.*, 2008; Figura 3) y en este

caso las aves tienen en promedio áreas de distribución mayores que las registradas en anfibios y reptiles.

Problemática de la biodiversidad

Las especies y los ecosistemas en los que habitamos nos abastecen de diversos bienes como agua, madera, materiales de construcción, energía, medicinas y recursos genéticos. Además, nos proporcionan toda una serie de servicios tales como la regulación del clima, el procesamiento de contaminantes, la depuración de las aguas, la actuación como sumideros de carbono, la prevención contra la erosión, la polinización, etc. (Cardinale *et al.*, 2012).

Desafortunadamente, el crecimiento

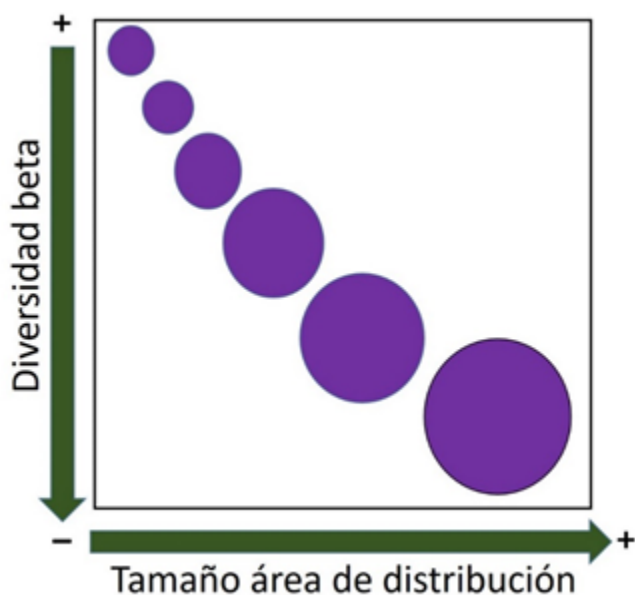


Figura 3. Se muestra uno de los patrones ecológicos registrados para la diversidad beta, conforme aumenta el promedio del tamaño del área de distribución de los organismos de un hábitat o comunidad disminuye la diversidad beta.

exponencial de la población humana está causando una crisis ambiental global, provocando la pérdida de la diversidad biológica. Esto a su vez, reduce la eficiencia a la cual las comunidades ecológicas capturan recursos biológicamente esenciales, la producción de biomasa, la descomposición y reciclado de nutrientes, además al reducir el número de especies, se disminuye la diversidad funcional del ecosistema y su estabilidad funcional (Cardinale *et al.*, 2012).

Esta situación es tan grave que actualmente se presenta un fenómeno considerado como la sexta gran extinción, debido a que en los últimos años se ha presentado una tasa de extinción entre 1, 000 y 10, 000 veces más elevada que las ocurridas en eras pasadas, calculándose una pérdida anual de entre 0.01 y 0.1% (entre 180 y 1800 especies) de todas las especies del planeta. En contraparte, la tasa de especiación actual (proceso de formación de nuevas especies) es aproximadamente mil veces menor que la tasa de extinción (Ceballos *et al.*, 2010).

Conclusiones

El concepto de biodiversidad es complejo ya que involucra a las especies, sus hábitats y las diferentes escalas y atributos que la conforman, por lo que para estudiarla se le han asignado niveles jerárquicos. De estos, la diversidad beta, es el concepto menos entendido, sin embargo, puede ser el más importante cuando se trabaja en un gradiente o paisaje. Los procesos y patrones que conforman la diversidad biológica son producto de interacciones entre los seres vivos y su medio que se han desarrollado durante millones de años, las cuales se interrumpen o desaparecen por el efecto de fenómenos o procesos degradantes como

el cambio de uso de suelo, originado principalmente por el crecimiento exponencial de la población humana, conduciéndonos a una crisis ambiental global y a una sexta gran extinción. Como agentes causantes de esta tragedia, es nuestra responsabilidad proponer estrategias y ejecutar acciones que contribuyan a su resolución.

Referencias

Calderón-Patrón, J. M. *Ecología de comunidades de murciélagos en la Sierra Norte de Oaxaca. Tesis de Licenciatura*. Instituto Tecnológico del Valle de Oaxaca, Oaxaca, México, 2003.

Calderón-Patrón, J. M. *Biogeografía de islas: el caso de la herpetofauna Mexicana. Tesis de Maestría no publicada*. Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, Mineral de la Reforma, Hidalgo, 2007.

Calderón-Patrón, J. M., Moreno, C. y Zuria, I. La diversidad beta: medio siglo de avances. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 83, pp. 879-891, 2012

Cardinale, B. J., Duffy J. E., Gonzalez, A., Hooper, D. U., Perrings, CH., Venaild, P., Narwani, A., Mace, G. M., Tilman, D., Warlde, D. A., Kinsing, A. P., Daily, G. C., Loreau, M., Grace, J. B., Larigauderie, A., Srivastava, D. S. y Naeem, S. Biodiversity loss and its impact on humanity. *Nature*, 486, pp. 59-67, 2012.

Ceballos, G., García, A. y Ehrlich, P. R. The sixth extinction crisis, loss of animal populations and species. *Journal of Cosmology*, 8, pp. 1821-1831, 2010.

Conabio. https://www.biodiversidad.gob.mx/biodiversidad/que_es.html

- Gaston, K. Global patterns in biodiversity. *Nature*, 405, pp. 220-227, 2000. <https://doi.org/10.1038/35012228>
- Koleff, P., Soberón, J., Arita, H. T., Dávila, P., Flores-Villela, O., Golubov, J., Halffter, G., Lira-Noriega, A., Moreno, C. E., Moreno, E., Murguía, M., Munguía, M., Navarro-Sigüenza, A. G., Téllez, O., Ochoa-Ochoa, L., Peterson, A. T. y Rodríguez, P. Patrones de diversidad espacial en grupos selectos de especies. En: J. Soberón., G. Halffter. y J. Llorente-Bousquets (Eds). *Capital natural de México, vol I: Conocimiento actual de la Biodiversidad*. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. Ciudad de México. México. 2008, pp. 323-364.
- Llorente-Bousquets, J. y Ocegueda, S. Estado del conocimiento de la biota. In J. Soberón., G. Halffter. & J. Llorente-Bousquets (Eds). *Capital natural de México, vol I: Conocimiento actual de la Biodiversidad*. Ciudad de México. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. México. 2008, pp. 283-322.
- Mittermeier, R.A., Turner, W. R., Larsen, F. W., Brooks, T. M. y Gascon, C. 2011. Global biodiversity conservation: the critical role of hotspots. In: Zachos F.E., and J.C. Habel (eds). *Biodiversity hotspots: distribution and protection of conservation priority areas*. Springer, Heidelberg. 2011, pp. 3-22.
- 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 ONE*, 9 [8], e1001127, 2011 <https://doi.org/10.1371/journal.pbio.1001127>
- Noss, R. Indicators for monitoring biodiversity: A hierarchical approach. *Conservation Biology*. 4[4], pp. 355-364, 1990. <https://www.jstor.org/stable/2385928>
- Núñez, I., González-Gaudiano, E. y Barahona, A. La biodiversidad: historia y contexto de un concepto. *Interciencia*, 28[7], pp. 387-393, 2003.
- Rosenzweig, M. L. *Species diversity in space and time*. Cambridge University Press. United Kingdom. 1995. 436 p.
- Whittaker, R. H. 1960. *Vegetation of the Siskiyou Mountains, Oregon and California*. Ecological. Monographs, 30, 279-338, 1960.



Carbón mineral y biocarbón: de la revolución industrial a la captura de carbono

**Dra. Elizabeth Chávez-García
Facultad de Filosofía y Letras
Universidad Nacional Autónoma de México**

Resumen

La actual crisis climática, la urgente necesidad de producir alimentos saludables y el apremio por vivir en un mundo menos contaminado nos ha llevado a buscar alternativas que mejoren la gestión de los recursos naturales. Bajo este contexto surgen dos tipos de carbones que, a pesar de llevar siglos entre nosotros, podrían volverse piedras angulares para mitigar los efectos del cambio climático global y recuperar sitios degradados. Por un lado, el carbón mineral, básico en la producción de energía eléctrica y productos como el acero. Por el otro, el biocarbón, un mejorador del suelo que podría dar solución a problemas como la seguridad alimentaria y la captura de dióxido de carbono, un agravante del calentamiento global.

Palabras clave

Economía circular, combustibles fósiles, cambio climático, suelo.

Abstract

The current climate crisis, the urgent need to produce healthy food and the pressure to live in a less polluted world has led us to look for alternatives that improve the management of natural resources. Under this context, two types of carbons emerge which, despite having been with us for centuries, could become cornerstones to mitigate the effects of global climate change and recover degraded sites. On the one hand, coal, basic in the production of electrical energy and products such as steel. On the other hand, biochar, a soil amendment that could solve problems such as food security and the capture of carbon dioxide, an aggravating factor of global warming.

Keywords

Circular economy, fossil fuels, climate change, soil.

Introducción

Existen dos tipos de carbones que pueden tener un amplio espectro de usos e incidencia en temas ambientales. Uno de ellos corresponde al primer combustible fósil usado por la humanidad: el carbón mineral. Este material fue desplazado por el gas natural y el petróleo una vez que se hizo mayor uso de estos recursos para industrias como el transporte. Sin embargo, con las predicciones de que estos combustibles durarán menos de 60 años (Mazumder, 2012), el carbón mineral podría tener un apogeo tan importante como el que tuvo en sus inicios.

Tanto el carbón mineral como los otros combustibles fósiles han contribuido al desarrollo y mejoramiento de la calidad de vida en la mayor parte del mundo. Sin embargo, también han sido los que mayoritariamente han contribuido a la crisis climática que estamos viviendo, con repercusiones irreversibles tanto en el ambiente como en el bienestar humano. Por lo que las acciones encaminadas a reducir su impacto y a revertir la degradación ambiental son urgentes.

Aquí es donde aparece en escena otro tipo de material carbonoso conocido como biocarbón. El biocarbón ha sido señalado como un excelente producto para recuperar suelos degradados, aumentar la fertilidad de zonas agrícolas y como un medio para revalorizar los residuos orgánicos. Sin embargo, no todo es color de rosa con el biocarbón, ya que como se verá más adelante, también tiene su lado oscuro.

Carbón mineral: un poco de historia

No existe evidencia registrada de cuándo comenzó la minería del carbón. Sin embargo, se cree que el descubrimiento de una roca negra que se quema cuando se expone al fuego puede haber ocurrido por casualidad en diferentes partes del mundo durante miles de años (Hester y Harrinson, 2018). No obstante, el predominio del carbón ocurrió hasta el siglo XVIII cuando se descubrieron en Norteamérica los grandes yacimientos de carbón mineral y su consumo empezó a ser imparable. Más tarde, en el último tercio de ese mismo siglo, el carbón se constituye como la energía que movía la máquina de vapor, lo que dio origen a la llamada Revolución Industrial (Macías, 2007; Mazumder, 2012).

Las mayores facilidades en el transporte del carbón, originados por la utilización de la locomotora de vapor, llevaron a una extensión generalizada de su consumo (Macías, 2007). Por ejemplo, a principios del siglo XIX, el carbón se utilizó para iluminar ciudades como Londres mediante la producción de gas, lo que se denominó "gas de la ciudad". Más tarde, con el desarrollo de la energía eléctrica, el carbón se vinculó estrechamente a la generación de electricidad. De hecho, la primera central eléctrica de carbón, la cual fue desarrollada por Thomas Edison, entró en funcionamiento hace ya casi un siglo y medio en la ciudad estadounidense de Nueva York en 1882 (World Coal Institute, 2009).

En el siglo XIX se consolidó la extracción y consumo del carbón utilizado para el desarrollo industrial de diversos países. Esto convirtió al carbón en el protagonista de los avances energéticos en todo el mundo, ya que además del transporte ferroviario

y los barcos de vapor, se empleó de forma masiva en la producción de acero. Un hecho notable es que la primera Guerra Mundial le dio un impulso muy grande al carbón mineral como principal fuente de energía. Sin embargo, el petróleo superó al carbón en la década de 1960 con el crecimiento del sector del transporte que requería de combustibles líquidos (World Coal Institute, 2009; Mazumder, 2012).

A partir de la crisis energética de 1973, también conocida como "primera crisis del petróleo", el carbón cobró de nuevo gran interés debido a sus abundantes reservas extraíbles a bajo costo (Macías, 2007). Pero, a partir de los años ochenta disminuyó nuevamente el uso del carbón en los países más avanzados. Sin embargo, naciones como China, India o Brasil lo siguieron utilizando (World Coal Institute, 2009; Mazumder, 2012). Hoy en día se producen cerca de 168 millones de toneladas anuales en todo el mundo, siendo China el mayor productor y consumidor de carbón (British Petroleum Company, 2020).

¿Qué es el carbón mineral y cómo se forma?

El carbón mineral es una roca de color oscuro que deriva de la vegetación que se encontraba hace millones de años, específicamente en el Período Carbonífero (Hester y Harrinson, 2018). La etapa inicial del proceso de formación del carbón consiste en la acumulación de grandes cantidades de restos vegetales en lugares como los pantanos. Esta condición es indispensable porque la materia muerta se descompone fácilmente en ambientes ricos en oxígeno. En cambio, en el agua estancada de los pantanos, los restos vegetales no sufren una descomposición completa. Aquí, las plantas

son desintegradas por microorganismos que liberan gases como el hidrógeno y oxígeno, y conforme éstos escapan, aumenta el contenido de carbono y se forma una capa de *turba* (Mazumder, 2012; Tarbuck y Lutgens, 2013).

La turba es un material blando en el cual son fáciles de reconocer los restos vegetales. Este material puede seguir enterrado y con el tiempo transformarse lentamente en *lignito*, un carbón blando, con un aspecto terroso y opaco. Si este material sigue enterrado y aumenta la temperatura y la presión sobre él, se favorece la pérdida de más gases y la compactación del material. Esto transforma el lignito en una roca negra más dura denominada *hulla*, cuyo grosor puede ser la décima parte de la turba a partir de la cual se formó (Tarbuck y Lutgens, 2013; Hester y Harrinson, 2018).

Cuando las capas donde está contenida la hulla son sometidas a mayor calor y presión asociados con la formación de

montañas, se produce una mayor pérdida de gases y agua, incrementando con ello la concentración de carbono fijado. Este proceso transforma la hulla en *antracita*, una roca negra, brillante y muy dura. Debido a los factores y tiempo involucrados en la formación de la antracita, ésta es un carbón escaso y es más difícil y caro de extraer (Tarbuck y Lutgens, 2013).

El proceso de formación de los distintos carbones puede requerir miles de años y en el transcurso se producen cambios que les imprimen diferentes grados de pureza o calidad dependiendo del contenido de carbono (Figura 1). A nivel internacional se clasifica al carbón mineral según su capacidad energética: los carbones de alto rango como la hulla y la antracita tienen un alto contenido de carbono y, por lo tanto, un alto valor calorífico (22 - 38 MJ/kg) (Hester y Harrinson, 2018). Mientras que los carbones de bajo rango como el lignito son fáciles de quemar, pero

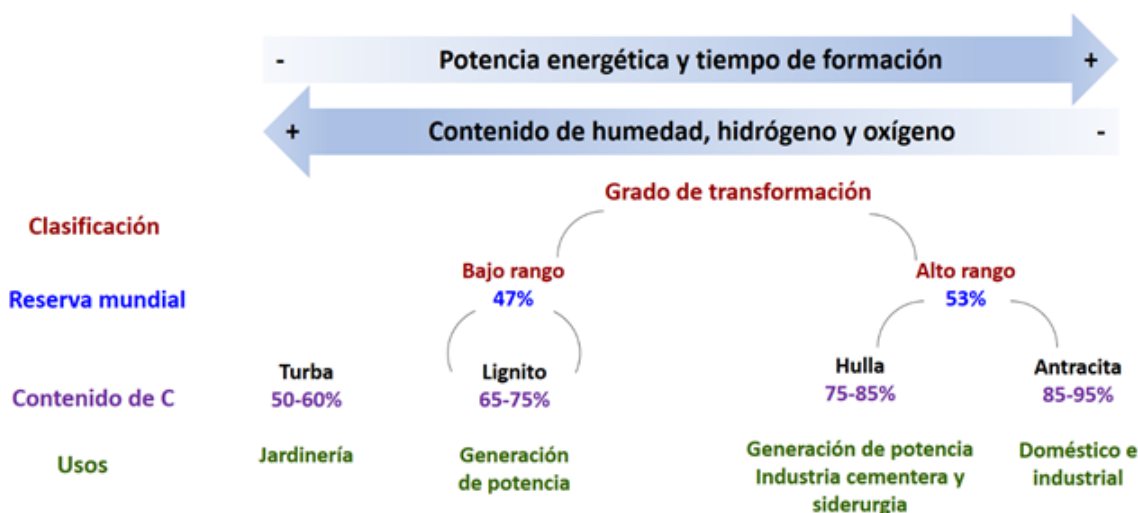


Figura 1. Clasificación del carbón según su capacidad energética, abundancia, contenido de carbono (C) y aplicación final. Modificado de World Coal Institute (2009).

su poder calorífico es relativamente bajo (8 - 20 MJ/kg) (Tarbuck y Lutgens, 2013). Como comparación, el poder calorífico de la gasolina se encuentra entre 43 y 48 MJ/kg y el del petróleo crudo cercano a 60 MJ/kg (CONUEE, 2021).

Usos

El carbón mineral se utiliza principalmente como fuente de energía para diversos procesos industriales. En el sector eléctrico los distintos tipos de carbones, principalmente la hulla, se utilizan como combustible para calentar calderas recubiertas por tubos con agua (Macías, 2007; Hester y Harrinson, 2018). El agua se convierte en vapor por el calor y pasa a una turbina que comienza a girar a alta velocidad y de esta forma se produce electricidad. Actualmente, el carbón alimenta el 41 % de la electricidad mundial y se espera que esta proporción se mantenga en niveles similares durante los próximos 30 años (Hester y Harrinson, 2018).

En el sector siderúrgico y metalúrgico, se emplea el coque (un combustible sólido que se obtiene del carbón mineral) para calentar hornos donde se obtienen metales como el acero. Como dato curioso, se requiere una tonelada de coque para producir 1.3 toneladas de acero (Macías, 2007; Hester y Harrinson, 2018). El carbón también se utiliza como fuente de energía para fundir materias primas como la caliza, un material de construcción u ornamental ampliamente usado en el mundo. De igual forma, se necesitan alrededor de 200 kg de carbón para producir una tonelada de cemento y se necesitan entre 300 y 400 kg de cemento para producir un metro cúbico de concreto (Hester y Harrinson, 2018).

El carbón mineral también se usa en la fabricación de carbones activados con gran capacidad de adsorción para la eliminación de agentes contaminantes del aire y del agua (Macías, 2007). También se pueden producir varios productos químicos a partir de los subproductos del carbón. El alquitrán de hulla refinado se utiliza en la fabricación de productos químicos usados como solvente en la industria química y en la industria farmacéutica. El gas amoníaco recuperado de los hornos de coque se utiliza para fabricar otros productos que después se emplearán en fertilizantes agrícolas, artículos de limpieza o explosivos. Cientos de materiales diferentes tienen carbón o subproductos del carbón como componentes: jabones, medicamentos, solventes, tintes, plásticos y fibras como el nailon o la fibra de carbono, un material extremadamente resistente pero ligero que se utiliza desde la industria de la construcción hasta las raquetas de tenis (Hester y Harrinson, 2018).

Finalmente, el avance tecnológico ha permitido utilizar el carbón como alternativa al petróleo a través de la conversión del carbón en combustible líquido, un proceso denominado "licuefacción del carbón" (Hester y Harrinson, 2018). A partir del carbón también se puede obtener un gas combustible mediante ciclos combinados de gasificación. En estos ciclos el carbón reacciona con oxígeno y vapor de agua para producir un gas compuesto por hidrógeno y monóxido de carbono. Este gas es utilizado posteriormente en una turbina para generar electricidad y en el futuro se cree que podría usarse para la producción de hidrógeno, otro probable combustible de mayor uso en el futuro (Macías, 2007).

Producción y consumo de carbón mineral

Las principales zonas mineras donde se extrae carbón mineral se hallaban en Gran Bretaña (Cardiff y Newcastle), Estados Unidos (Pittsburg), Alemania (Rhur), Polonia (Alta Silesia), China (Shanxi) y Rusia (Donetz) (Macías, 2007). Según el ritmo actual de producción, hay suficientes reservas de carbón para alrededor de 128 años sin considerar el descubrimiento de nuevas reservas o los avances en las técnicas mineras que permitirán alcanzar reservas previamente inaccesibles. Las reservas de carbón están disponibles en casi 70 países, aunque los mayores yacimientos están en los Estados Unidos, Rusia, China e India, siendo Asia la zona donde la producción de carbón ha crecido más rápidamente (Hester y Harrinson, 2018).

El mercado más grande para el carbón mineral es Asia, que actualmente representa el 75 % del consumo mundial, siendo China, Japón y Corea los más grandes importadores para la generación de electricidad y la producción de acero. Algo importante de resaltar es que no es solo la falta de carbón lo que impulsa a los países a importarlo, sino la importancia de obtener tipos específicos de éste como se vio en la Figura 1. Los principales productores de carbón como China, Estados Unidos e India, por ejemplo, también importan grandes cantidades de carbón por razones de calidad (Hester y Harrinson, 2018; British Petroleum Company, 2020).

El carbón y la crisis del medio ambiente

La crisis climática que estamos viviendo se debe principalmente al aumento de los gases de efecto invernadero como el dióxido

de carbono (CO_2), el metano (CH_4) y el óxido nitroso (N_2O). Dichos gases se encuentran naturalmente en la atmósfera y por millones de años han permitido la vida en la Tierra gracias al mantenimiento de una temperatura adecuada para los seres vivos. Es decir, sin los gases de efecto invernadero nos congelaríamos ya que éstos retienen el calor que nos llega del Sol. Sin embargo, la quema de combustibles fósiles como el carbón genera gases de efecto invernadero que, sumados a los ya existentes, están alterando el clima global con consecuencias irreversibles a la escala humana (Tarbuck y Lutgens, 2013).

A pesar de los usos y los avances que se han logrado con el uso del carbón, éste ha tenido y seguirá teniendo un oscuro rastro tras de sí de no tomar acciones respecto a los problemas que ocasiona. La minería del carbón, en particular la minería a cielo abierto requiere la alteración de grandes extensiones de tierra. Esto plantea una serie de desafíos ambientales, incluida la pérdida del suelo, la contaminación acústica y del agua, y los impactos en la biodiversidad local (Hester y Harrinson, 2018). La quema del carbón no sólo genera emisiones de CO_2 , ya que la minería subterránea produce CH_4 . La extracción, procesamiento y uso del carbón libera contaminantes como óxidos de azufre y nitrógeno (precursores de lluvia ácida) o partículas de mercurio que pueden provocar desórdenes neurológicos en humanos y animales (World Coal Institute, 2009). La producción de polvo por la extracción y procesamiento del carbón, por ejemplo, afecta también a la salud de las comunidades aledañas ya que aumenta el riesgo de asma, enfermedades cardíacas y cáncer.

Aunque muchos de estos efectos se

han tratado de controlar mediante nuevas tecnologías que permiten disminuir la emisión de contaminantes, muchos países, sobre todo aquellos en vías de desarrollo no cuentan con un marco legal que controle la extracción y el uso del carbón. Por otra parte, la minería del carbón es solo un uso temporal de la tierra, por lo que es vital que la rehabilitación del sitio se lleve a cabo una vez que las operaciones mineras hayan terminado. En las mejores prácticas, se diseña y ejecuta un plan de rehabilitación para cada mina de carbón, que cubre el período desde el inicio de las operaciones hasta mucho después de que la extracción ha terminado (Hester y Harrinson, 2018). Sin embargo, pocas veces se conocen los proyectos de adecuación del terreno afectado y con frecuencia las autoridades mineras y ambientales no hacen públicos los planes de trabajo, los estudios de impacto ambiental ni los programas de cierre de mina. Además, en la mayoría de los casos, tampoco hay acceso libre a toda la información que tienen las entidades públicas sobre impactos al ambiente o a la salud de la población.

¿Biocarbón?

El biocarbón es un producto sólido altamente estable que se obtiene cuando residuos orgánicos (por ejemplo, desechos animales, agrícolas, industriales, médicos, domiciliarios o de jardinería) se calientan a temperaturas relativamente bajas (entre 300 y 800 °C, aproximadamente) en un contenedor cerrado con poco o ningún aire dentro. Esta descomposición térmica se conoce generalmente como pirólisis y es similar al proceso usado en la producción de carbón vegetal. Sin embargo, el biocarbón se distingue por el hecho de que produce con la intención de aplicarse al suelo como

un elemento para mejorar sus propiedades, así como la productividad de los cultivos y el almacenamiento de carbono en el suelo (Lehmann y Joseph, 2009; Nanda *et al.*, 2016).

Aunque el carbón mineral y el biocarbón pueden ser similares en aspecto, ambos son muy distintos entre sí. Estas diferencias radican no sólo en el uso que ambos pueden tener, sino sobre todo en su génesis, es decir, la forma en que se producen. El carbón mineral se originó de residuos vegetales mediante procesos geológicos en escalas de tiempo de millones de años. El biocarbón, por su parte, se puede producir en cuestión de minutos, horas o inclusive días, dependiendo de las condiciones de la pirólisis (temperatura máxima alcanzada y tiempo de residencia dentro del reactor, principalmente) y a partir de distintos tipos de biomasa (Major, 2011).

Algo interesante del biocarbón es que en la cuenca del río Amazonas hay sitios llamados *terra preta* o tierra negra en portugués que, 1000 años después de su creación, siguen siendo más fértiles que las zonas circundantes. *Terra preta* es un tipo de suelo oscuro y muy fértil resultado de la modificación química de suelos preexistentes. Aunque no está claro su origen, se cree que la *terra preta* se formó involuntariamente a partir de los residuos carbonizados de asentamientos indígenas existentes antes de la llegada de los europeos (Lehmann y Joseph, 2009). Sin embargo, la producción de biocarbón bajo condiciones controladas para producir un mejorador del suelo a la medida de cada tipo de suelo es reciente, por lo que pocos agricultores y público en general han oído hablar de él.

Biocarbón en el suelo

Cuando el biocarbón se mezcla con el suelo, afecta significativamente sus propiedades físicas (retención de humedad, porosidad, compactación), químicas (pH, nutrientes) y biológicas (diversidad, riqueza y actividad de organismos como lombrices, hongos y bacterias). Estos efectos son debidos a las características del biocarbón que residen básicamente en su gran resistencia a la descomposición (decenas a centenas de años), alta porosidad y gran capacidad de retención de nutrientes y agua que mejoran las propiedades del suelo, lo que afecta positivamente su fertilidad y el crecimiento de las plantas y los microorganismos benéficos (Lehmann y Joseph, 2009).

En general, el biocarbón tiene un pH alcalino (≥ 7), lo cual ayuda a contrarrestar la acidez de algunos suelos que pueden presentar problemas por movilidad de aluminio o hierro. Aunque esta alcalinidad deriva principalmente de las condiciones de la pirólisis (altas temperaturas aumentan el pH del biocarbón, Fig. 2), existe la posibilidad de producir biocarbones ácidos ($\text{pH} < 6$), por lo que su aplicación puede extenderse al mejoramiento de suelos salinos y sódicos.

El biocarbón también presenta una alta capacidad de intercambio iónico. Esta propiedad le permite ser un adsorbente eficaz para nutrientes vegetales, lo cual puede representar ahorros significativos en el uso de fertilizantes. El biocarbón también puede retener o absorber materiales tóxicos como hidrocarburos y metales pesados. Éstos pueden ser inmovilizados en las superficies del biocarbón y por tanto se reduce el riesgo para plantas y microorganismos del suelo y se evita su desplazamiento y contami-

nación de otros sitios como cuerpos de agua.

Los efectos del biocarbón en el suelo dependen de parámetros como las características de los residuos (desechos animales como los estiércoles pueden aportar nutrientes como el fósforo o el nitrógeno) y de la pirólisis (temperatura y tiempo, principalmente) que afectan fuertemente las características del biocarbón como su composición y estabilidad (Figura 2). Asimismo, el mejoramiento del sitio depende de las características de los suelos en los que se use, las dosis empleadas o el manejo del sitio. Por lo que, los efectos de la adición de biocarbón pueden ser muy variables y cambiarán con al menos un elemento que se modifique (Major, 2011).

Otros usos del biocarbón

Además de ser un mejorador del suelo, el biocarbón tiene un alto potencial de escalamiento, ya que se podría emplear como sustrato en infraestructura de techos y muros verdes, purificador del agua y del aire tanto a nivel doméstico como industrial, combustible alternativo para la generación de electricidad o como componente de las baterías de litio, cuyas aplicaciones van desde vehículos eléctricos hasta dispositivos portátiles (Kumar *et al.*, 2020). El biocarbón también se ha usado como un aditivo para acelerar el proceso de compostaje, ya que puede mejorar la capacidad de almacenamiento de agua y la aireación de las pilas de composta y de esta forma reducir la emisión de gases de efecto invernadero como el CO_2 (Major, 2011). En el caso de la ganadería, el biocarbón se ha empleado en la alimentación para regular el equilibrio de nutrientes en el tracto intestinal del ganado. Finalmente, dentro de los usos más radicales se encuentra el de

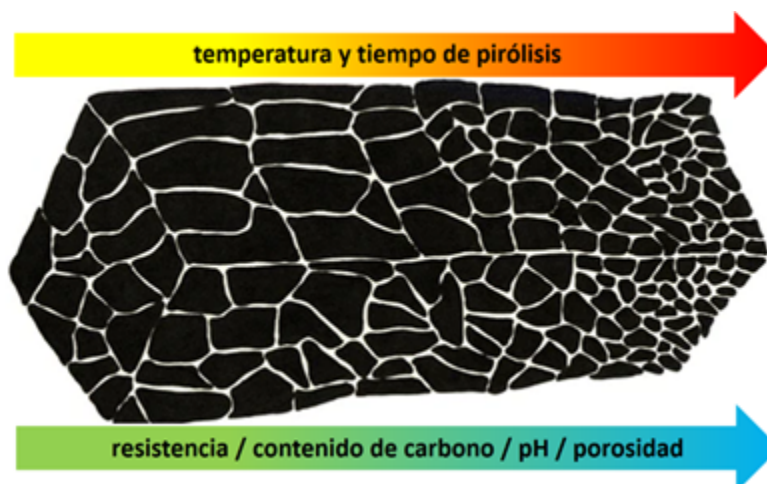


Figura 2. Representación gráfica de los efectos de la pirólisis en propiedades del biocarbón como la resistencia a la degradación o la cantidad de poros, los cuales aumentan con la temperatura y el tiempo que dure la pirólisis. Modificado de Nanda *et al.* (2016).

la construcción, ya que el biocarbón se ha propuesto como un sustituto del cemento (Kumar *et al.*, 2020).

¿Y el cambio climático?

Como se mencionó, uno de los problemas más graves que estamos enfrentando como humanidad es la crisis climática global debido al aumento de gases de efecto invernadero como el CO_2 . Al respecto, la adición de biocarbón al suelo se ha sugerido como un medio para secuestrar el CO_2 atmosférico. Para que esto sea significativo es necesario que el biocarbón sea más estable que la biomasa a partir de la cual se formó. Es importante recordar que el paso del CO_2 atmosférico a biomasa vegetal se produce mediante la fotosíntesis, proceso por el cual las plantas transforman la energía del Sol en materia orgánica o biomasa. Sin embargo, la biomasa vegetal que se forma normalmente se descompone en pocos días o meses, liberando a la atmósfera el CO_2 fijado por las plantas. Por el contrario, la transformación de esta

biomasa en biocarbón desvía el carbono del ciclo biológico rápido a un ciclo mucho más lento, lo que podría significar el secuestro del CO_2 en forma de carbono estable en el suelo (Figura 3) (Lehmann, 2007).

Además de su influencia en el secuestro del CO_2 , cuando se aplica biocarbón al suelo las emisiones de otros gases de efecto invernadero pueden disminuir. Esto es relevante ya que los suelos, principalmente los agrícolas, contribuyen con 25 % de las emisiones antropogénicas de CO_2 , CH_4 y N_2O (IPCC, 2014). Al respecto, el biocarbón puede mejorar la aireación del suelo restringiendo los procesos anaeróbicos como la producción de CH_4 y N_2O . Así mismo, al afectar el pH, la disponibilidad de nitrógeno y la calidad de la materia orgánica disponible para los microorganismos, el biocarbón puede disminuir la actividad microbiana que forma tanto CH_4 como N_2O (Major, 2011).

Además de los beneficios al suelo, la

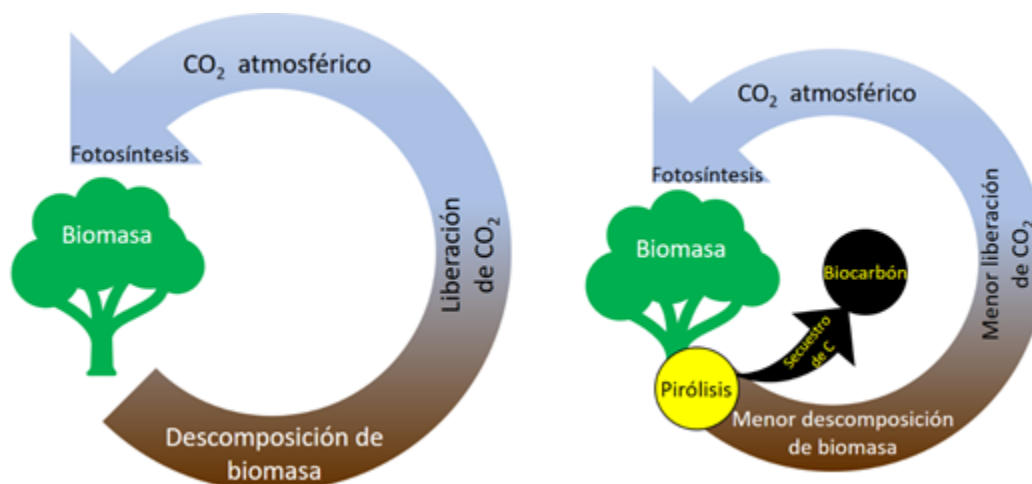


Figura 3. Ciclo del carbono (izquierda) y ciclo del biocarbón (derecha). Las plantas capturan el CO₂ atmosférico mediante la fotosíntesis. Al morir, la biomasa vegetal se descompone y libera el CO₂. Mediante la pirólisis, una parte de esa biomasa puede convertirse en biocarbón. Al ser un material más estable, el biocarbón permite el secuestro del carbono y se pueden reducir las emisiones de CO₂ a la atmósfera. Modificado de Lehmann (2007).

producción de biocarbón puede favorecer la revalorización de desechos orgánicos, ya que prácticamente cualquier residuo orgánico puede ser usado para producir este compuesto. Esto se puede ver reflejado en: a) mayor facilidad de manejo, ya que el volumen de los residuos disminuye considerablemente (aproximadamente de 30 a 50 %), b) eliminación de compuestos tóxicos que son destruidos durante la pirólisis, y c) reducción de la contaminación ambiental en zonas con problemas de exceso de basura como las grandes ciudades, donde el mal procesamiento de la basura también contamina suelos, agua y aire. Asimismo, la pirólisis puede generar gases y líquidos de valor calorífico que pueden ser aprovechados en otros procesos como la misma producción de biocarbón (Lehmann y Joseph, 2009; Nanda *et al.*, 2016).

Debido a esta revalorización de residuos, el

biocarbón puede tener implicaciones en el desarrollo de una economía circular cuyo objetivo es promover la optimización de recursos, reducir el consumo de materias primas y aprovechar los desechos (Graziani, 2018). Por ejemplo, en la agricultura, el biocarbón puede integrarse en: i) prácticas de tratamiento de residuos de poda, cosecha o ganado en el mismo sitio de su generación; ii) temas de seguridad alimentaria al potencialmente incrementar la fertilidad y biodiversidad de los suelos, eficientizar el uso del agua y los fertilizantes y en general aumentar la producción agrícola y iii) la problemática del cambio climático mediante la captura de carbono y disminución de gases de efecto invernadero por parte del suelo. Sin embargo, los esfuerzos por producir y usar el biocarbón se han centrado mayoritariamente en países de mayores ingresos como China, Estados Unidos, Australia o Alemania, siendo escasa

la investigación que se ha desarrollado en países como México.

Efectos secundarios

No todo es color de rosa con el biocarbón, ya que se han documentado varios impactos negativos, atribuidos a cuestiones como (Lehmann y Joseph, 2009; Xiang et al., 2021):

- menor disponibilidad de humedad debido a la alta retención de las moléculas del agua por parte del biocarbón
- baja fertilidad debido a la inmovilización de nutrimentos como el nitrógeno
- mayor emisión de gases de efecto invernadero (CH_4 , CO_2 o N_2O)
- aumento del pH y salinidad del suelo
- movilización del biocarbón durante y después de su aplicación al suelo con el riesgo de contaminación de cuerpos de agua cercanos o inclusive mantos freáticos, donde el efecto del biocarbón no ha sido estudiado a detalle
- aporte de contaminantes, algunos formados durante el proceso de pirólisis (hidrocarburos aromáticos policíclicos) o derivados de la materia prima (metales pesados) con que se produjo el biocarbón y que pueden inducir una toxicidad aguda para los microorganismos y la vegetación
- movilización de contaminantes ya presentes en el suelo como el arsénico por cambio en las condiciones de acidez y alcalinidad del suelo
- efectos adversos en el sistema respiratorio debido a la entrada al cuerpo de

partículas finas del biocarbón, representando una amenaza a la salud humana y animal

- cambios en la diversidad y riqueza de las comunidades de bacterias y hongos del suelo por alteraciones en su entorno y metabolismo
- aumento de la contaminación del aire, ya que las partículas pequeñas y ligeras de biocarbón pueden ingresar fácilmente a la atmósfera en condiciones naturales de viento, lo que resulta en una mayor concentración de PM_{10} (partículas cuyo diámetro es menor que $10\text{ }\mu\text{m}$).

Otra cuestión que puede obstaculizar el uso del biocarbón es el hecho de que la pirólisis convencional emplea combustibles que pueden generar contaminantes como CO_2 o dioxinas y furanos que son precursores de enfermedades como el cáncer. Por lo que el uso y desarrollo de tecnología que emplee energías renovables y limpias son primordiales para que el biocarbón realmente sea producido de forma sustentable. Asimismo, la producción de biocarbón puede ser costosa dependiendo del tipo de tratamiento térmico que se aplique, por lo que, aun existiendo residuos que puedan ser carbonizados, el procesamiento puede no ser costeable. Aunado a esto, puede haber costos adicionales relacionados con el transporte del biocarbón desde el sitio de producción hasta el sitio de aplicación. Por lo que sería recomendable la transferencia de la tecnología de producción a los usuarios finales, es decir, a los agricultores. De esta forma, se podrían carbonizar los residuos en el mismo sitio donde van a ser usados.

Finalmente, debido a que el biocarbón puede durar años (posiblemente siglos),

una vez en el suelo difícilmente se podrán revertir los efectos indeseables que esté produciendo. De ahí que la caracterización (ya que como mencionó sus propiedades pueden variar considerablemente) y los estudios a mayor escala y a largo plazo son esenciales antes de recomendar y aplicar el biocarbón masivamente. Además, tanto la producción como su uso deben contar con parámetros y normatividad que permitan identificar y revertir potenciales riesgos al suelo, a la salud humana y al ambiente en general.

Conclusiones

Ambos tipos de materiales carbonosos han demostrado ser eficientes en su uso y tener un amplio potencial. Sin embargo, tanto el carbón mineral como el biocarbón pueden traer consigo problemas al ambiente o a la salud pública no reversibles. En el caso del carbón mineral, es evidente que la extracción y uso continuarán, por lo que es necesario vigilar y mejorar las prácticas involucradas en cada etapa de su ciclo, para aminorar o evitar en lo posible la degradación del ambiente. Afortunadamente, con la reciente Conferencia de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático (la COP26) más de 40 países se comprometieron a ampliar la energía limpia y garantizar una transición justa para abandonar el uso del carbón en las próximas décadas (ONU, 2021).

En cuanto al biocarbón, los beneficios al suelo, la reducción de basura orgánica y la generación de energía durante la pirólisis hacen atractiva la producción de este mejorador del suelo, ya que otro tipo de procesamiento de residuos, como el compostaje, no producen energía utilizable o no pueden ser empleados en cuestiones como la purificación del agua y

el aire. Sin embargo, su uso no puede ser generalizado, ni puede considerarse como la piedra angular en la recuperación de suelos degradados o mejoramiento de zonas de cultivo, ya que como se mencionó, los efectos varían dependiendo del suelo y del tipo de biocarbón.

Referencias

British Petroleum Company, *Statistical Review of World Energy 2020*, 69th edition, 2020, 65 p.

Comisión Nacional para el Uso Eficiente de la Energía (CONUEE), *Lista de combustibles 2020 que se considerarán para identificar a los usuarios con un patrón de alto consumo, así como los factores para determinar las equivalencias en términos de barriles equivalentes de petróleo*, Disponible en: https://www.conuee.gob.mx/transparencia/boletines/SITE/LISTA_DE_COMBUSTIBLES_2020.pdf, (consultado 15 de junio de 2021).

Graziani, P., *Economía circular e innovación tecnológica en residuos sólidos: Oportunidades en América Latina*, Banco de Desarrollo de América Latina, 2018, 90 p. Disponible en: https://scioteca.caf.com/bitstream/handle/123456789/1247/Economia_circular_e_innovacion_tecnologica_en_residuos_solidos_Oportunidades_en_America_Latina.pdf?sequence=9&isAllowed=y (fecha de consulta: 25 de noviembre de 2021).

Hester, R.E. y Harrison, R.M. (eds.), *Coal in the 21st century. Energy needs, chemicals and environmental controls*, Royal Society of Chemistry, Issues in Environmental Science and Technology, 45, 224 p, 2018.

- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2014: *Summary for Policymakers*. In: Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 30 p, 2014.
- Kumar, A., Anand, A. y Kausha, P., Production, activation, and applications of biochar in recent times. *Biochar* [2], pp. 253–285, 2020.
- Lehmann, J., A handful of carbon, *Nature* 447[7141], pp. 143–144, 2007.
- Lehmann, J. y Joseph, S. (eds.), *Biochar for environmental management: science and technology*, Earthscan, London, 2009, 416 p.
- Macías, C., *El carbón. El recorrido de los minerales*. Comunidad de Madrid, España, 2007, pp. 43-59.
- Major, J., *Biochar for soil quality improvement, climate change mitigation and more. A literature review*, 2011. Disponible en: <https://www.gara.de/fileadmin/gara/Untersuchungen/BiocharSoilFertility.pdf> (fecha de consulta: 29 de noviembre de 2021).
- Mazumder, B., *Coal science and engineering*. Woodhead Publishing India, 2012, 459 p.
- Naciones Unidas (ONU). 2021. *La COP26 se cierra con un acuerdo climático "de compromiso", pero insuficiente, dice António Guterres*. Disponible en: <https://news.un.org/es/story/2021/11/1499972> (fecha de consulta: 27 de noviembre de 2021).
- Nanda, S., Dalai, A.K., Berruti, F. y Kozinski, J.A., Biochar as an Exceptional Bioresource for Energy, Agronomy, Carbon Sequestration, Activated Carbon and Specialty Materials, *Waste and Biomass Valorization* 7, pp. 201–235, 2016.
- Tarbut, E.J. y Lutgens, F.K., *Ciencias de la Tierra. Una introducción a la geología física*, Pearson Educación S. A., Madrid, 2013, 880 p.
- Xiang, L., Liu, S., Ye, S., Yang, H., Song, B., Qin, F., Shen, M., Tan, C., Zeng, G. y Tan, X., Potential hazards of biochar: The negative environmental impacts of biochar applications. *Journal of Hazardous Materials* 420[126611], 2021.
- World Coal Institute, *The Coal Resource: A Comprehensive Overview of Coal*, World Coal Institute, London, 2009, 44 p.

La agonía de los bosques de La Malinche

**Dra. Bárbara Cruz Salazar
M. en C. Saúl George Miranda
Biól. Aidee Tlapa Haro
Centro Tlaxcala de Biología de la Conducta
Universidad Autónoma de Tlaxcala**

Resumen

El bosque templado mexicano pierde 0.8 % de su superficie anualmente por actividades humanas. El volcán La Malinche alberga 20,607 ha de bosque templado, en él, mas de 937 especies (muchas de ellas endémicas de la Faja Volcánica Transmexicana (FVT) y otras en alguna categoría de riesgo) están amenazadas por el uso descontrolado de los recursos forestales. Debido a la deforestación y degradación del ecosistema, también, está en peligro la conectividad (de fauna y flora de alta montaña) con otros volcanes de la FVT, tales como, el Iztaccíhuatl, Popocatepetl, Pico de Orizaba, Cofre de Perote, entre otros. Este trabajo muestra que el disturbio humano afecta negativamente al bosque de La Malinche de tres maneras: 1. Disminuyendo el número de especies arbóreas, 2. Incrementando la dominancia de pocas especies y 3. Reduciendo la masa forestal. Para conservar a las especies de La Malinche y de los bosques templados del centro de México es necesario regular las actividades humanas y detener de inmediato la deforestación.

Palabras clave

Actividades humanas, bosque templado, conservación, especies arbóreas.

Abstract

The Mexican temperate forest loses 0.8 % of its surface annually due to human activities. La Malinche volcano conserves 20,607 ha of temperate forest, in it, more than 937 species (many of them endemic of the Trans-Mexican Volcanic Belt (TVB) and others in some category of risk) are threatened by the uncontrolled use of forest resources. Due to deforestation and degradation of the ecosystem, the connectivity of high mountain fauna and

flora with other volcanoes of the TVB, such as Iztaccíhuatl, Popocatepetl, Pico de Orizaba, Cofre de Perote, among others, is also in danger. This work shows that human disturbance negatively affects to La Malinche forest of three ways: 1. Decreasing the number of tree species, 2. Increasing the dominance of few species, and 3. Reducing the forest mass. To conserve the species of La Malinche and the temperate forests of central Mexico, it is necessary to regulate human activities and stop deforestation immediately.

Keywords

Conservation, humans activities, tree species, temperate forest.

La Malinche

También llamada Matlalcuéytl o Malitzin, es uno de los volcanes principales que forman la cadena montañosa de la Faja Volcánica Transmexicana (FVT) (Vargas, 1997). Se ubica en los estados de Tlaxcala y Puebla, con un rango altitudinal entre los 2300 hasta los 4461 metros sobre el nivel del mar (msnm) (López-Domínguez y Acosta, 2005; SEMARNAT, 2016) (Figura 1A, B). Los principales tipos de vegetación son: (1) el bosque de pino-encino (*Quercus* spp., *Pinus leiophylla*, *P. montezumae*, *P. pseudostrobus*, *P. patula* y *P. ayacahuite*) entre los 2600 y 2850 msnm; (2) el bosque de oyamel (*Abies religiosa*), entre los 2800 y 3500 msnm; (3) el bosque de alta montaña (*P. hartwegii*), desde los 3200 hasta los 4200 msnm; y (4) el zacatonal de alta montaña (*Calamagrostis tolucensis*, *C. tolucensis*, *Festuca tolucensis*), sobre los 4000 hasta los 4500 msnm (Sánchez y López, 2003; Rojas-García y Villers, 2008). Hasta el momento se han reconocido más de 937 especies, de las cuales 22 son endémicas de la FVT,

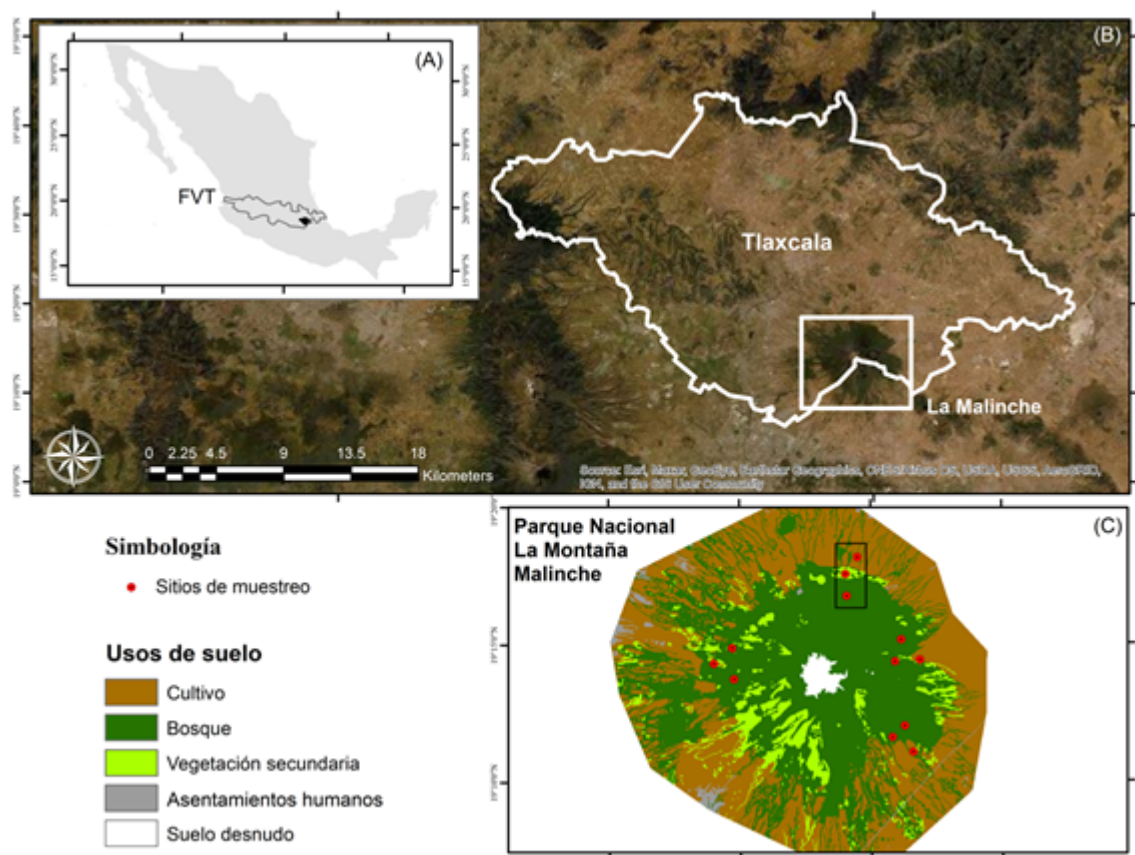


Figura 1. Clasificación del carbón según su capacidad energética, abundancia, contenido de carbono (C) y aplicación final. Modificado de World Coal Institute (2009).

27 sólo se han registrado en La Malinche y 25 se encuentran bajo algún tipo de protección (Fernández y López-Domínguez, 2005; Varela y Aguilera, 1999).

Históricamente, el volcán fue llamado Matlacuéyatl (“fuente azul”) por los náhuatl de la región en honor a la diosa madre, relacionada con Tláloc, divinidad vinculada a la lluvia y la humedad (Luna-Ruiz, 2007), lo que muestra la representación del volcán como un área mítica y altamente biodiversa que resalta la importancia no solo ecológica, sino también

cultural del centro de México. Las amplias faldas del volcán se extienden 134 km a su alrededor sobre una gran llanura, lo que ha permitido el relativo fácil acceso de las personas (Yarza, 2003), condición que ha causado la transformación de bosque a áreas productivas, por ejemplo parcelas de cultivos y áreas de pastoreo (Figura 2).

La amenaza

La Malinche fue decretada un Área Natural Protegida el 6 de octubre de 1938 con el objetivo de conservar la diversidad de especies y endemismos en 46,112.24 hectáreas



Figura 2. La Malinche, en sus faldas se observan parches sin vegetación convertidos a algún tipo de actividad humana (p.e. asentamientos, cultivos).

de superficie; el polígono fue nombrado Parque Nacional La Montaña Malinche o Matlalcuéyatl (DOF, 1938) (Figura 1C). A través del Programa de Manejo se indicaron acciones de protección, manejo, restauración y conservación de la diversidad biológica y cultural (López-Téllez et al., 2019). No obstante, previo al decreto, el territorio estaba habitado por poblaciones de origen náhuatl (Luna-Ruiz, 2007), por lo que se decidió no expropiar la tierra (quitar una propiedad por causas de interés público o de la nación), sino regular el uso de suelo y el aprovechamiento de los recursos naturales.

Las poblaciones humanas asentadas en las faldas de La Malinche dependieron por cientos de años de la agricultura de temporal (cultivos que dependen de las lluvias durante la producción), así como de los recursos del bosque (Luna-Ruiz, 2007). Entre los usos actuales que se le da al bosque, destacan la extracción forestal que incluye la sustracción para leña (ramas o árboles pequeños) y madera (árboles adultos), además del “ocoteo” (cortes de trozos de madera de pinos impregnadas de resina utilizados para encender fuego). Como consecuencia, actividades agrícolas, pecuarias y asentamientos humanos han reducido la cobertura forestal y el funcionamiento del bosque; se estima que el 30 % de su superficie original está fragmentada por sobrepastoreo, tala, agricultura e incendios (CONANP, 2013; Arriola-Padilla et al., 2014) (Figura 3).

A pesar de que el Parque Nacional La Montaña Malinche cuenta con un Plan de Manejo Integral que propone poco cambio en el uso de suelo y la extracción controlada de recursos forestales (Rojas y Villers

2008), el cambio de uso de suelo para áreas agrícolas, asentamientos humanos y pastizales inducidos no solo no ha reducido desde su decreto en 1938 sino que ha incrementado, principalmente, en laderas pertenecientes al estado de Puebla. El peligro de perder la vegetación y las especies de fauna asociadas al bosque templado de La Malinche es muy alta debido al continuo e intenso cambio de uso de suelo y extracción no controlada de los recursos naturales.

Esta problemática ha motivado a jóvenes investigadores, investigadores consolidados y estudiantes del Posgrado en Ciencias Biológicas, del Centro Tlaxcala de Biología de la Conducta de la Universidad Autónoma de Tlaxcala (CTBC-UATx), para estudiar la diversidad del volcán y su fragilidad ante el creciente e insesante uso y destrucción de los recursos naturales. Este artículo presenta parte de los resultados de un proyecto de investigación financiado por FORDECYT-PRONACES-Proyecto 15033 “Genética de comunidades arbóreas de bosque templado en un gradiente de disturbio: implicaciones para la conservación de la biodiversidad”, Universidad Autónoma de Tlaxcala. El objetivo fue evaluar cómo el disturbio humano afecta la permanencia del bosque templado de La Malinche, a través de un estudio ecológico que determina la estructura y composición de especies de árboles en un gradiente de disturbio humano.

Investigando el impacto de los humanos en los bosques

El área de estudio se delimitó en el polígono del Parque Nacional Montaña Malinche, con base en la zonificación de uso del Programa de Manejo (SEMARNAT-CONANP 2013) (Figura 1C). Los sitios de muestreo



Figura 3. Bosque de oyamel (*Abies religiosa*) en La Malinche, alrededor de una zona deforestada.

se ubicaron desde los 2900 hasta los 3200 msnm porque en este rango las actividades humanas son más intensas, y sobre él la diversidad arbórea decrementa debido a condiciones ambientales extremas (temperatura, insolación, humedad), mismas que son toleradas por pocas especies, sobre todo aquellas que colonizan primero en la sucesión vegetal (proceso ecológico en el que surgen especies de flora en un sitio en donde no se encontraban), por ejemplo, el pino moctezuma (*P. montezumae*) (Vela-Correa et. al., 2007; Manzanilla Quiñones et. al. 2019).

Para elegir los sitios de muestreo, se analizaron imágenes de satélite que ayudaron a identificar la cobertura forestal de la zona, y a determinar a gran escala tres

niveles de disturbio: El nivel bajo se ubicó en áreas con bosque relativamente continuo y poca o nula actividad humana; el nivel intermedio fueron aquellas zonas de bosque discontinuo (fragmentos sin vegetación o claros evidentes dentro del bosque, resultado del abandono de parcelas de cultivo); y el nivel alto se trató de sitios dominados por actividades productivas (parcelas de cultivo, asentamientos humanos, pastizal inducido) y algunos fragmentos de bosque (Figura 4).

En cada ladera (Norte, Sur, Este y Oeste), se ubicaron los tres niveles de disturbio, mismos que se consideraron comunidades biológicas (conjunto de distintas especies en interacción, en un área y tiempo deter-

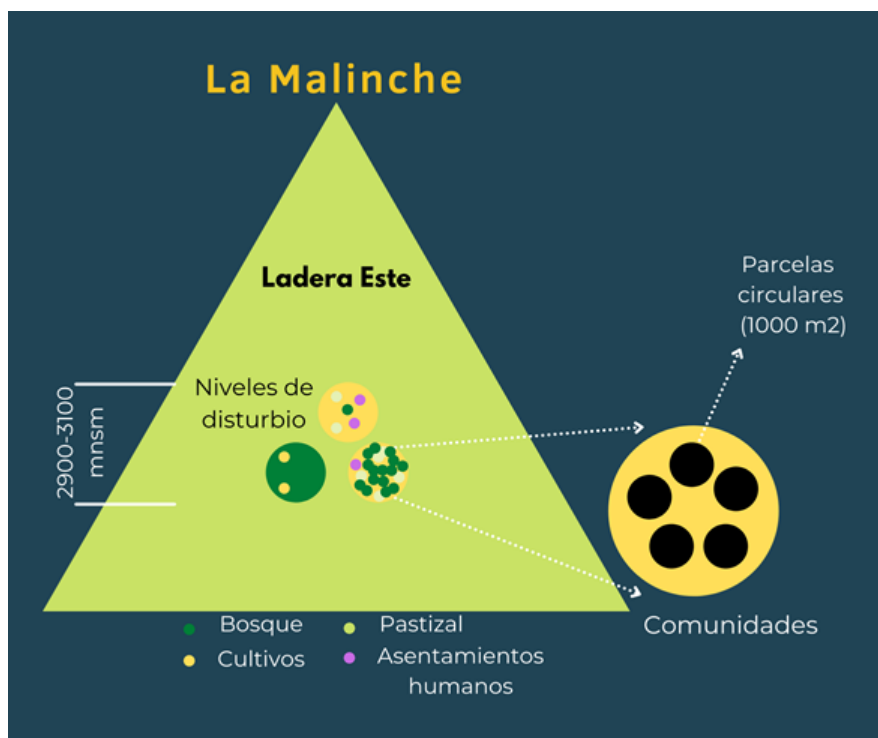


Figura 4. Niveles de disturbio y diseño de muestreo para el registro de árboles de La Malinche.

minado). Cada comunidad se muestreó con cinco parcelas circulares de 1000 m² para el registro de las especies (Ramírez-Marcial et al., 2001; Figura 4). Se registraron todos los árboles capturados dentro de la parcela y se identificó hasta especie mediante la comparación de algunas colectas con el material del herbario de la Universidad Autónoma de Tlaxcala.

En cada ladera (Norte, Sur, Este y Oeste), se ubicaron los tres niveles de disturbio, mismos que se consideraron comunidades biológicas (conjunto de distintas especies en interacción, en un área y tiempo determinado). Cada comunidad se muestreó con cinco parcelas circulares de 1000 m² para el registro de las especies (Ramírez-Marcial et al., 2001; Figura 4). Se registraron todos los árboles capturados dentro de la parcela y se identificó hasta especie mediante la comparación de algunas colectas con el material del herbario de la Universidad Autónoma de Tlaxcala.

Para analizar los datos se obtuvieron los índices que describen la riqueza (número de especies) y abundancia (número de individuos de cada especie) de árboles. También, se estimó la masa forestal, a lo largo del gradiente de disturbio, por medio de la densidad (número de individuos en una hectárea) y el área basal (suma de todos los diámetros de los troncos de los árboles a una altura del pecho (AP) de 1.3 m, en una superficie determinada).

Resultados preliminares

La especie dominante en las cuatro laderas fue el pino moctezuma (*P. montezumae*) (Figura 5).



Figura 5. Pino moctezuma (*Pinus montezumae*) en La Malinche. El bosque que se observa se encuentra entre dos parcelas de cultivo.

El mayor número de especies promedio (riqueza) se presentó, en las laderas Este (Figura 6A), Norte (Figura 6B) y Oeste (Figura 6C) en disturbio bajo; y en la ladera Sur, en disturbio intermedio (Figura 6D).

En general, la abundancia de las especies fue semejante (uniformidad de Pielou más cercana a 1) en disturbio bajo, en las laderas Este (Figura 7A) y Oeste (Figura 7C); y en disturbio intermedio en las laderas Norte (Figura 7B) y Sur (Figura 7D). Las comunidades con una abundancia más desigual (uniformidad de Pielou más cercana a cero) y por lo tanto con pocas especies dominantes fueron: el disturbio intermedio en la ladera Este (Figura 7A) y Oeste (Figura 7C), el disturbio bajo en la ladera Norte (Figura 7B) y el disturbio alto en la ladera Sur (Figura 7D).

Existió mayor masa forestal (área basal) en disturbio bajo en tres las laderas (Este,

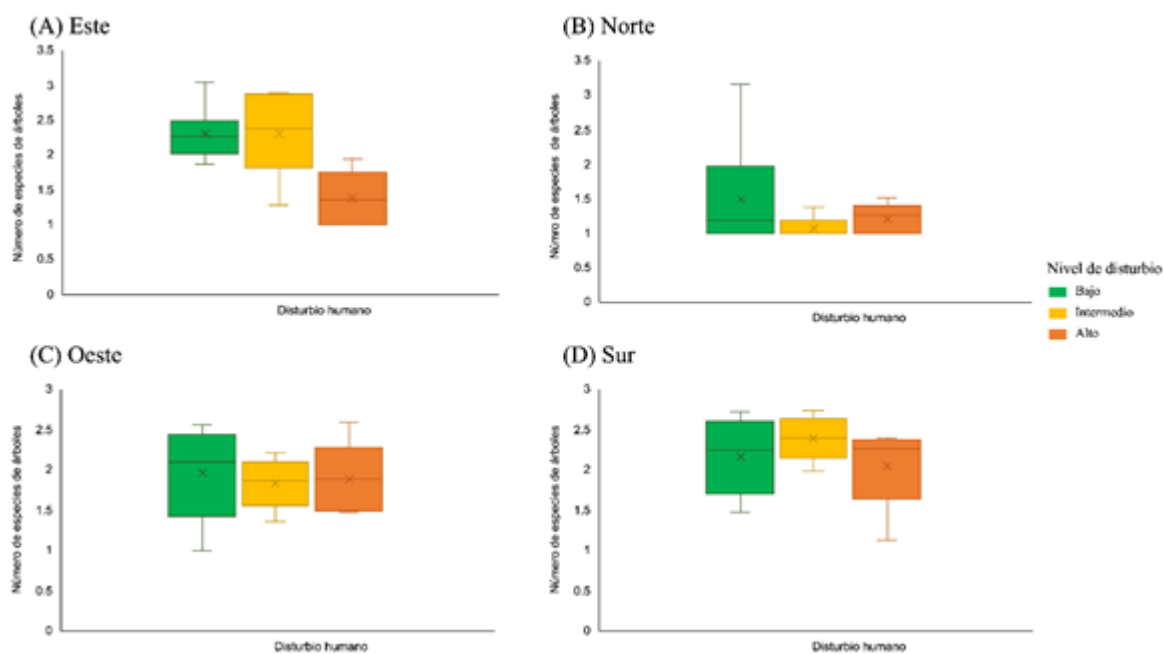


Figura 6. Número de especies arbóreas en las cuatro laderas de La Malinche en tres niveles de disturbio humano. La cruz al interior de la caja indica el promedio. Las barras fuera de la caja indican los valores mínimos (abajo) y máximos (arriba). La línea que divide la caja es la mediana de la distribución de los datos, es decir, el valor central del conjunto de datos ordenados.

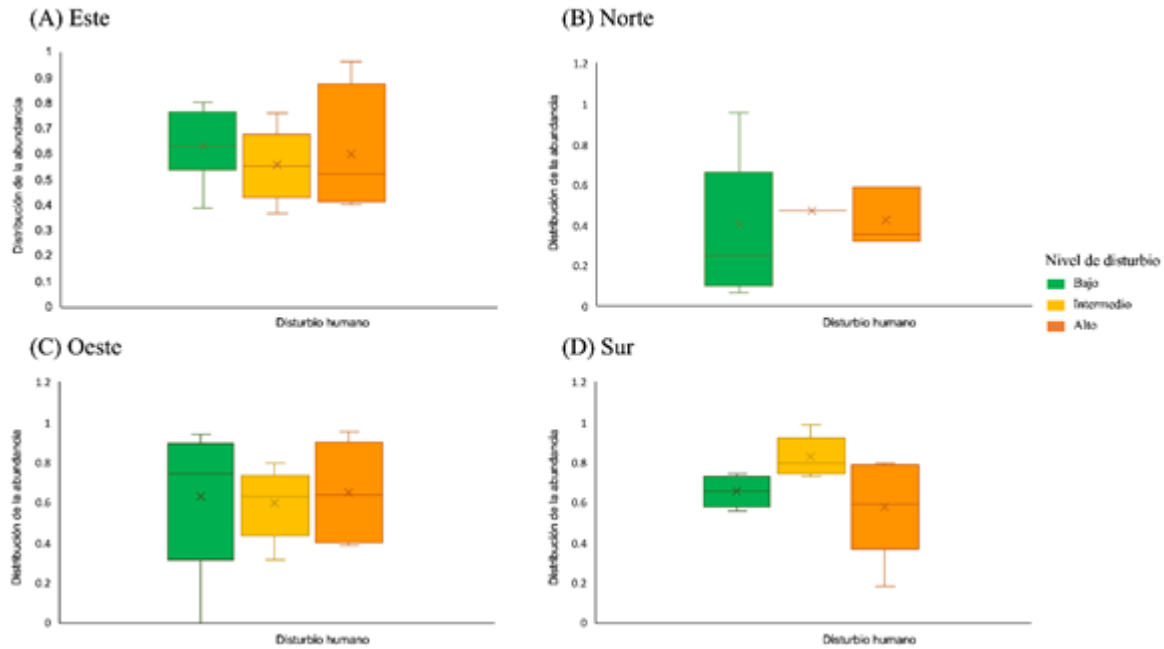


Figura 7. Distribución de la abundancia de árboles (Uniformidad de Pielou) por nivel de disturbio humano en La Malinche. Valores más cercanos a 1 indican que la abundancia de las especies es más uniforme, mientras que, valores cercanos a cero muestran que en la comunidad hay pocas especies con alta dominancia. La cruz al interior de la caja indica el promedio. Las barras fuera de la caja indican los valores mínimos (abajo) y máximos (arriba). La línea que divide la caja es la mediana de la distribución de los datos, es decir, el valor central del conjunto de datos ordenados.

Oeste y Sur) (Figura 8A). La densidad (número de individuos en una hectárea) también fue mayor en disturbio bajo, a excepción de la ladera Oeste, en donde la mayor densidad se presentó en disturbio intermedio (Figura 8B).

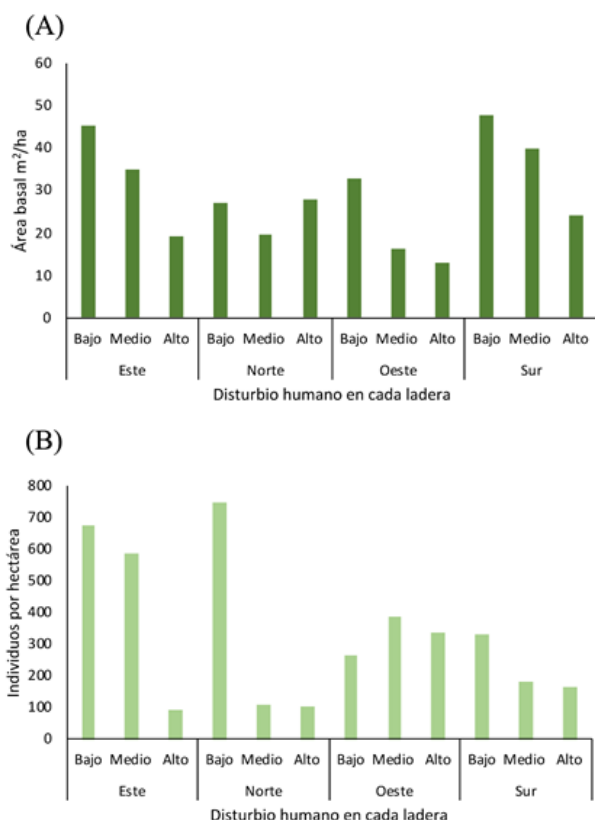


Figura 8. Área basal (A) y densidad (B) de árboles en La Malinche por ladera y nivel de disturbio humano.

Conclusiones: deterioro de La Malinche

La dominancia del pino moctezuma coincide con el rango de distribución altitudinal en el que se ha registrado en estudios previos (desde 1200 hasta 3500 msnm; Farjon, 2013).

Aunque el número de especies varió en

cada ladera y esto puede estar relacionado con diferentes condiciones ambientales (luz, humedad, suelo) que tendrían que analizarse en estudios posteriores, nuestro estudio revela un patrón asociado al gradiente de disturbio humano que se resume en lo siguiente:

1. Mayor riqueza de árboles (número de especies) en disturbio bajo, la riqueza disminuye cuando hay disturbio humano.
2. Menor dominancia (abundancia) de pocas especies en comunidades con disturbio bajo e intermedio.
3. Mayor área basal (masa forestal) conforme el grado de conservación de la comunidad arbórea incrementa.
4. En general, mayor densidad (número de árboles en una hectárea) a menor disturbio humano.

Los cambios en la naturaleza provocados por el humano tienen impactos serios en la abundancia, diversidad y conservación de las especies. En La Malinche, la mayor riqueza, área basal y densidad arbórea en comunidades con bajo disturbio humano es un aspecto muy importante de resaltar, puesto que, si las actividades humanas siguen el ritmo actual es posible que las poblaciones de ahora disminuyan y con ello la masa forestal. La pérdida del bosque templado de La Malinche implica no solo la pérdida de flora y fauna del volcán, sino de una parte esencial que funciona como un corredor biológico con otros volcanes de la FVT, por ejemplo, el Iztaccíhuatl, Popocatepetl, Pico de Orizaba y Cofre de Perote.

Necesidades

La disminución de especies y áreas naturales causa un deterioro de los servicios ambientales que obtenemos de la naturaleza, de modo que, la destrucción de los bosques de La Malinche además de tener fuertes implicaciones ecológicas, tiene también serias consecuencias sociales y económicas, porque compromete la captación, filtración y disponibilidad de agua, así como la fertilidad del suelo, secuestro de carbono y regulación del clima y aire. A corto plazo, las repercusiones se verán en el aire, agua, productividad del suelo y biodiversidad, cuyo impacto trascenderá al ambiente, economía y salud de la sociedad local y de la región.

Por todo ello, es necesario encontrar estrategias que nos permitan caminar hacia el uso controlado de los recursos naturales para nuestra subsistencia, porque de otra manera nuestra propia vida y bienestar están en riesgo. La problemática de la conservación del bosque templado de La Malinche es multifactorial, por tanto, es necesario atenderla desde diversos frentes, por ejemplo, desde el sector económico, social, ambiental y sanitario.

Como primer paso, se requiere la conciencia del impacto de la pérdida de la biodiversidad en nuestras vidas y la colaboración de la sociedad, para afrontar juntos el enorme reto que compromete la vida humana a mediano plazo. Los resultados obtenidos contribuyen a definir estrategias inmediatas y puntuales para la protección de los bosques de La Malinche, ya que muestran que el disturbio humano influye negativamente, y sin ninguna acción que sirva para detener y revertir esta tendencia, la conservación de la biodiversidad del Parque Nacional La Montaña Malinche

está en alto riesgo y con ello nuestro propio futuro.

Referencias

- Arriola-Padilla, V. J., Estrada, M. E., Ortega-Rubio, A., Pérez, M. R. y Gijón, H. A. R., Deterioro en áreas naturales protegidas del centro de México y del Eje Neovolcánico Transversal, *Inv. Ciencia*, 22 [60], pp.37-49, 2014.
- Farjon, A., *Pinus montezumae*. *The IUCN Red List of Threatened Species* 2013: e.T42382A2976574, 2013.
- Fernández, F. J. A. y López-Domínguez J. A., *Biodiversidad del Parque Nacional Malinche, Tlaxcala*, México, Gobierno del Estado de Tlaxcala, pp.235, 2005.
- López-Domínguez, J. C. y Acosta, R. *Descripción del Parque Nacional La Malinche*. en Fernández, JA y López, JC (Compiladores), *Biodiversidad del Parque Nacional La Malinche*, Coordinación General de Ecología, Gobierno del Estado de Tlaxcala, México, 2005, pp.3-24.
- López-Téllez, M. C., Campos C. V. y Ramírez C. G. Parque Nacional La Malinche y el impacto ecológico social de su decreto como Área Natural Protegida, *Reg. Desarr. Sust*, 19[36], pp.10-30, 2019.
- Luna-Ruiz J., *Nahuas de Tlaxcala*. México, CDI, Comisión Nacional para el Desarrollo de los Pueblos indígenas, México, 2007.
- Manzanilla-Quñones, U., Delgado Valerio, P., Hernández Ramos, J., Molina Sánchez, A., García Magaña, J. J. y Rocha Granados, M. D. C., Similaridad del nicho ecológico

- de *Pinus montezumae* y *P. pseudostrobus* (Pinaceae) en México: implicaciones para la selección de áreas productoras de semillas y de conservación, *Acta Bot. Mex.*, [126], 2019.
- Ramírez-Marcial, N., Gonzále-Espinosa, M. y Williams-Linera, G., Anthropogenic disturbance and tree diversity in montane rain forests in Chiapas, Mexico, *Forest Ecol. Manag.*, 154[1-2], pp.311-326, 2001.
- Rojas-García, F. y Villers-Ruíz, L., Estimación de la biomasa forestal del Parque Nacional Malinche: Tlaxcala-Puebla, *Rev. Mex. Ciencias For.*, 33[104], pp.59-86, 2008.
- Sánchez, A. y López, L., Clasificación y ordenación de la vegetación del norte de la Sierra Nevada, a lo largo de un gradiente altitudinal, *Anal. Inst. Biol. Serie Bot.*, 74[1], pp.47-71, 2003.
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT)-Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas (CONANP)., *Programa de Manejo Parque Nacional La Montaña Malinche o Matlal-cuéyatl.* pp. 205, 2013.
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT)., *Informe de la situación del medio ambiente en México. Compendio de estadísticas ambientales. Indicadores clave, de desempeño ambiental y de crecimiento verde. Edición 2015*, pp.498, 2016.
- Varela H. S. y Aguilera R. M., Breve descripción de los recursos forestales de México. Turrialba (Costa Rica). pp.116-134, 1999.
- Vargas, M. F. *Parques Nacionales de México. Vol. I. Zonas Centro, Oriente y Occidente, México*, Instituto Nacional de Ecología, pp.331, 1997.
- Vela-Correa, G., Vázquez-Martínez, B. E., Rodríguez-Gamiño, M. y Domínguez-Rubio, I. V., Caracterización edáfica de sitios con regeneración natural de *Pinus montezumae* Lamb. en el volcán la Malinche, México, *Agrociencia*, 41[4], pp.371-383, 2007.
- Yarza, de De la Torre, E. Los volcanes del sistema volcánico transversal, *Inv. Geog.*, [50], pp.221-234, 2003.

Receptores elípticos de membrana: la clave para una absorción efectiva



Lic. Jason Brandon Peña Muñoz
Dr. Leonardo Dagdug Lima
Departamento de Física
Universidad Autónoma Metropolitana
Unidad Iztapalapa

Resumen

Los modelos de transporte de moléculas estudiados a través de la difusión ofrecen un panorama importante para la descripción de los fenómenos microscópicos en la naturaleza. En este artículo se presentan algunos modelos de quimiorrecepción, desde el absorbente esférico perfecto, el uso del disco de Weber, y el enfoque de Berg y Purcell, hasta la solución generalizada de Zwanzig y Szabo, que considera el efecto de interferencia y los receptores parcialmente absorbentes. Se presenta una discusión sobre las condiciones bajo las cuales este efecto es realmente necesario. Posteriormente extrapolamos la solución de Dudko usando una comparación dimensional para la constante de corriente de difusión asociada a receptores de forma arbitraria en una célula esférica y contrastamos la eficiencia de absorción en quimiorreceptores circulares y elípticos usando como referencia al absorbente esférico perfecto. Se encontró que la geometría elíptica ofrece un modelo plausible en la anatomía celular, un resultado que podría explicar la variación de estructura en los quimiorreceptores y los cambios fisiológicos observados en las membranas celulares.

Palabras Clave

Células, membranas, difusión, modelos biológicos, biofísica, quimiorreceptores.

Abstract

Models of molecules transport through diffusion offer an important insight into the description of microscopic phenomena in nature. In this article we go through some models of chemoreception, from the perfect spherical absorbent, the use of Weber's disk, and the develop of Berg and Purcell approach, to Zwanzig and Szabo generalized solution where interference effect and

partially absorbing receptors are considered. A discussion on the conditions under which this effect is truly necessary is presented. Afterwards, we extrapolate Dudko's solution using a dimensional comparison for rate constant diffusion to receptors of arbitrary shape on a spherical cell and contrast the absorption effectiveness on circular and elliptical chemoreceptors using as reference the perfect spherical absorber. We found that the elliptical geometry offers a plausible model in cellular anatomy, a result that could explain the structure variation on chemoreceptors and the observed physiological changes on cells.

Keywords

Cells, membranes, diffusion, biological models, biophysics, chemoreceptors.

Introducción

La célula es la unidad morfológica y funcional de los seres vivos, están guiadas por reacciones químicas que crean y desmantelan estructuras biológicas, sustentan el metabolismo y hacen copias de ellas mismas. Las células son necesarias para la vida, pero además de su existencia es necesario que funcionen correctamente y muchas veces eso depende de la comunicación celular. Probablemente uno de los lugares más comunes en donde se pueden encontrar quimiorreceptores (i.e. proteínas encargadas de la recolección de información) es en la membrana celular: una bicapa lipídica encargada de delimitar el medio exterior e interior de una célula, además de regular el transporte de sustancias que entran o salen de esta. Una molécula que lleva información de una célula a otra es llamada molécula de señalización, ligamento, unión o simplemente ligando. Este tipo de partículas puede tener diferentes características, entre ellas se encuentran

las moléculas gaseosas de señalización, las cuales introducen cambios fisiológicos o bioquímicos en el organismo, tal como lo hace el oxígeno, el dióxido de carbono, óxido de nitrógeno o los gastrotransmisores (Reece *et al*, 2011). Se tienen también las biomoléculas hidrofílicas que gracias a su selectividad polar generada por el contacto con el agua son capaces de formar bicapas y evitar el contacto con otros medios acuosos; es importante mencionar que las moléculas de señalización son usualmente más pequeñas que los quimiorreceptores. La secuencia de intercambio de información entre células vecinas se resume a tres pasos: recepción, transducción y respuesta. La recepción es el proceso mediante el cual un ligando entra en contacto con el receptor. Por otro lado, la transducción se refiere a la transformación de un tipo de señal o energía en otra de distinta naturaleza, es decir, la célula convierte determinada señal o estímulo exterior en una respuesta específica. Este es el momento en el que el receptor puede cambiar de forma y modificar la conformación de las moléculas, lo que da lugar a lo que se le conoce como

camino de señales de transducción, que comúnmente sirve para amplificar una señal inicial. Finalmente existen distintas respuestas que pueden ocasionarse debido a la amplificación de la señal recibida, la porción de ADN presente en el núcleo puede transcribirse, por ejemplo.

Existen células que tiene contacto directo una con la otra, en este caso hay uniones entre ellas, pequeñas conexiones que funcionan como medio de transporte para iones o proteínas. A su vez, cuando las células no están unidas hay diferentes tipos de interconexión entre ellas; en la señalización paracrina se secreta un ligando que induce cambios en las células cercanas, se altera el comportamiento o la diferenciación celular en los receptores y su efecto depende del gradiente de concentración. Lateralmente, el intercambio de mensajes sinápticos involucra neurotransmisores, lo que permite la dispersión de impulsos eléctricos entre neuronas y por ende el funcionamiento del sistema nervioso, todo a través de las espinas dendríticas; estos receptores son selectivos, actúan como un

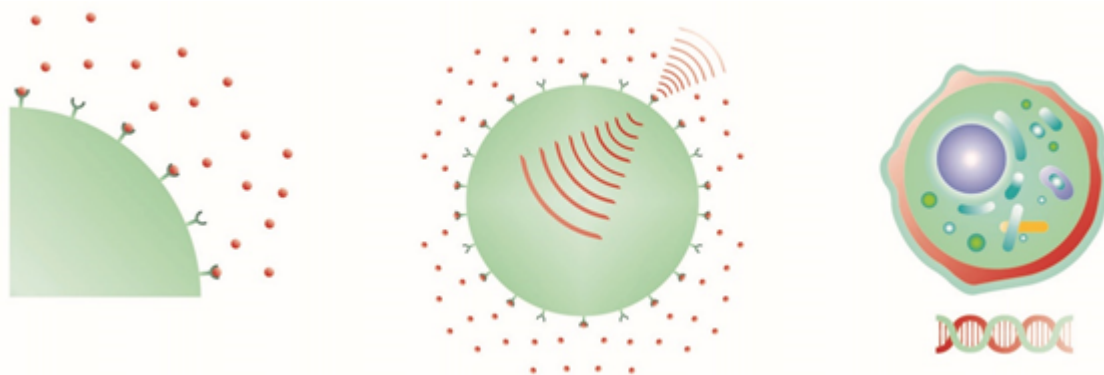


Figura 1: Secuencia de intercambio de información intercelular. Se representa la interacción receptor-ligando, la transducción (amplificación de señales moleculares) y una respuesta fisiológica específica, la transcripción de ADN en el núcleo celular.

filtro para ciertas moléculas e incluso poseen organelos que son capaces de cambiar la densidad proteica como respuesta a la alteración de la frecuencia de información recibida, de esta forma mantienen una actividad neuronal constante (Shah, M. M., 2014). Por último, la señalización endocrina produce sustancias especiales que son liberadas en el torrente sanguíneo, viajan por este medio hasta alcanzar su objetivo, tales sustancias son conocidas como hormonas. En síntesis, las moléculas de señalización pueden generar procesos dentro y fuera de las células, con respuestas locales o globales.

Para reducir el alcance de las componentes moleculares que se consideran en este artículo, nos concentramos en el estudio de los receptores de membrana, parte fundamental del primer paso de transmisión de información intercelular. Estos receptores son extremadamente importantes debido a las características que aportan a las células; los quimiorreceptores son capaces de modificar el comportamiento fisiológico a través de su interacción con el medio en el que se encuentra, sin mencionar que los receptores y ligandos son los candidatos perfectos para su manipulación; se puede alterar la estructura del receptor-ligando para lograr una asociación o disociación de la constante de corriente de difusión y, como consecuencia, de las capacidades de señalización celular (Lauffenburger & Linderman, 1993). Si se quiere comprender cuantitativamente los efectos observados en sistemas complejos, en donde la conducta queda sintetizada en parámetros exactos medibles, como la concentración o corriente de difusión, es necesaria la introducción de un modelo matemático. Las ecuaciones de difusión son capaces de modelar el fenómeno de la comunicación intercelular, además de dar información sobre la

estructura de la naturaleza microscópica y de la geometría de los receptores de membrana. En las siguientes secciones de este artículo se hablará sobre los diferentes modelos de quimiorrecepción y la extrapolación de los resultados obtenidos por Dudko, Berezhkovskii y Weiss para la comparación entre la difusión de moléculas de señalización hacia quimiorreceptores elípticos y quimiorreceptores circulares, ambos parcialmente absorbentes sobre una célula con membrana esférica.

La Descripción Macroscópica del Movimiento Molecular

Generalmente, es difícil lograr una simplificación en los sistemas biológicos, pues la interconexión de las componentes que forman su organización es muy compleja, debido a eso, los modelos matemáticos son considerados la vía de la estructuración de hipótesis, ya que permiten el reconocimiento completo de las variables y parámetros requeridos para el entendimiento de fenómenos naturales. La difusión es de gran ayuda para el análisis cuantitativo del movimiento aleatorio de partículas inmersas en un fluido, el movimiento browniano (Braun E., 1995), además de ser capaz de guiarnos cualitativamente en la comprensión de los efectos observados microscópicamente a través de un estudio macroscópico.

La *difusión* es la migración aleatoria de moléculas o partículas pequeñas como consecuencia del movimiento causado por la energía térmica y choques al azar con las moléculas vecinas del medio en el que se encuentra, generalmente un medio acuoso. Las ecuaciones de Fick modelan este fenómeno de transporte de materia analíticamente, fueron propuestas por el científico alemán Adolf Fick en 1855 para

explicar este comportamiento, tiempo después fueron reconocidas como las leyes que gobiernan el transporte de materia, estas dos relaciones matemáticas se escriben a continuación

$$\vec{J} = -D\nabla C(\vec{r}, t), \quad (1)$$

$$\frac{\partial C(\vec{r}, t)}{\partial t} = D\nabla^2 C(\vec{r}, t). \quad (2)$$

En donde $\vec{J}$ es el flujo de partículas por unidad de área por unidad de tiempo, D el coeficiente de difusión, que en este artículo se supondrá constante, y $C(\vec{r}, t)$ la concentración de sustancia difundida que depende del tiempo y de la posición. La primera ecuación dice que el flujo de partículas sumergidas en un medio acuoso tiene una dirección preferencial, va desde una región de alta concentración a las regiones de baja concentración, además, si las partículas están uniformemente distribuidas la variación de concentración en el espacio es nula, su derivada espacial es cero, y por transitividad el flujo de partículas también lo será; cuando esto sucede se dice que el sistema está en equilibrio. Por otro lado, analizando la segunda ecuación, se puede ver que si la pendiente de descripción es constante entonces la concentración es estacionaria, lo que se traduce físicamente en que entran tantas partículas en lugares de baja concentración como salen de un espacio de alta concentración. Resolver las ecuaciones de difusión significa conocer las fluctuaciones de densidad de sustancia en el tiempo y en el espacio, lo que permite caracterizar al sistema e incluso hacer predicciones de su comportamiento a tiempos posteriores, algo que resulta sumamente útil cuando se tienen condiciones a la frontera especiales que simulan los sistemas biológicos microscópicos. Sin embargo, este proceso no resulta siempre sencillo, princi-

palmente por dos factores, el acoplamiento espacial-temporal y las condiciones a la frontera. Aunque si dentro del sistema en donde ocurre la difusión existe el mismo número de fuentes y sumideros la distribución de moléculas en el espacio no será uniforme, en vez de esto se aproximará a un estado estacionario (lo que se asemeja bastante a nuestros intereses biológicos), en donde las variables que definen su comportamiento permanecen invariantes respecto al tiempo t , en el límite de esta aproximación se tendrá que

$$\frac{\partial C(\vec{r}, t)}{\partial t} \rightarrow 0.$$

Esta consideración reduce a la ecuación (2) a la ecuación de Laplace, a saber

$$\nabla^2 C(\vec{r}, t) = 0. \quad (3)$$

La simplificación representa una gran ventaja, pues la ecuación de Laplace ha sido profundamente estudiada en la rama de electromagnetismo, en particular en la electrostática. A continuación, se hablará de los elementos del modelo esférico celular con quimiorreceptores en la superficie y el uso de la ecuación (3) en la descripción de la constante de corriente de difusión.

Elementos Matemáticos para el Modelo de Receptores de Membrana El transporte de moléculas de señalización es efectuado principalmente por difusión, el movimiento está limitado por la viscosidad, no por la inercia de las partículas. La energía térmica es suficiente para perturbar el movimiento de la partícula en cuestión. En esta sección se hablará de los modelos matemáticos que conducen a la descripción de la recepción de ligandos en una célula. Consideremos una esfera absorbente de radio a , que bien puede modelar a una micela o proteína

esférica, inmersa en un medio difusivo infinito y con algunas condiciones especiales, tal que cuando los ligandos entran en contacto con su superficie son absorbidos completamente y por lo tanto quedan fuera del conjunto inicial de concentración en el medio. La condición a la frontera de paredes absorbentes queda bien definida si se exige que en $r = a$ la concentración sea cero (i.e. $C(a) = 0$). Es conveniente trabajar con coordenadas esféricas, de esta manera que el laplaciano de la concentración, despreciando variaciones en las direcciones angulares, es

$$\frac{1}{r^2} \frac{d}{dr} \left(r^2 \frac{dC}{dr} \right) = 0. \quad (4)$$

La solución para $C(\vec{r})$ que cumple con las condiciones a la frontera está dada por

$$C(\vec{r}) = C_\infty \left(1 - \frac{a}{r} \right). \quad (5)$$

C_∞ es la concentración para puntos lejanos a la célula. Mediante esta cantidad es posible encontrar la expresión matemática para el flujo y la corriente de difusión, que se relacionan a través de $I = \vec{A} \cdot \vec{J}$, siendo A el área transversal asociada a la esfera. La corriente resulta

$$I_{AE} = 4\pi DC_\infty a. \quad (6)$$

La corriente es proporcional no al área de la esfera, sino a su radio. A medida que a incrementa el área superficial crece como a^2 pero el gradiente de concentración decrece como $1/a$. Este resultado es simple pero fundamental para el desarrollo de la teoría.

Por otra parte, es preciso mencionar el estudio de la difusión hacia un disco absorbente que descansa sobre un plano reflejante.

La difusión hacia un disco absorbente

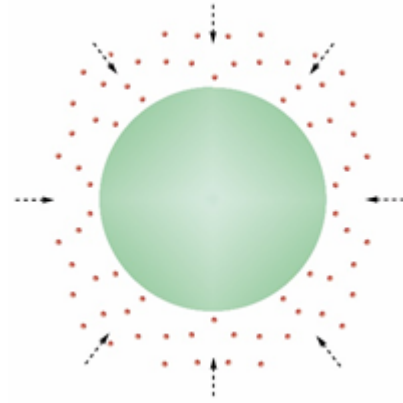


Figura 2: Absorbente esférico de radio a en un medio infinito que inicialmente contiene una concentración C_∞ , la cual logra mantenerse constante muy lejos de la superficie. Las flechas indican la dirección del flujo mientras que las moléculas de señalización se muestran en color rojo.

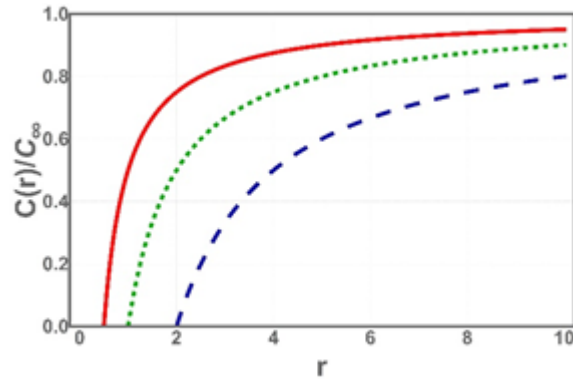


Figura 3: Distribución de concentración hacia un absorbente esférico perfecto de radio a . En rojo $a = 0.5$, en verde $a = 1$ y en azul $a = 2$.

es un modelo que permite ampliar los resultados obtenidos por Berg y Purcell (BP) a otras geometrías de interés en el estado estacionario con estas mismas propiedades, como la difusión a través de una pared que separa dos medios semi-infinitos, un absorbente elíptico o la difusión a través de N discos absorbentes en una superficie esférica, de ahí su gran importancia en los distintos sistemas solubles con las ecuaciones de Fick independientes del tiempo. Se considera una superficie absorbente en forma de disco de radio s en un medio semi-infinito. Al igual que en el modelo de célula esférica, cada partícula que entra en contacto con la superficie se extrae del conjunto inicial de moléculas. Se supone que la coordenada cilíndrica está sobre la superficie absorbente; el eje central pasa perpendicularmente a través del área de interés. Sea r la distancia radial medida desde el eje central y z la dirección axial en el plano, tal como se muestra en la siguiente figura.

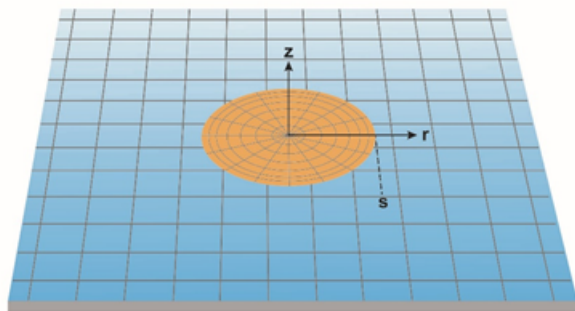


Figura 4: Representación de un disco absorbente, en amarillo, de radio s en el plano frontera de un medio semi-infinito, que se pinta en azul. Las líneas de flujo van en dirección $-\hat{z}$.

El proceso para obtener la expresión analítica de la concentración en este caso

no es simple, pero la estructura de la corriente de difusión resulta serlo,

$$I_{DW} = 4sC_{\infty}D. \quad (7)$$

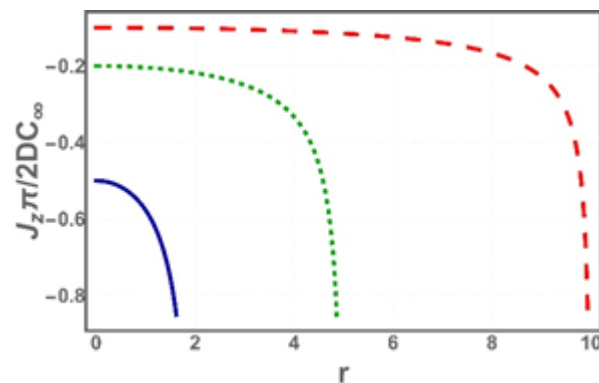


Figura 5: Líneas de flujo J_z en función de la distancia radial r para distintos valores de s . En azul $s = 2$, en verde $s = 5$ y en rojo $s = 10$.

El parámetro que indica la capacidad de absorción en una célula está contenido en la forma en la que se escribe la corriente de difusión y es llamada la constante de corriente de difusión, es decir, la parte de las ecuaciones (6) y (7) que es independiente de la concentración constante a grandes distancias, C_{∞} . Es así como se obtiene la constante de Smoluchowski

$$k_S = 4\pi Da, \quad (8)$$

y la constante de Hill

$$k_H = 4Ds, \quad (9)$$

respectivamente. Estos valores característicos serán útiles en las siguientes secciones para la deducción de resultados y comparación de efectividad de nutrición en diferentes geometrías de quimiorreceptores, pues indican el número de ligandos difundidos por unidad de tiempo a través

de la superficie absorbente. El modelo de la célula esférica es una combinación del absorbente esférico perfecto y el disco de Weber, que son los elementos para la creación de los modelos celulares.

Modelo de Célula Esférica, Efecto de Interferencia y Selectividad de Ligandos.

La ecuación del estado estacionario es análoga a la ecuación para el potencial electrostático en un espacio libre de carga (Berg, H. C. & Purcell, E. M., 1977), esto implica que la corriente de difusión puede escribirse como

$$I = 4\pi DcC_{\infty}. \quad (10)$$

Siendo c la capacitancia eléctrica de un conductor aislado con la misma forma y tamaño que el absorbente. La concentración C_{∞} es análoga al potencial V en los sistemas eléctricos, en los cuales se obedece la ley de ohm; esta ley establece que la corriente en un resistor es igual a la caída de potencial entre las terminales dividida por la resistencia. Entonces, si se quiere conocer la corriente de difusión en un absorbente puede calcularse la capacitancia del sistema eléctrico e introducirla en (10), siempre y cuando el absorbente de interés cumpla geométricamente con las características de superficie equipotencial. Al resolver el problema de N discos absorbentes en una superficie esférica, que simula a una célula, se utiliza el análogo eléctrico en una forma alternativa: Se supone una esfera de radio a inmersa en un fluido que contiene partículas brownianas, cuya concentración no cambia en el tiempo, de tal forma, que los quimiorreceptores pueden considerarse como unidades absorbentes sobre la superficie esférica. Cada uno de estos parches es

circular y de radio s , inmersa en un fluido que contiene partículas brownianas, cuya concentración no cambia en el tiempo, de tal forma, que los quimiorreceptores pueden considerarse como unidades absorbentes sobre la superficie esférica. Cada uno de estos parches es circular y de radio N veces el área de un solo parche, $N\pi s^2$, mientras que el área de la célula es $4\pi a^2$. La fracción cubierta por los receptores está determinada por la relación que sigue

$$\sigma = \frac{Ns^2}{4a^2}.$$

Las características de los receptores fueron ya presentadas, en cambio la superficie esférica a la cual los receptores están añadidos es ahora impermeable y por lo tanto el flujo en cualquier punto de ella es cero. Se busca la corriente de difusión del sistema considerando que la concentración a grandes distancias es constante e igual a C_{∞} . En el caso extremo, cuando $N = 1$, teniendo en cuenta que $s \ll a$, se puede pensar que el comportamiento de la corriente es el mismo que cuando se tiene un disco absorbente en un plano que delimita un medio semi-infinito, lo cual corresponde al disco de Weber. Con receptores lo suficientemente separados se dice que la corriente resultante será proporcional a N , esto da lugar al caso extremo contrario, teniendo un número de parches tan grande que prácticamente toda la esfera está cubierta de ellos y es en su totalidad absorbente. Este escenario representa el máximo en la corriente y se recupera el resultado de la ecuación (6), la constante de Smoluchowski.

Si la densidad de receptores en la superficie es baja entonces el problema de las partículas en difusión es aditivo y se reduce a la descripción de los puntos intermedios, esto permite que la corriente se pueda

escribir como

$$I_{AE} = Nk_H C(a). \quad (11)$$

Usando la primera ecuación de Fick se tiene que

$$\frac{\partial C(r)}{\partial r} 4D\pi r = Nk_H C(a).$$

Integrando en el espacio en donde la concentración no es nula y haciendo el límite cuando $r \rightarrow \infty$ se construye una expresión analítica para la concentración en la superficie, esto es

$$C(a) = \frac{C_\infty}{1 + \frac{Nk_H}{4\pi Da}}. \quad (12)$$

Hay dos límites en para la concentración sobre la membrana celular; cuando $\frac{Nk_H}{4\pi Da} \gg 1$ se recupera la condición del absorbente esférico perfecto $C(a) \rightarrow 0$. El siguiente límite es cuando $\frac{Nk_H}{4\pi Da} \ll 1$ entonces $C(a) = C_\infty$. La capacidad de absorción se vuelve tan baja que la concentración de moléculas es uniforme. Se concluye que la capacidad de recepción de ligandos no se ve afectada al añadir una distribución de receptores circulares en la superficie.

Al sustituir la ecuación (12) en la propuesta (11) y dividir entre la concentración C_∞ , el resultado para la constante de corriente de difusión es

$$k_{AE} = K_S \frac{N_S}{N_S + a\pi}. \quad (13)$$

Este resultado fue presentado por BP en 1977 como una representación de la absorción de nutrientes en una micela o proteína esférica, una estructura de agrupación molecular que une un conjunto que partículas. Probablemente, una de las condiciones más importantes bajo la

cual la igualdad representada en (13) es válida es la escala de separación entre parches absorbentes vecinos, ya que si es lo suficientemente grande se puede despreciar el efecto de sumideros entre receptores (i.e. para un número de parches grande los quimiorreceptores comienzan a interferir entre sí, comportándose uno como sumidero en la vecindad del otro.). Sin embargo, las simulaciones de dinámica browniana muestran inconsistencias conforme el número de receptores aumenta y el área ocupada por los parches circulares sobre la esfera se vuelve más grande. Cuando un cuarto de la membrana es cubierto por receptores los resultados de la simulación son 5 % más grandes que la predicción en el modelo de BP (Zwanzig, R., 1990). Es necesaria la inclusión del efecto de interferencia y permeabilidad en los receptores. La modificación de Zwanzig para incluir los sumideros consiste en un factor extra en un término del denominador de k_{AE} que considera el espacio no ocupado por los receptores $(1 - \sigma)$. Esta modificación altera el cálculo de la constante de corriente de difusión, que se escribe ahora como sigue

$$k_z = k_S \frac{N_S}{N_S + \pi a(1 - \sigma)}. \quad (14)$$

El resultado anterior se puede generalizar considerando que los receptores no son totalmente absorbentes, sino que en ellos mismos hay un proceso de selectividad, en otras palabras, se tienen parches parcialmente absorbentes. Las condiciones a la frontera se ven modificadas por una constante de permeabilidad en donde se guarda la información de aceptación y rechazo de las moléculas de señalización, los cambios son evidentes en las ecuaciones para el flujo de difusión

$$D \frac{\partial C}{\partial \vec{r}} = kC.$$

En la nueva condición se puede ver que si $k \rightarrow \infty$ los receptores son perfectamente absorbentes, mientras que para una constante k que es finita se logra la propiedad de filtración de partículas a través de los parches, finalmente cuando $k \rightarrow 0$ la superficie es completamente reflejante. Mediante la aproximación de medio efectivo, Zwanzig y Szabo deducen la forma analítica de la constante de corriente de difusión cuando están presentes tanto la interferencia como la selectividad, esta relación se escribe a continuación

$$\frac{1}{k_{zs}} = \frac{1}{k_S} + \frac{(1 - \sigma)}{N k_H} + \frac{1}{N k \pi s^2}. \quad (15)$$

Cabe recalcar que en los resultados anteriores se supone que los receptores o parches absorbentes son siempre de forma circular, esta suposición puede alejar al modelo de la realidad, es por esa razón que una formulación teórica de receptores no circulares es necesaria, en la siguiente sección se habla de la generalización de la constante de corriente de difusión para receptores de cualquier forma que descansan sobre un plano reflejante.

Quimiorreceptores de Diferentes Geometrías

Para alcanzar la generalización de la ecuación (15) a receptores de geometría arbitraria es necesario modificar la expresión para la constante k_H y el área πs^2 , por sus correspondientes menos particulares. Uno de los sistemas que surge como expansión natural de los receptores circulares son los receptores elípticos de semieje mayor a_1 y semieje menor a_2 , ya que en el caso en que $a_1 = a_2$ se recupera la simetría circular (ver figura 6).

Durante la investigación se replicaron los

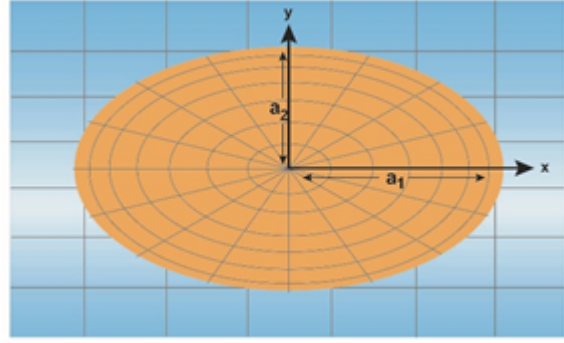


Figura 6: Quimiorreceptor elíptico con semieje mayor a_1 , semieje menor a_2 y excentricidad ϵ en una superficie reflejante.

resultados de Dudko, Berezhkovskii y Weiss mediante la comparación dimensional de la constante de corriente de difusión para receptores de geometría elíptica, una de ellas obtenida mediante el cálculo de la capacitancia en el análogo eléctrico y otra resultante de una propuesta puramente geométrica. Por el método del cálculo de la capacitancia del sistema se consigue escribir la constante de corriente como

$$k_\epsilon = \frac{2\pi D a_1}{k_{ei}(\epsilon)}. \quad (16)$$

Con

$$k_{ei}(\epsilon) = \int_0^{\pi/2} \frac{d\theta}{\sqrt{1 - \epsilon^2 \sin^2 \theta}}. \quad (17)$$

Bajo la aproximación de valores pequeños para la excentricidad ϵ se obtuvo que

$$k_\epsilon = 4D a_1 \left[1 - \frac{\epsilon^2}{4} - \frac{5\epsilon^4}{64} + O(\epsilon^5) \right]. \quad (18)$$

Por otro lado, la propuesta geométrica en la constante corriente, resultante del análisis de las unidades del coeficiente de difusión, la concentración y la propia corriente es

$$k_G = \frac{2^{1+2v}}{\pi^{1-v}} A^v P^{1-2v} D. \quad (19)$$

En donde v es un parámetro por determinar, A es el área del receptor y P su perímetro. El factor numérico es obtenido al requerir que (19) se reduzca correctamente a la constante de Hill si se trata de un receptor circular. Se supone una elipse cuya área y perímetro quedan determinados por

$$A_\epsilon = \pi a_1^2 \sqrt{1 - \epsilon^2}, \text{ y}$$

$$P_\epsilon = 4a_1 \int_0^{\pi/2} \sqrt{1 - \epsilon^2 \sin^2 \theta} d\theta,$$

respectivamente. Introduciendo las últimas cantidades en la ecuación (19) y aproximando para valores pequeños de la excentricidad se tiene que

$$k_\epsilon^{approx} = 4a_1 D \left[1 - \frac{\epsilon^2}{4} - \frac{3}{64} (1 + 2v) \epsilon^4 + O(\epsilon^5) \right] \quad (20)$$

Mediante una comparación directa de las ecuaciones (18) y (20) se infiere que $v = 5$ y por lo tanto la ecuación (19) toma la siguiente forma

$$k_G = \left(\frac{2^5 A P}{\pi^2} \right)^{1/3} D. \quad (21)$$

La importancia de la ecuación (21) es que se puede utilizar en cualquier tipo de receptor sobre cualquier tipo de superficie reflejante y equipotencial. La expresión general para la constante de corriente de difusión en N parches parcialmente absorbentes de forma arbitraria en una superficie con condiciones a la frontera de reflexión, en la cual se considera el efecto de interferencia entre receptores vecinos, queda completamente determinada por la siguiente expresión (Dudko, O.k., Berezhkovskii, A. M. & Weiss, G. H., 2004)

$$\frac{1}{k_D} = \frac{1}{k_R} + \frac{(1 - \sigma)}{N k_G} + \frac{1}{N k A_R}, \quad (22)$$

donde k_R es la constante de corriente de difusión de la superficie en donde descansan los parches cuando esta se considera completamente absorbente, mientras que k_G es la asociada a la geometría de los receptores sobre la membrana reflejante; σ es la cantidad de área ocupada por los parches y A_R el área de estos últimos, finalmente la constante de permeabilidad k es la responsable de la selectividad en los quimiorreceptores, contiene la información de selección de partículas que pasan a través de las paredes de la membrana. La derivación de esta ecuación permite calcular k_D de forma rápida y eficiente si se conocen las cantidades requeridas, que a su vez no resultan difíciles de calcular, al menos en el caso de k_G , siempre y cuando se tengan en cuentas las consideraciones en su deducción. Se puede calcular incluso la corriente si se tiene conocimiento del comportamiento de la sustancia en difusión a distancias grandes de la célula. En el caso de tener una combinación de parches con características distintas sobre la membrana, digamos perfectamente absorbentes y selectivos entonces la ecuación correcta es

$$\frac{1}{k_{DC}} = \frac{1}{k_R} + \frac{(1 - \sigma)}{N_1 k_G} + \frac{1}{N_2 k A_R}. \quad (23)$$

Siendo N_1 el número de receptores totalmente absorbentes y N_2 el número de parches con un grado de permeabilidad asociado. Si el número de parches con filtro es nulo entonces el último término de la ecuación (23) no tiene lugar y regresamos a la formulación de Zwanzig escrita en (14). Con esto es posible hacer un estudio de lo que sucede en una célula esférica que contiene receptores circulares, elípticos o de

cualquier geometría.

Receptores Elípticos en una Célula con Membrana Esférica

Regresemos al modelo de la célula esférica propuesto por BP, en específico a la ecuación (13). Se puede ver que la constante de corriente de difusión asociada a la esfera con quimiorreceptores en la superficie es menor a la constante de Smoluchowski por un factor de $1 + \pi a/Ns$. Además, dicha corriente de difusión alcanza su valor máximo cuando $N = \pi a/s$, un número de receptores sorprendentemente pequeño relativo al tamaño de la célula completa. Teniendo en mente que una célula es 5000 veces más grande que los quimiorreceptores o las moléculas de transporte, (Berg, H C., 1983) se puede tener una aproximación del número de parches necesarios con la capacidad de absorber la mitad de las moléculas de señalización que una célula con membrana perfectamente absorbente recibiría. En otras palabras, podemos comparar directamente la efectividad de absorción de partículas en dos escenarios distintos; uno en donde se tienen receptores circulares uniformemente distribuidos sobre la superficie y otro en donde una esfera cuenta con un hemisferio completamente absorbente y otro perfectamente reflejante.

Calculando a través del máximo se obtiene que el número de receptores que iguala al hemisferio absorbente es $N_{max} = 15700$, una parte pequeña de la superficie de la esfera completa. Esta cantidad representa una fracción de $1/6250$, es decir, el número de receptores requeridos para alcanzar $k_S/2$ es mínimo, debido a esto es posible implementar miles de tipos de quimiorreceptores o parches selectivos, todos con diferentes características e independientes uno del

otro, lo que se asemeja a o que es una célula real (Galanti et al, 2018). Además de esto, se permite una distribución uniforme de receptores lo que hace que se pueda despreciar, para efectos prácticos, el efecto de interferencia introducido por Zwanzig. Si queremos considerar quimiorreceptores permeables en una célula esférica de radio a la ecuación (22) es ahora

$$\frac{1}{k_{PD}} = \frac{1}{k_S} + \frac{1}{Nk_G}. \quad (24)$$

Para receptores circulares, usando la constante de Hill se obtiene que

$$k_c = k_S \frac{1}{1 + \frac{\pi a}{Nk_S}}. \quad (25)$$

A medida que k disminuye la capacidad de absorción en la célula también lo hace, los receptores se hacen menos eficientes y entonces el número de parches necesario para absorber la misma cantidad de proteínas aumenta. El valor de N que hace que se alcance la mitad de k_S en esta geometría está dado por

$$N_{max:c} = \frac{\pi a}{k_S}. \quad (26)$$

Para poder visualizar el número de receptores que contiene una célula con estas características definimos los valores estándar en la literatura, (Berg, H. C. & Purcell, E. M., 1977) $a = 5\mu m$, $s = 10\text{\AA}$ y una permeabilidad del 50 %, es decir $k = 0.5$. Con esto el número de receptores es $N_{max:c} \approx 31416$. Naturalmente se necesitan más receptores que cuando se consideraba $k \rightarrow \infty$.

A continuación, se presenta una gráfica del comportamiento del número de receptores en función de la constante de

permeabilidad o selección.

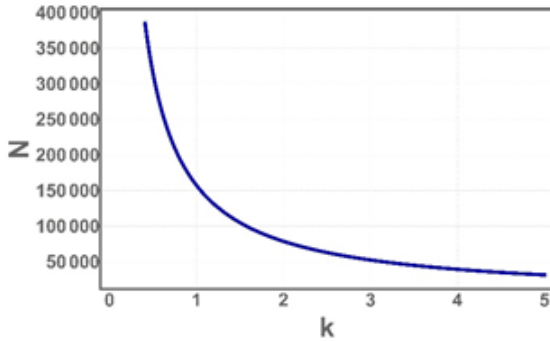


Figura 7: Número de receptores circulares de radio s necesarios para alcanzar $k_S/2$ en función de la constante de permeabilidad k .

Usando la ecuación (18) y (24) se encuentra la constante de corriente para receptores elípticos de semieje mayor a_1 , semieje menor a_2 ($a_2 = s$) y excentricidad ϵ , a saber

$$k_{er} = k_S \frac{1}{1 + \frac{\pi a \sqrt{1 - \epsilon^2}}{N k a_2 \left[1 - \frac{\epsilon^2}{4} - \frac{5\epsilon^4}{64} \right]}}. \quad (27)$$

El valor máximo para N es

$$N_{max:\epsilon} = \frac{\pi a \sqrt{1 - \epsilon^2}}{k a_2 \left[1 - \frac{\epsilon^2}{4} - \frac{5\epsilon^4}{64} \right]}. \quad (28)$$

Mientras la excentricidad crece el número de receptores disminuye, aunque es importante tener en cuenta que la excentricidad debe ser un número pequeño, ya que la constante k_ϵ se encuentra suponiendo que ϵ tiende a cero. Con los valores establecidos como estándar para la escala celular y $\epsilon = 0.1$, la aproximación da como resultado $N_{max:\epsilon} \approx 31337$. La dependencia de $N_{max:\epsilon}$ en función de la excentricidad se puede ver

gráficamente en la siguiente figura.

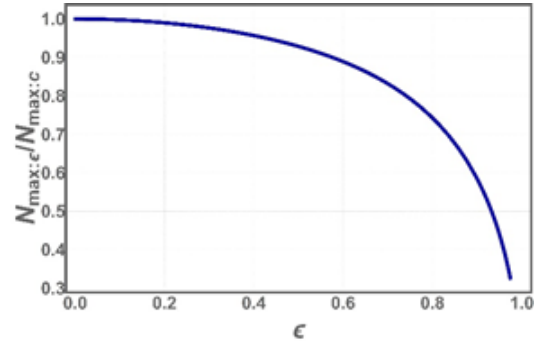


Figura 8: Número de receptores elípticos con semieje mayor a_1 , semieje menor a_2 y permeabilidad $k = 0.5$ en función de la excentricidad ϵ , dividido entre el número de receptores necesarios para cuando se trata con parches circulares.

Para una mejor apreciación de este resultado se calculó el área superficial ocupada por los receptores elípticos haciendo una expansión a cuarto orden del área absorbente, que en términos del número de receptores en los dos sistemas y σ es

$$\zeta = \frac{N_{max:\epsilon}}{N_{max:c}} \left(1 + \frac{\epsilon^2}{2} + \frac{3\epsilon^4}{8} \right) \sigma. \quad (29)$$

Naturalmente, se necesitará más espacio en la membrana celular si se utilizan receptores elípticos con la condición de que $a_2 = s$, pero ¿cuánto, exactamente? Con los resultados obtenidos anteriormente se puede ver que se necesitan alrededor de 80 receptores menos que si se utilizan receptores circulares. Comparando la superficie ocupada σ con ζ y haciendo que el semieje menor de la elipse coincida con el radio del parche circular (lo que reduce y restringe la deformación de la elipse) se encuentra que $\frac{\sigma N_{max:c}}{\zeta N_{max:\epsilon}} = 0.997487$. Este número nos dice que los receptores elípticos ocupan solo

Excentricidad ϵ	$N_{max:c} - N_{max:\epsilon}$	$(1 - \frac{\sigma}{\zeta})$
0.1	80	1/400
0.2	320	1/100
0.3	738	1/50
0.4	1361	1/25

Tabla 1: Contraste de los parámetros en los sistemas circular y elíptico en función de la excentricidad. Se muestra la excentricidad, la diferencia en número de receptores sobre la superficie, $N_{max:c} - N_{max:\epsilon}$, y la fracción de área adicional a la que cubren los parches circulares sobre la membrana celular.

0.25 % más espacio que los parches circulares, una cantidad mínima si se piensa que el sistema circular ocupa aproximadamente 1/30000 de la membrana celular en esta configuración permeable.

Una distribución de quimiorreceptores es tan buena como el absorbente esférico perfecto. Se puede decir entonces que lo óptimo es que una célula tenga quimiorreceptores elípticos; a través de esta geometría la célula puede absorber las moléculas de señalización presentes en el medio de difusión sin la necesidad de un gran número de parches, esto permite que se puedan tener receptores de diferentes tipos y con diferentes propósitos. Contar con una efectividad óptima de absorción en la membrana celular se traduce en señalización e intercomunicación continua entre células con diferentes mecanismos de recepción de ligandos, locales o de largo alcance. Es necesario reconocer la importancia de la recepción de partículas y como es que la capacidad de absorción de una célula está directamente relacionada con el buen funcionamiento de los procesos biológicos, desde el metabolismo hasta las redes neuronales.

Conclusiones

En el artículo se presentó uno de los problemas de encuentros biomoleculares más importantes en la biología y fisicoquímica, la admisión de moléculas de señalización en receptores de membrana. Dentro de la investigación se analizaron distintos modelos de quimiorrecepción, desde el sistema clásico de BP hasta la extrapolación de la generalización a receptores de forma arbitraria en donde se consideró el efecto de interferencia y selectividad. Este análisis conduce a conclusiones sorprendentes. La geometría más eficiente en los receptores de membrana resultó ser la geometría elíptica, en donde, debido a la gran disponibilidad de espacio, es posible despreciar el efecto de interferencia propuesto por Zwanzig. Además de la optimización, este tipo de parches permite la implementación de otros quimiorreceptores con distintos funcionamiento y propósitos, lo que se asemeja más a la naturaleza, con un costo en el espacio ocupado despreciable del orden de 8.33×10^{-6} . Sin mencionar que los receptores elípticos admiten la deformación de los canales mediante a variación de la excentricidad, lo que permitiría regresar a la anatomía clásica con parches absorbentes circulares o incluso modificarse a formas más complejas para adaptarse a la estructura de los ligandos. El entendimiento

de los detalles detrás del fenómeno de señalización es de gran interés para la comunidad científica y la geometría de los receptores tiene un papel fundamental en el proceso de adaptación espacial para la recepción nutrientes o el rechazo sustancias tóxicas en una célula. La descripción expuesta en este artículo sobre la estructura y geometría de los receptores de membrana brinda características importantes para la bioingeniería celular sobre la relación entre receptor-ligando y sus propiedades moleculares; a través de ellas, se pueden mejorar los modelos cuantitativos para la modificación parámetros que gobiernan la intercomunicación celular, una técnica que ofrece incontables aplicaciones en biotecnología, ya sea en el sector científico, industrial o farmacéutico, como lo es la creación de medicamentos que imitan, regulan o interfieren en la liberación de moléculas de señalización, por ejemplo. Será necesario comparar los resultados expuestos con las simulaciones de dinámica browniana para seguir descifrando propiedades de la estructura celular en la naturaleza, nuestra respuesta, receptores elípticos de membrana; la clave para una absorción efectiva.

Referencias

Berg, H. C. (1983). *Random Walks in Biology*. New jersey, USA: Princeton University Press.

Berg, H. C. & Purcell, E. M. (1977). Physics of chemoreception. *Biophysical Journal*, 20(2), 193-219. doi:10.1016/s0006-3495(77)85544-6

Berezhkovskii, A. M., Dagdug, L., Lizunov, V. A., Zimmerberg, J. & Bezrukov, S. M. (2012). Communication: Clusters of

absorbing disks on a reflection wall: Competition for diffusing particles. *The Journal of Chemical Physics*, 136(21), 211102. doi:10.1063/1.4726015

Dagdug, L., Vázquez, M.-V., Berezhkovskii, A. M., & Zitserman, V. Y. (2016). Boundary homogenization for a sphere with an absorbing cap of arbitrary size. *The Journal of Chemical Physics*, 145(21), 214101. doi:10.1063/1.4968598

Douglas A. Lauffenburger, Jennifer J. Linderman. (1993). *Receptors Models for Binding, Trafficking and Signaling*. New York, USA: Oxford University Press.

Dudko, O.k., Berezhkovskii, A. M. & Weiss, G. H. (2004). Rate constant for diffusion-influenced ligand binding to receptors of arbitrary shape on a cell surface. *The Journal of Chemical Physics*, 121(3), 1562-1565. doi:10.1063/1.1763137

Eliezer Braun. (1995). *Un Movimiento en Zigzag*. México, DF: Fondo de Cultura Económica

Galanti, Marta & Fanelli, Duccio & Traytak, Sergey & Piazza, Francesco. (2018). Diffusion to Capture and the Concept of Diffusive Interactions.

Northrup, S. H. (1988). Diffusion-controlled ligand binding to multiple competing cell-bound receptors. *The Journal of Physical Chemistry*, 92(20), 5847-5850. doi:10.1021/j100331a060

Reece, J. B., Urry, L. A., Cain, M. L., Wasserman, S. A., Minorsky, P. V. y Jackson, R. B. (2011). *Cell communication*. Campbell biology (210-231). San Francisco, CA: Pearson.

R. Phillips, J. Kondev, J. Theriot, H. G. Garcia. (2013). *Physical Biology of the Cell*. New York, USA: Garland Science, Taylor & Francis Group, LLC.

Shah, M. M. (2014). Dendrites. *Encyclopedia of the Neurological Sciences*, 970. doi:10.1016/b978-0-12-385157-4.00056-7

Shoup, D. & Szabo, A. (1982). Role of diffusion in ligand binding to macromolecules and cell-bound receptors. *Biophysical Journal*, 40(1), 33-39. doi:10.1016/s0006-3495(82)84455-x

Stephanie E. Bronson, Christine Konradi (2010) in *Handbook of Behavioral Neuroscience*.

Zwanzig, R. (1990). Diffusion-controlled ligand binding to spheres partially covered by receptors: an effective medium treatment. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. doi:10.1073/pnas.87.15.5856

Zwanzig, R. & Szabo, A. (1991). Time dependent rate diffusion-influenced ligand binding to receptors on cell surfaces. *Biophysical journal*, 60(3), 671-678. doi:10.1016/s0006-3495(91)82096-3



Importancia de los niveles adecuados de Vitamina D y la depresión en tiempos de pandemia por SARS-CoV-2

**Jennifer Román Santillán
Médica Cirujana y Partera
Escuela Superior de Medicina
Instituto Politécnico Nacional**

**D. en C. María de la Luz Sevilla González
Escuela Superior de Medicina
Instituto Politécnico Nacional**

Resumen

La depresión y el déficit de vitamina D, actualmente son problemas sanitarios que aquejan a la población mexicana. En los últimos años, las bajas concentraciones de vitamina D en sangre se han relacionado con un sin número de alteraciones corporales, que van desde enfermedades osteomusculares hasta neuroendocrinas, debido a su actuación de tipo endocrina y a la activación de receptores localizados en tejido neuronal, que explica la posible asociación con los síntomas depresivos de acuerdo con la evidencia científica. Durante el desarrollo de la pandemia por la COVID-19, la salud mental se ha visto alterada con el aumento de la prevalencia en depresión, que afecta a ambos sexos, a todos los grupos etarios y estratos sociales. Por ello, tanto el déficit de vitamina D como los síntomas depresivos se han vuelto blanco de estudio para múltiples grupos de investigación, que pretenden encontrar y obtener información que ayude a prevenir el desarrollo y/o a mejorar la sintomatología depresiva, con la participación de la vitamina D.

Palabras Clave

Vitamina D, depresión, COVID-19, salud mental.

Abstract

The depression and vitamin D deficit currently are health problems that affect Mexican population. The last years, the low levels of vitamin D in blood have been linked to several body alterations, ranging from musculoskeletal to neuroendocrine diseases, due to its endocrine-type action and the activation of receptors the located in neuronal tissue which explains the possible association with depressive symptoms according to scientific evidence. During the development of the COVID-19 pandemic,

mental health has been altered with the increase in the prevalence of depression, which affects both sexes, all age groups, and social strata. Therefore, both vitamin D deficiency and depressive symptoms have become the target of study for multiple research groups, which seek to find and obtain information that helps prevent the development and/or improve depressive symptoms, with the participation of the vitamin D.

Keywords

Vitamin D, depression, COVID-19, mental health.

Introducción

La salud mental de los mexicanos se ha comprometido de una forma importante en estos tiempos de pandemia, tenemos alrededor de 16 meses bajo una presión permanente de estrés ante la incertidumbre de cuando se controlará esta pandemia y cuando se retomará de manera más segura las actividades cotidianas. Por esto, la Organización Mundial de la Salud (OMS), hace un llamado urgente a cuidar la salud mental de toda la población (OMS, 2020).

En este artículo reconoceremos las extraordinarias propiedades de la vitamina D y la facilidad de adquirirla de forma gratuita y permanente, así como su asociación con la salud mental. Pero existen ciertos procedimientos para lograr una adecuada concentración en sangre de esta vitamina a través de dos mecanismos complementarios: una buena absorción solar y mediante una dieta establecida. Durante mucho tiempo la vitamina D fue considerada sólo como vitamina, sin embargo, en los últimos años diversos estudios de investigación han demostrado sus propiedades de hormona esteroidea al observar su participación en

múltiples funciones corporales, y su deficiencia en distintas enfermedades (Rendón, 2018).

Los beneficios de esta prohormona liposoluble se pueden obtener mediante dos fuentes: la primera y más importante es, la producción endógena por exposición de la piel a los rayos solares ultravioleta B (UBV, longitud de onda de 290 a 320 nm), para activar al compuesto 7-dehidrocolesterol a previtamina D3 y así alcanzar el 90 % de las concentraciones circulantes en sangre (Flores, y otros, 2011). La segunda fuente es a través del consumo de alimentos vegetales (ergocalciferol o vitamina D2) y/o animales (colecalfiferol) para obtener el 10 % restante (Tripkovic, y otros, 2012).

Cabe mencionar que una radiación solar prolongada de la piel genera inactivación de la vitamina D3, esto para evitar intoxicación por la misma en el organismo (Flores, y otros, 2011).

Formas De La Vitamina D

Por su estudio, conformación química y actividad, la vitamina D se divide en los siguientes metabolitos:

Vitamina D2 o Ergocalciferol

Forma inactiva, localizada en plantas y vegetales, así como en multivitamínicos. Su ingesta es por vía oral y se absorbe a nivel intestinal para después ser metabolizada en el hígado y los riñones, con la consecuente activación. Se emplea en la fortificación de alimentos (Holick, M, & Ph, 2007).

Vitamina D3 o Colecalciferol

Forma inactiva y natural que se encuentra en los seres humanos y animales (sardina, atún, salmón, por mencionar algunos), así como en algunos de sus derivados

(productos lácteos, huevo, etc.). Se produce por la radiación solar UVB sobre los precursores inactivos de la vitamina D (7-dehidrocolesterol y previtamina D3) contenidos en la piel, para después activarse a nivel hepático y renal (Holick, M, & Ph, 2007).

El colecalfiferol es la forma más adecuada de suplementación.

Calcidiol o 25-hidroxitamina D₃ (25-(OH)-D₃)

Es el principal metabolito circulante en sangre de la vitamina D₃ y el mejor biomarcador que cuantifica el estado nutricional de vitamina D en el organismo, ya que evidencia la ingesta dietaria y la síntesis cutánea (Zuluaga, Alfaro, Balthazar, Jiménez, & Campuzano, 2011).

Calcitriol o 1,25-hidroxitamina D2 (1,25-(OH)₂-D).

Es el metabolito activo de la vitamina D, se genera en el hígado y los riñones mediante un proceso bioquímico llamado hidroxilación. A nivel intestinal permite la absorción del calcio dietario.

El calcitriol es 1,000 veces más activo que la vitamina D2 y D3, por ello, al consumirlo en dosis elevadas **en forma de suplemento puede generar toxicidad en el organismo**, que se manifestara como hipercalcemia (alta concentración de calcio en sangre), hipercalcemia (exceso de calcio excreto en la orina) e hiperfosfatemia, es decir, elevada concentración de fósforo en la sangre (Holick, M, & Ph, 2007).

Su administración oral sólo está indicada en pacientes con ciertas alteraciones, como, en la Insuficiencia Hepática, enfermedad renal y/o en alteraciones de la

hormona paratiroidea (Holick, M, & Ph, 2007).

Múltiples Funciones Del Colecalciferol (1,25-OH₂-D)

La actividad de la vitamina D, se debe a sus propiedades autocrinas y paracrinas mediante la activación de sus receptores nucleares y membranales presentes en más de 36 tipos de células (Norman, 2008).

Esto evidencia que su acción no sólo se limita a la regulación mineral ósea del calcio y el fósforo, como se conocía en un inicio. Ya que se ha encontrado relación de ella a nivel celular en la actividad endotelial, la acción y secreción de la insulina, la regulación del ciclo celular y la apoptosis (propiedades antitumorales). También en el control del sistema-renina-angiotensina-aldosterona, en la regulación del sistema inmunológico (propiedades antiinflamatorias e inmunomoduladoras), así como en la actividad neuromuscular, del sistema nervioso central (SNC) y su actuación de mensajero químico a nivel genómico en cerca del 3% del genoma humano (Zuluaga, Alfaro, Balthazar, Jiménez, & Campuzano, 2011) (Holick, M, & Ph, 2007).

Sus efectos se observan en varios sistemas del organismo, es decir, en el sistema endocrino, músculo esquelético, gastrointestinal y hepático, así como en el sistema renal, cardiovascular, respiratorio, reproductor, inmune, nervioso central, entre otros (Tripkovic, y otros, 2012).

Específicamente a nivel neuronal, la vitamina D actúa de forma autocrina y paracrina (tipos de secreciones químicas que actúan sobre la misma célula que libero la sustancia y en células cercanas, respectivamente), mediante sus receptores VDR

(vitamin D receptor) y por acción del colecalciferol, ya que de acuerdo con diversos trabajos de investigación su participación es brindarle protección y estructura a las neuronas a través del funcionamiento de proteínas conocidas, como neurotrofinas de tipo 3 y 4, además de la producción del factor de crecimiento nervioso (NGF) por sus siglas en inglés y al regular la acción del factor neurotrófico derivado de las células gliales (GDNF). Además, la vitamina D impide la neurotoxicidad generada por glucocorticoides y ayuda en la síntesis de neurotransmisores, como la serotonina, noradrenalina y dopamina, moléculas implicadas en diversas funciones neuronales que incluyen las emociones (Zuluaga, Alfaro, Balthazar, Jiménez, & Campuzano, 2011).

Para que todas estas actividades corporales se lleven a cabo, se necesitan concentraciones séricas suficientes de vitamina D, es decir, de 25-(OH)-D₃, ya que es el metabolito circulante que indica la cantidad de vitamina D en el organismo. En la tabla 1 se muestran los puntos de corte en sangre.

Deficiencia De Vitamina D En México Y Patologías Asociadas

En México la deficiencia de vitamina D representa un problema de salud pública, esto a pesar de ser un país que posee gran cantidad de luz solar casi los 365 días del año, sin embargo, los últimos datos registrados sobre la carencia de esta prohormona en población mexicana son los siguientes:

En el 2006 la ENSANUT fue la institución encargada de evaluar las concentraciones séricas de vitamina D en niños, adolescentes

Tabla 1		
<i>Clasificación de acuerdo con la concentración sérica de 25-(OH)-D₃.</i>		
Categoría	ng/mL	nmol/L
Suficiencia	>30 ng/mL	75 o más nmol/L
Insuficiencia	20 a <30 ng/mL	50-75 nmol/L
Deficiencia moderada	8 y <20 ng/mL	20 y <50 nmol/L
Deficiencia severa	8 ng/mL	<20 nmol/L
Toxicidad	>150 ng/mL	

Nota: ng/mL (nanogramos/mililitros) y nmol/L (nanomol/litro). Información obtenida de (Holick, M, & Ph, 2007).

y adultos mexicanos. De este estudio se obtuvieron los siguientes resultados: uno de cada dos niños en edad preescolar puntuó con insuficiencia y/o deficiencia moderada de vitamina D. En adultos entre 20 y 60 años se detectó una prevalencia de insuficiencia y deficiencia moderada de 25-(OH)-D₃ en el 30.1 %. Y, por último, del total de los participantes el 39 % residía en la Ciudad de México (CDMX) (Flores, y otros, 2011).

Posteriormente en el año 2012 se reportaron datos de un trabajo realizado con mujeres adultas en edad reproductiva con un rango de edad entre los 20-49 años, y se detectó mayor porcentaje de insuficiencia de 25-(OH)-D₃ en el 86.6 % de las participantes (Fedirko, y otros, 2012).

El último estudio que se realizó fue durante el año 2017 y 2018, con adultos sanos de la CDMX entre los 20 y 40 años, y se detectó una prevalencia combinada de insuficiencia y deficiencia moderada en el 97.3 % de la población estudiada (Piña-Aguero, 2019).

Por todo lo anterior que demuestra una franca carencia de vitamina D, es crucial comprender la importancia que toma este déficit vitamínico en nuestro país, ya que muchos estudios sugieren una relación con

una gama de enfermedades, por ejemplo:

Las metabólicas (diabetes mellitus I y II, etc.), cardiovasculares (hipertensión arterial sistémica y aterosclerosis), osteomusculares (osteoporosis, sarcopenia, osteomalacia y raquitismo en niños, etc.), oncológicas (cáncer de mama, colon y próstata, entre otros), inmunes (infecciones, patologías autoinmunes y respiratorias) y neuronales, como la enfermedad de Alzheimer, la esquizofrenia, la disfunción neurocognitiva y la depresión, solo por mencionar algunas (Zuluaga, Alfaro, Balthazar, Jiménez, & Campuzano, 2011). En la figura 1, se muestran las alteraciones relacionadas con el déficit de vitamina D.

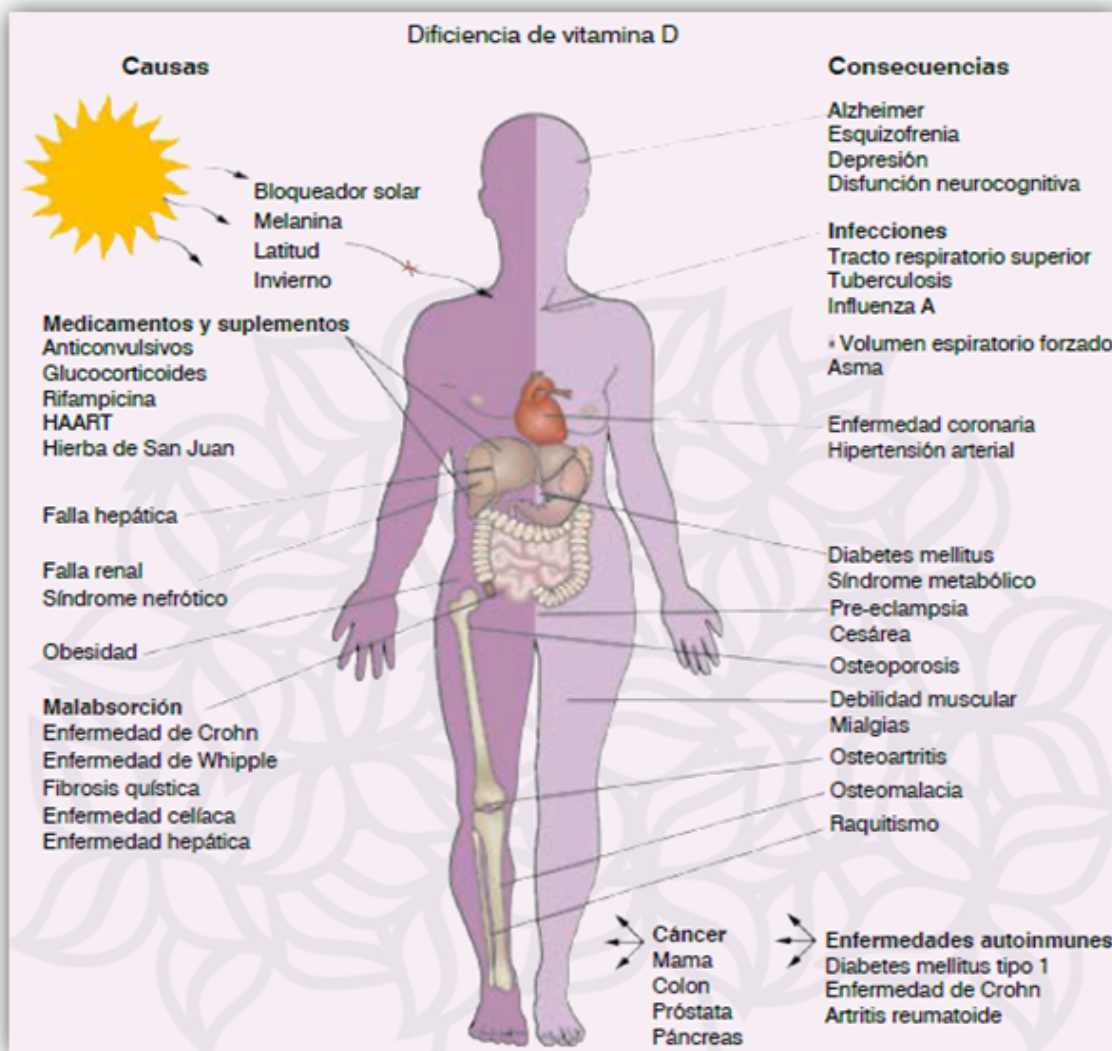
Desafortunadamente durante el año 2020 y la mitad de este 2021, la prevalencia de ciertas patologías ha aumentado como consecuencia directa o indirecta de la infección por SARS-CoV-2.

Confinamiento Y La Poca Exposición Solar

La síntesis cutánea de vitamina D puede verse afectada por diversos factores intrínsecos y ambientales. Durante el confinamiento la principal fuente de síntesis de vitamina D (exposición de la piel a la luz solar) se redujo considerablemente.

Figura 1.

La vitamina D, principales causas de deficiencia y sus posibles alteraciones en la salud.



Nota: HAART: terapia antirretroviral de gran actividad. Imagen y contenido de información tomada de (Zuluaga, Alfaro, Balthazar, Jiménez, & Campuzano, 2011).

A continuación, se mencionan algunos ejemplos que intervienen en la captación luminosa:

- El uso indiscriminado de protectores solares: intervienen y disminuyen la absorción de los rayos UVB (Zuluaga, Alfaro, Balthazar, Jiménez, & Campuzano, 2011)
- Color de piel: la pigmentación oscura puede disminuir considerablemente la síntesis fotoquímica de la vitamina D (Holick, M, & Ph, 2007).
- Tiempo real de exposición solar y porcentaje de piel expuesta.
- Trabajar o estudiar en espacios cerrados: el hogar, las fábricas, los hospitales, etc. (Werneke, Gaughran, & Taylor, 2021)
- Edad: a partir de los 70 años se reduce gradualmente la síntesis de vitamina D₃, aproximadamente en un 75 % (Zuluaga, Alfaro, Balthazar, Jiménez, & Campuzano, 2011).
- Estación y latitud geográfica: esto apunta a la cantidad de fotones UVB de los rayos solares que entran a la Tierra, pues mientras la dirección sea más oblicua, menor será el número de fotones incididos, que se relaciona con los meses invernales (Zuluaga, Alfaro, Balthazar, Jiménez, & Campuzano, 2011).
- Contaminación atmosférica.
- Obesidad: el carácter lipídico de la vitamina D, genera que esta puede ser secuestrada en el tejido adiposo y con ello reducir su disponibilidad (Zuluaga, Alfaro, Balthazar, Jiménez, & Campuzano, 2011).

Todo esto se conjunta con la baja ingesta dietaria de vitamina D en forma de vegetales o de productos animales y sus derivados, haciendo que los bajos niveles de 25-(OH)-D₃ sean más exacerbados.

La pandemia por SARS-CoV-2 y sus medidas de protección sanitaria, vino a generar y/o exacerbar un sinnúmero de alteraciones corporales, las principales de origen respiratorio, inmune y mentales (depresión y ansiedad, etc.). Estas últimas como parte de la incertidumbre acerca del curso de la enfermedad y por el encierro de gran parte de la población a fin de evitar la propagación de la infección. Pero también hubo consecuencias positivas, pues se generó mayor visibilidad e importancia de la salud mental, tanto en México como en otras partes del mundo, ya que esta situación sanitaria es conocida desde hace muchos años, pero sin tener la relevancia que posee hoy día.

Debido a todo esto, se han realizado diversos estudios alrededor del mundo que evalúan el desarrollo de síntomas depresivos o la exacerbación de estos, como consecuencia de la COVID-19 y el impacto de las bajas concentraciones de vitamina D debido al confinamiento.

Uno de esos estudios fue un metaanálisis realizado en Londres, y reporto que un gran número de estudios observacionales concluyen una asociación entre el déficit de vitamina D y la depresión, además que de acuerdo con resultados de laboratorio sugieren que la 25-(OH)-D₃ tiene actividad fisiológica en el desarrollo de los trastornos mentales graves (Werneke, Gaughran, & Taylor, 2021).

Recomendaciones De Obtención De Vitamina D

Como se ha mencionado a lo largo de esta redacción la obtención adecuada de vitamina D, depende básicamente de dos fuentes: la radiación solar y la dieta con sus indicaciones específicas. A continuación, se describen ambas formas:

Síntesis Cutánea Por Exposición Solar

Mediante esta estrategia se genera cerca del 90 % de la 25-(OH)-D₃, metabolito endógeno que se almacenara como depósito en la grasa corporal y será usada de acuerdo con las necesidades fisiológicas del cuerpo, sobre todo, cuando la exposición solar sea menor y/o la ingesta dietética sea insuficiente (Zuluaga, Alfaro, Balthazar, Jiménez, & Campuzano, 2011).

De acuerdo con la ENSANUT y varios estudios de investigación sobre esta prohormona. Se recomienda exponer brazos y piernas a la luz solar, durante 15 a 30 min entre las 10:00 am y las 3:00 pm, dos veces por semana. Así esta forma proporciona aproximadamente 20,000 unidades internacionales (UI) de vitamina D (Flores, y otros, 2011) (Holick, M, & Ph, 2007).

Dieta Rica En Vitamina D

Las dos fuentes de obtención son plantas y/o vegetales (ergocalciferol) y cárnicos y/o derivados (colecalfiferol). En la tabla 2 se especifican los alimentos y el aporte nutricional de esta prohormona.

Además, de estas dos fuentes principales, existen suplementos de vitamina D que contienen colecalfiferol o calcitriol, en diferentes presentaciones de dosificación y de contenido único y/o combinado con calcio.

Al suplementar vitamina D los profesionales del área de la salud consideran: la causa de la deficiencia o insuficiencia, la edad, el peso corporal y algunas características propias de cada persona con la necesidad de este vitamínico, como, personas con alteraciones de la piel. Para recomendar las dosis de acuerdo con sus requerimientos personales y así evitar la producción de efectos tóxicos o el desperdicio del suplemento (Zuluaga, Alfaro, Balthazar, Jiménez, & Campuzano, 2011).

Requerimientos De Vitamina D

Dependen principalmente de la edad, de las patologías que evitan una absorción o metabolismo adecuado de esta hormona, y de las concentraciones séricas de cada persona. En la tabla 3 se mencionan algunos alimentos ricos en vitamina D.

Los requerimientos mencionados ayudan a mejorar las concentraciones bajas de vitamina D en sangre, como insuficiencia y deficiencia en su grado moderado y severo. Lo que evitaría condiciones de enfermedad, ya que, a diferencia de otras vitaminas, la carencia de esta prohormona no evidencia de inmediato su déficit con signos y/o síntomas, sino que el riesgo de enfermedad se hace mayor a largo plazo (Zuluaga, Alfaro, Balthazar, Jiménez, & Campuzano, 2011).

Ejemplo de lo anterior, son las alteraciones mentales (depresión y ansiedad principalmente), inmunológicas, respiratorias, etc. Que se han manifestado, desarrollado y exacerbado a lo largo de esta pandemia. Y que de acuerdo con múltiples estudios existe una asociación con el déficit de la vitamina D, del cual se sugiere una mayor prevalencia debido al confinamiento.

Tabla 2		
<i>Nutrimentos con alto contenido de vitamina D.</i>		
Fuente	Cantidad	Contenido de vitamina D
Sardinas enlatadas	100 g	300 UI
Atún enlatado	100 g	230 UI
Salmón fresco de criadero	100 g	100-250 UI vitamina D3 o D2
Salmon enlatado	100 g	300-600 UI vitamina D3
Aceite de hígado de bacalao	5 ml	400-1,0000 vitamina D3
Huevo	una yema	20 UI vitamina D3 y D2
Caballa, anguila, arenque, pez espada: se desconoce su aporte específico de vitamina D.		
Champiñones frescos	100 g	100 UI vitamina D2
Champiñones secos al sol	100 g	1600 UI vitamina D2
Zetas y aguacate, se desconoce su aporte específico.		

Nota: UI (unidades internacionales). Información obtenida de (Holick, M, & Ph, 2007).

Tabla 3	
<i>Vitamina D y su ingesta diaria recomendada.</i>	
Edad	Cantidad recomendada
Lactantes (6 a 12 meses)	400 UI/día
Niños (1 a 18 años)	600 UI/día
Adultos (19-70 años)	600 UI/día, máximo 1,500-2000 UI/día
Adultos >70 años	800 UI/día, máximo 4,000 UI/día
Mujeres embarazadas o lactando	600 UI/día, máximo 1000-2000 UI/día

Fuente: UI (unidades internacionales), información obtenida de (Holick, M, & Ph, 2007).

Depresión En Tiempos De Pandemia

En la actualidad y durante esta pandemia, la salud mental ha ganado importancia dentro de las afectaciones sanitarias que aquejan a nuestra población. Sin embargo, la depresión ha sido unas de las alteraciones con mayor prevalencia desde hace muchos años, y hoy en día siguen aumentando los casos.

De acuerdo con la OMS, la depresión está considerada como un problema de salud pública pues forma parte de las patologías mentales más prevalentes en todo el mundo. Clínicamente, se caracteriza por presentar sentimientos de tristeza, culpa y desesperanza, además afecta la concentración, el placer y el sueño, así como al apetito, lo que genera fatiga para realizar actividades cotidianas (escolares, laborales y/o familiares) (OMS, 2020).

Las causas específicas de la depresión aún no son del todo conocidas, sin embargo, varios estudios apuntan hacia cuestiones endógenas y exógenas, como las genéticas (antecedentes familiares de primer grado con trastorno depresivo mayor), neurobiológicas (disminución en la producción y actividad de los neurotransmisores serotonina, norepinefrina y dopamina), así como las psicosociales respectivamente (Sadock, Ahmad, & Sadock, 2018).

Epidemiología Depresiva

En todo el mundo la prevalencia de la depresión es alarmante, pues su afectación es mayor a los 300 millones de personas, así mismo se le considera la principal causa de discapacidad que contribuye con la morbilidad en general de la población mundial (OMS, 2020).

En México, la Encovid-19 realizó un

monitoreo en el pasado mes de abril del 2020 y se detectó una prevalencia de síntomas depresivos del 27.3 %, observándose un aumento bastante considerable respecto de la última medición que realizó la ENSANUT en el 2018, pues la prevalencia en adultos jóvenes y adultos mayores fue de 13.3 % (Cerecero-García, Macías-González, Arámburo-Muro, & Bautista-Arredondo, 2020) (Teruel, Gaitán, Leyva, & Pérez, 2021).

En las dos cuantificaciones, la prevalencia de esta afectación mental es mayor en las mujeres respecto de los hombres. Otro aspecto importante de la depresión durante la crisis pandémica es el estrato socioeconómico, ya que el estrato bajo alcanza una prevalencia del 39 %, mientras que el estrato alto solo el 9 % (Teruel, Gaitán, Leyva, & Pérez, 2021).

También, durante el 2019 se llevó a cabo un estudio con población estudiantil del IPN entre los 18 y 30 años, donde también se evaluó síntomas de depresión, y se obtuvieron como resultados que el 25 % de los participantes puntuaron con síntomas moderados de depresión y un 20 % con síntomas severos, además la mayor incidencia también se observó en el sexo femenino. (Román & Sevilla, 2020).

Con esto, se puede observar que la prevalencia de síntomas depresivos en población general es similar con la arrojada por poblaciones específicas.

Factores De Riesgo Y Protección

Si bien es cierto que para el desarrollo de esta afectación mental se conjuntan factores que contribuyen a su aparición, también es importante mencionar que existen determinantes que ayudan a la prevención.

La interrelación de factores psicológicos, biológicos y sociales dan como resultado la presencia de síntomas depresivos, por ejemplo, durante el curso de la COVID-19 muchas personas atravesaron por distintos escenarios, como, el propio desarrollo de la enfermedad respiratoria, el resguardo en casa para evitar contagios, las pérdidas familiares, de amigos y/o conocidos, así como el desempleo, la exacerbación de sus patologías de base (DM y HAS, etc.), la incertidumbre del rumbo de esta pandemia y la baja exposición solar de acuerdo con diversos estudios, fueron algunos detonantes para el desarrollo de la depresión (OMS, 2020).

Todo esto se suma a las determinantes ya conocidas, es decir, antecedentes de alteraciones mentales y/o psiquiátricas, enfermedades crónico-degenerativas, autoinmunes, cánceres, etc., consumo de sustancias psicoactivas (alcohol y drogas), estrés crónico, bajo nivel socioeconómico, así como el estado civil (soltero, divorciado o viudo) por mencionar algunas (Grupo de trabajo de la Guía de Práctica Clínica sobre el Manejo de la Depresión en el Adulto, 2014).

Por otro lado, las determinantes que ayudan con la prevención de esta alteración son (OMS, 2020):

- La identificación a tiempo de síntomas depresivos.
- El apoyo familiar, de amigos, conocidos y/o compañeros de trabajo.
- Realización de actividades físicas al aire libre, de relajación o de su preferencia (hobbies).

- Ser participe en estrategias y/o programas comunitarios y escolares que fomenten modelos de pensamiento positivo, así como intervención conductual (OMS, 2020).

La identificación de esta afectación mental no es tarea fácil, pues quién la padece minimiza o normaliza su sintomatología, lo que evita que acuda con algún profesional de la salud que la oriente acerca de sus síntomas. Pues esta afectación va más allá de sentirse triste algunos días o simplemente no tener ánimos de realizar labores diarias, ya que en el peor de los escenarios se puede llegar a un suicidio (OMS, 2020).

Diagnóstico Y Terapéutica

Afortunadamente se cuenta con escalas psicométricas que ayudan y complementan el diagnóstico clínico para la detección oportuna de esta afectación mental, y su uso cada vez es más frecuente, pues la tecnología nos ha permitido evaluar a los pacientes en la distancia mediante las plataformas digitales, y en esta crisis sanitaria su uso ha ido en aumento.

En cuanto a la terapéutica de la depresión, existe una gama de tratamientos a implementar que dependen de la gravedad de los síntomas y las necesidades particulares de cada paciente, así se cuenta con tratamiento psicoterapéutico que incluye la activación conductual, terapia conductivo-conductual, de solución de problemas, de pareja y la psicoterapia interpersonal, por mencionar algunas. Este tratamiento a puede ser individual, en pareja o en grupos. Además, se cuenta con fármacos antidepresivos, por ejemplo, los inhibidores selectivos de la recaptación de la serotonina y los antidepresivos tricíclicos (OMS, 2020) (Grupo de trabajo de la Guía de Práctica

Clínica sobre el Manejo de la Depresión en el Adulto, 2014).

Por ello se puede implementar un tratamiento sólo o combinado, siempre tomando en cuenta si el/la paciente tiene síntomas depresivos moderados o graves, las preferencias individuales y los efectos secundarios de los antidepresivos. En el caso de síntomas leves, o sintomatología depresiva en niños y adolescentes está indicada la eficacia de la terapéutica psicosocial (OMS, 2020).

Además, se pueden implementar actividades que mejoren su estado de ánimo, como la realización de pasatiempos en espacios cerrados o al aire libre, éstas últimas por la exposición solar y síntesis cutánea de vitamina D, que de acuerdo con varias investigaciones existe una posible asociación con la disminución de síntomas depresivos (Werneke, Gaughran, & Taylor, 2021).

Fundamento Y Propósito

La deficiencia de vitamina D y la depresión son un problema de salud pública en México, ya que desde hace varios años se ha venido evaluando la prevalencia de síntomas depresivos y el comportamiento de la vitamina D en población general, cada uno por separado sin proponer una probable asociación.

Actualmente la crisis pandémica, vino a exacerbar ambas situaciones sanitarias y a mostrarnos la importancia que tiene la salud mental y las múltiples funciones de la vitamina D, tanto a nivel inmunológico como neuroendocrino, de acuerdo con diversos estudios internacionales.

Dado lo anterior, el estudio de las ba-

jas concentraciones de vitamina D y los síntomas depresivos posee múltiples aplicaciones en el área médica y biotecnológica.

La investigación clínica de la cual se desprende este artículo tiene como objetivo brindar información actual de las bajas concentraciones en sangre de vitamina D presentadas en una parte de la población mexicana residente de la CDMX, así como la posible asociación con los síntomas depresivos que se cuantificaran en el mismo estudio. Y poder dar oportunidad a nuevos estudios de investigación que evalúen la suplementación de vitamina D con el comportamiento depresivo poblacional en México. De obtener los resultados esperados podría considerarse a esta prohormona como parte de la terapéutica de prevención de depresión y otras enfermedades ya relacionadas.

Métodos

Se implementó una búsqueda minuciosa de los artículos más importantes acerca de la vitamina D y su relación con la depresión, esto a través de distintas fuentes de datos como, Pubmed, ELSEVIER, Scielo, Springer, Redalyc y The Cochrane Library.

Discusión

Existe poca evidencia en México acerca de la deficiencia de vitamina D en distintas regiones del país. La única información con la que se cuenta en la actualidad fue obtenida de mediciones previas al confinamiento por la COVID-19. Pero dada la tendencia al incremento de este déficit vitamínico en los últimos años, sería importante conocer el panorama actual de esta carencia en la población mexicana y consolidar las recomendaciones de obtención de vitamina D, de acuerdo con la edad, el peso y características propias de las personas,

que puedan modificar las dosis diarias recomendadas en México.

Pues los múltiples beneficios que nos aporta esta prohormona y lo vital que significa mantener o reponer las cantidades séricas necesarias dan como resultado el buen funcionamiento del organismo, que se traduciría en la prevención del desarrollo de múltiples alteraciones corporales a largo plazo.

Sería importante considerar una evaluación de la carencia de esta vitamina en población general, con cierta periodicidad, que tome en cuenta escenarios como esta crisis pandémica y con sus consecuencias o desventajas que impiden la correcta obtención de este componente vitamínico. Y a su vez hacer del conocimiento general que el déficit de ciertos nutrimentos u hormonas pueden llevar a desenlaces desfavorables en la alteración de su salud.

Si bien la deficiencia de vitamina D, no es el único factor asociado con la depresión, la evidencia científica apunta a que existe una posible asociación entre los síntomas depresivos y el déficit de esta prohormona.

La depresión es un síntoma que si no es detectado y tratado a tiempo puede tener efectos graves a nivel personal, familiar, escolar, laboral, social, así como, sanitarios y económicos. El efecto o resultado de mayor fatalidad es el suicidio.

Lo anterior se debe al hecho de que esta alteración mental es la principal causa de discapacidad que contribuye a la morbilidad de la población. Sin embargo, la detección clínica de la depresión no es tarea fácil, pues implica cuestiones personales y

probables deficiencias en los sistemas de salud, que generan poca o inadecuada importancia ante esta problemática sanitaria hasta antes de la pandemia.

Afortunadamente y durante el desarrollo de esta pandemia se implementaron múltiples herramientas digitales y/o telefónicas que ayudaron con la detección rápida y oportuna de síntomas depresivos. Siendo esta una parte de la solución a dicha problemática, pero aún hace falta implementar estrategias eficaces en el tratamiento y prevención de esta condición mental. Por lo que, múltiples estudios científicos se encuentran trabajando sobre esta vertiente sanitaria.

Conclusiones

Concordamos que con la llegada de la COVID-19, el desarrollo de síntomas depresivos y los bajos niveles de vitamina D, tomaron mayor relevancia en la salud de la población. Pues la mayoría de las personas presentaron alteraciones de su salud mental debido a la crisis pandémica, lo que llevo a una menor exposición solar por el confinamiento como parte de las medidas de protección ante la expansión de los contagios.

En virtud de lo planteado a lo largo de este artículo, podemos dilucidar que la depresión no respeta edad, sexo o nivel socioeconómico, simplemente prevalece más en un aspecto que en otro. Así, es importante considerar que esta alteración mental puede presentarse en cualquier momento o etapa de la vida.

Si bien es cierto que la deficiencia de vitamina D en México es una situación de salud a resolver, también es cierto que parte de la solución a este problema

recae en la decisión personal, pues esta prohormona es una molécula que se puede obtener de forma natural y gratuita mediante la síntesis cutánea a través de la exposición solar, por la ingesta de alimentos ricos en esta vitamina y en últimas instancias por la suplementación con la misma.

Cabe resaltar que el uso de esta última fuente deberá ser mediante prescripción o recomendación por personal de la salud que se encuentre familiarizado con los usos y beneficios de la vitamina D, de lo contrario, se puede generar daño al organismo por desconocimiento de las dosis y formas adecuadas de suplementación.

De esta forma se pueden aprovechar adecuadamente los múltiples beneficios que la vitamina D genera en nuestra salud, y que, de acuerdo con la evidencia científica internacional, existe una posible asociación con los síntomas depresivos y su prevención.

Asociación que nuestro equipo de trabajo está próximo a realizar en un estudio que medirá concentraciones de vitamina D en sangre y síntomas de depresión en personas residentes de la CDMX, mediante el uso de una escala psicométrica validada en población mexicana, para posteriormente realizar el análisis estadístico y dilucidar el comportamiento de ambas afectaciones de salud.

Agradecimientos: Instituto Politécnico Nacional, CONACYT y Escuela Superior de Medicina. Maestría en Ciencias de la salud. El proyecto antes mencionado se está desarrollando en la ESM del IPN, si te interesa conocer tus concentraciones en sangre de vitamina D y participar en el estudio, favor de

comunicarte al siguiente correo electrónico: estudio.vitd@gmail.com.

Referencias

Cerecero-García, D., Macías-González, F., Arámburo-Muro, T., & Bautista-Arredondo, S. (Noviembre-Diciembre de 2020). Síntomas depresivos y cobertura de diagnóstico y tratamiento de depresión en población mexicana. *Salud Pública de México*, 62(6). doi:<https://doi.org/10.21149/11558>

Fedirko, V., Torres-Mejía, G., Ortega-Olvera, C., Biessy, C., Angeles-Llerenas, A., Lazcano-Ponce, E., . . . Romieu, I. (Jul de 2012). Serum 25-hydroxyvitamin D and risk of breast cancer: results of a large population-based case-control study in Mexican women. . *Cancer Causes Control*, 23(7), 1149-1162. doi:10.1007/s10552-012-9984-z

Flores, M., Sánchez-Romero, L., Macías, N., Lozada, A., Díaz, E., & Barquera, S. (2011). *Concentraciones séricas de vitamina D en niños, adolescentes y adultos mexicanos. Resultados de la ENSANUT 2006*. (I. N. Pública, Ed.) Cuernavaca, México.: Instituto Nacional de Salud Pública.

Grupo de trabajo de la Guía de Práctica Clínica sobre el Manejo de la Depresión en el Adulto. (2014). *Guía de Práctica Clínica sobre el Manejo de la Depresión en el Adulto*. (S. S. Ministerio de Sanidad, Ed.) Galicia, España: Ministerio de Sanidad, Servicios Sociales e Igualdad. Agencia de Evaluación de Tecnología.

Holick, M., M, D., & Ph, D. (July de 2007). Vitamin D Deficiency. *N Engl J Med*, 357(3), 266-281. doi:10.1056 / NEJM-

ra070553

Norman, A. (Agust de 2008). From vitamin D to hormone: fundamentals of the vitamin D endocrine system essential for good health. *Am J Clin Nutr*, 88(2), 491S-499S. doi:10.1093/ajcn/88.2.491S.

OMS. (2020). Recuperado el 21 de Junio de 2021, de Organización Mundial de la Salud.: <https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/depression>

OMS. (2020). Recuperado el 15 de Julio de 2021, de Organización Mundial de la Salud: <https://www.who.int/es/news/item/05-10-2020-covid-19-disrupting-mental-health-services-in-most-countries-who-survey>

Piña-Aguero, M. (2019). *Frecuencia de los polimorfismos del gen receptor de vitamina D (FokI y BsmI) y su asociación con la función de la célula beta pancreática en adultos de la Ciudad de México*. (L. S. México, Ed.) Ciudad de México: La Salle México.

Rendón, A. (2018). *Relación de la vitamina D y Depresión*. Puebla: UDLAP.

Román, J., & Sevilla, L. (2020). *“Identificación de factores vinculados al suicidio y su correlación con variables académicas y sociodemográficas en estudiantes de medicina del IPN”*. (IPN, Ed.) Ciudad de México.: IPN.

Sadock, B., Ahmad, S., & Sadock, V. (2018). *KAPLAN & SADOCK MANUAL DE BOLSILLO DE PSIQUIATRÍA CLÍNICA*. (Sexta ed.). (S. A. Benjamin James Sadock, Ed.) Barcelona, España.: Wolters Kluwer.

Teruel, G., Gaitán, P., Leyva, G., & Pérez, V. (enero-junio de 2021). Depresión en México en tiempos de pandemia. *Coyuntura Demográfica*(19), 63-69. Obtenido de http://coyunturademografica.somede.org/wp-content/uploads/2021/04/Teruel-et-al_CD19.pdf

Tripkovic, L., Lambert, H., Hart, K., Smith, C., Bucca, G., Penson, S., . . . Lanham-New, S. (Junio de 2012). Comparison of vitamin D2 and vitamin D3 supplementation in raising serum 25-hydroxyvitamin D status: a systematic review and meta-analysis. *Soy J Clin Nutr*, 95(6). doi:10.3945 /ajcn.111.031070

Werneke, U., Gaughran, F., & Taylor, D. (Junio de 2021). Vitamin D in the time of the coronavirus (COVID-19) pandemic – a clinical review from a public health and public mental health perspective. *Therapeutic Advances in Psychopharmacology*, 11. doi:10.1177/20451253211027699

Werneke, U., Gaughran, F., & Taylor, D. (Junio de 2021). Vitamin D in the time of the coronavirus (COVID-19) pandemic-a clinical review from a public health and public mental health perspective. *Therapeutic Advances in Psychopharmacology*, 11, 1-27. doi:10.1177/20451253211027699

Zuluaga, N., Alfaro, J., Balthazar, V., Jiménez, K., & Campuzano, G. (Abril de 2011). Vitamina D: nuevos paradigmas. *Medicina y Laboratorio*, 17(5-6), 211-246. Obtenido de <https://medicinaylaboratorio.com/index.php/myl/article/view/331/318>



